



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CAPACIDAD DEPURADORA DE  
*PHRAGMITES AUSTRALIS* Y *CYPERUS PAPYRUS* EN HUMEDALES  
ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO VERTICAL PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CANTÓN SANTA  
ISABEL”.**

Tesis de grado previo a la obtención del  
título de: ingeniero ambiental

**AUTORAS:**

Jhanina Fabiola Patiño Chávez

Fanny Lucía Zhinín Chimbo

**DIRECTOR:**

Ing. Fausto Fernando García Ávila

Cuenca - Azuay – Ecuador

2015



## RESUMEN

La presente investigación tiene como finalidad, realizar un estudio comparativo de la capacidad depuradora de contaminantes utilizando dos especies de plantas en humedales artificiales subsuperficiales con flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Las especies utilizadas son *Phragmites Australis* (carrizo) y *Cyperus Papyrus* (papiro). Para este fin se tomó un caudal de la tercera laguna de la planta de tratamiento de aguas residuales El Guabo del cantón Santa Isabel, y se aplicó a dos unidades a escala piloto con flujo continuo. Para analizar el porcentaje de remoción de a través de parámetros físicos, químicos y biológicos se tomó muestras en el ingreso y a la salida en cada una de las unidades experimentales. Los resultados obtenidos en los ensayo de experimentación con las dos especies, indican que el papiro presenta una mayor capacidad de remoción de contaminantes como demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo y coliformes totales y fecales (E. Coli); en el caso del carrizo retiene mayor cantidad de sólidos. Por lo tanto, la especie con mayor eficiencia fue el papiro.

**Palabras clave:** humedales artificiales, tratamiento de aguas residuales domésticas, carrizo, papiro.



## ABSTRACT

The present investigation has as purpose, to carry out a comparative study of the purifying capacity of pollutants using two species of plants in vertical subsurface flow constructed wetlands to the treatment of domestic waste waters. The species used are *Phragmites australis* (reed) and *Cyperus Papyrus* (papyrus). For this object we took a flow of the third lagoon treatment plant waste water El Guabo Santa Isabel Canton, and it was applied to two pilot scale units with continuous flow. To analyze the removal percentage through physical, chemical and biological parameters were taken samples in income and output in each of the experimental units. The results obtained in the test experiments with both species indicate that the papyrus has a greater capacity to remove pollutants such as biochemical oxygen demand (BOD5), chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen, nitrate, phosphorus and coliforms total and fecal (*E. coli*); in the case of reed retains as much solid. Therefore, the species with more efficiency was the papyrus.

**Keywords:** constructed wetlands, treatment domestic waste, water, reed, papyrus



## ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I .....	15
INTRODUCCION Y OBJETIVOS .....	15
1.1 Antecedentes.....	15
1.2 Identificación del problema y justificación.....	16
1.3 Objetivos .....	17
1.3.1 Objetivo General:.....	17
1.3.2 Objetivos Específico.....	18
1.4 Hipótesis.....	18
CAPITULO II .....	19
MARCO TEORICO.....	19
2.1 Aguas Residuales.....	19
2.1.1 Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.....	20
2.2 Sistemas De Tratamiento De Aguas Residuales.....	24
2.2.1 Tratamiento preliminar .....	26
2.2.2 Tratamiento primario .....	26
2.2.3 Tratamiento secundario .....	27
2.2.4 Tratamiento terciario .....	28
2.2.5 Fitorremediación .....	29
2.3 Humedales Artificiales.....	29
2.3.1 Concepto de humedal.....	29
2.3.2 Concepto de Humedal artificial o construido.....	30
2.3.3 Funciones .....	30
2.3.4 Tipos de humedales.....	31
2.3.5 Ventajas y desventajas.....	39
2.3.6 Mecanismos de Depuración .....	40
2.3.7 Tipos de Vegetación .....	48
2.3.7.2 Papiro.....	51
CAPITULO III .....	56
DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	56
3.1 Dimensionamiento a Escala Real .....	56
3.1.1 Área superficial .....	56



3.1.2 Profundidad .....	59
3.1.3 Medio granular .....	59
3.1.4 Tiempo de retención hidráulico .....	60
3.1.5 Pendiente.....	62
3.1.6 Relación largo-ancho .....	62
3.2 Dimensionamiento a Escala Piloto.....	63
3.3 Sistemas Híbridos.....	63
3.4 Construcción.....	63
3.5 Funcionamiento.....	65
CAPITULO IV .....	66
IMPLEMENTACION DE HUMEDALES PILOTO DE FLUJO VERTICAL .....	66
4.1. Ubicación Geográfica del Proyecto.....	66
4.2 Diseño de Humedales Artificiales.....	67
4.2.1 Diseño a escala real.....	67
4.2.2 Diseño a escala piloto.....	73
4.3 Construcción de los Humedales a Escala Piloto .....	76
CAPITULO V .....	101
PARTE EXPERIMENTAL .....	101
5.1 Operación de los Humedales Construidos .....	101
5.2 Análisis e Interpretación de Resultados.....	110
5.2.1 Análisis de resultados por parámetros.....	114
5.2.2 Comparación con la Normativa Ambiental TULSMA .....	135
CAPITULO VI.....	138
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	138
BIBLIOGRAFÍA.....	141
CAPITULO VII.....	144
ANEXOS .....	144

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procesos para el tratamiento de aguas residuales.....	25
Figura 2. Mapa conceptual de tipos de humedales.....	32
Figura 3. Esquema del humedal de Flujo Superficial.....	33
Figura 4. Esquema de humedal artificial de Flujo Subsuperficial. ....	34
Figura 5. Esquema de Macrófitas para humedales con plantas emergentes de Flujo Subsuperficial.....	36
Figura 6. Esquema de humedal artificial subsuperficial con plantas emergentes de flujo vertical. ....	38
Figura 7. Esquema de elementos constitutivos de humedales artificiales subsuperficiales con plantas emergentes de flujo vertical. ....	39
Figura 8. Diagrama de procesos que intervienen en la biodegradación de materia orgánica en los humedales artificiales. ....	44
Figura 9. Capas del medio granular. ....	59
Figura 10. Esquema general de ingreso de caudal al sistema piloto. ....	65
Figura 11. Disposición de cada material en el humedal. ....	88
Figura 12. Esquema de Tratamiento de Aguas Residuales desde donde se realiza la toma de caudal.....	101
Figura 13. Esquema general de ingreso de caudal y puntos de muestreo al sistema. ....	106

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Conductividad hidráulica ( $K_s$ ) del tipo de material granulométrico a utilizar en los humedales artificiales de flujo subsuperficial. ....	60
Tabla 2. Valores de caudal tomados por el método volumétrico. ....	68
Tabla 3. Datos para el cálculo de área superficial.....	70
Tabla 4. Dimensiones de material granulométrico y sus respectivas alturas.....	71
Tabla 5. Datos de los parámetros de diseño del humedal artificial a escala piloto. ....	75
Tabla 6. Resultados de los análisis Físico-Químico y Microbiológicos para determinar la eficiencia del sistema de humedales propuesta. ....	112
Tabla 7. Porcentajes de remoción en el periodo de muestreo. Se presentan en forma porcentual los niveles de remoción en los humedales. ....	112
Tabla 8. Promedio de los resultados y comparación con el TULSMA. ....	136

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Izquierda: Ambiente de desarrollo de carrizo. Derecha: carrizo en su hábitat.....	51
Fotografía 2. Hoja de Papiro dispuesto en forma de estrella. ....	52
Fotografía 3. Papiro desarrollándose en su hábitat natural. ....	53
Fotografía 4. Ubicación de la implementación de los humedales artificiales junto a la Planta de Tratamiento "El Guabo" .....	66
Fotografía 5. Sistema de Tratamiento "El Guabo" .....	67
Fotografía 6. Tercera laguna de tratamiento.....	68
Fotografía 7. Medición de caudal en la tercera laguna.....	68
Fotografía 8. Limpieza y desmonte de sitio de emplazamiento del proyecto. ....	76
Fotografía 9. Trazo de área de implantación directa de proyecto.....	76
Fotografía 10. Limpieza del área de construcción de los humedales. ....	77
Fotografía 11. Nivelación del área de construcción de los humedales. ....	77
Fotografía 12. Terreno listo para trabajos de excavación.....	77
Fotografía 13. Inicio del trazo para construcción de humedales.....	78
Fotografía 14. Trazado para construcción de humedales.....	78



Fotografía 15. Inicio de excavación de terreno para construcción de humedales. ....	79
Fotografía 16. Excavación a profundidad para los humedales. ....	79
Fotografía 17. Fosas para los humedales. ....	79
Fotografía 18. Excavación de canales de salida del agua tratada. ....	80
Fotografía 19. Unión de tuberías.....	81
Fotografía 20. Instalación de tuberías de salida del sistema.....	81
Fotografía 21. Fosas y sus respectivos canales de salida del sistema. ....	81
Fotografía 22. Relleno de canales.....	82
Fotografía 23. Punto unión de tubos de PVC y mangueras para descarga de aguas tratadas. .....	82
Fotografía 24. Colocación de Geomembrana.....	83
Fotografía 25. Geomembrana colocada en área de implantación directa.....	83
Fotografía 26. Perforación de geomembrana en tubería de salida de agua.....	84
Fotografía 27. Materiales para la instalación de tuberías de drenaje y de aireación.....	84
Fotografía 28. Pegado de tuberías para el sistema de drenaje. ....	85
Fotografía 29. Tuberías de recolección con orificios. ....	85
Fotografía 30. Colocación del sistema de recolección. ....	85
Fotografía 31. Colocación de tuberías de ventilación.....	86
Fotografía 32. Vista de Tubería de Aireación y Recolección.....	86
Fotografía 33. Vista de la zona de extracción del material para proyecto.....	87
Fotografía 34. Transporte de Materiales desde Mina hacia zona de proyecto.....	87
Fotografía 35. Descarga de Materiales en zona de implantación de Proyecto. ....	88
Fotografía 36. Tamices para clasificación de Material.....	89
Fotografía 37. Tamiz 2x2 cm para primera capa de material filtrante.....	89
Fotografía 38. Tamiz 1x1 cm para segunda capa para material filtrante.....	90
Fotografía 39. Tamiz para cuarta capa (arena gruesa) de material filtrante. ....	90
Fotografía 40. Lavado de Material con el apoyo de Cuerpo de Bomberos de Santa Isabel. ....	91
Fotografía 41. Lavado de material de material filtrante. ....	91
Fotografía 42. Zona de recolección de material filtrante. ....	92
Fotografía 43. Recolección manual de grava fina.....	92
Fotografía 44. Colocación de una base de material para protección de tuberías. ....	93
Fotografía 45. Izquierda: Material para primera capa. Derecha: Colocación de primera capa de material filtrante. ....	93
Fotografía 46. Izquierda: Material para segunda capa. Derecha: Colocación de segunda capa filtrante.....	94
Fotografía 47. Material para la tercera capa filtrante. ....	94
Fotografía 48. Izquierda: material para cuarta capa filtrante. Derecha: Colocación de cuarta capa.....	94
Fotografía 49. Colocación del quinto material filtrante luego del trasplante.....	95
Fotografía 50. Colocación de una capa fina de material filtrante (arena de mar). ....	95
Fotografía 51. Rizomas de carrizo sembradas en arena. ....	96
Fotografía 52. Rizomas de carrizo en sus primeros brotes. ....	96
Fotografía 53. Trasplante de Papiros en humedal.....	97
Fotografía 54. Distribución de papiros en humedal.....	97
Fotografía 55. Botella perforada para la toma de agua, para evitar el ingreso de sólidos mayores de 3mm.....	98
Fotografía 56. Colocación de tuberías de distribución de agua hacia los humedales.....	98
Fotografía 57. Colocación de bridas de seguridad en tuberías.....	99
Fotografía 58. Construcción de caja de protección para medidores de caudal de ingreso. ....	99
Fotografía 59. Colocación de Goteros en el sistema de distribución del humedal. ....	100
Fotografía 60. Vista de los dos humedales con sus tuberías de distribución respectivamente. .....	100



Fotografía 61. Fase de desarrollo inicial de humedal con papiro y humedal con carrizo. ....	102
Fotografía 62. Primer mes de desarrollo de papiro y carrizo en los humedales. ....	102
Fotografía 63. Segundo mes de desarrollo de papiro y carrizo en los humedales. ....	103
Fotografía 64. Presencia de problemas encharcamiento en los humedales. ....	103
Fotografía 65. Tercer mes de desarrollo de papiro y carrizo en los humedales. ....	104
Fotografía 66. Cuarto mes de desarrollo de papiro y carrizo en los humedales. ....	104
Fotografía 67. Quinto mes de desarrollo de papiro y carrizo previo a la poda. ....	105
Fotografía 68. Vista de Humedal con papiro después de la fase de poda. ....	105
Fotografía 69. Prueba in situ de pH y temperatura en agua de ingreso de humedales. ....	108
Fotografía 70. Toma de muestras de agua de ingreso para análisis en laboratorio. ....	109
Fotografía 71. Toma de muestras de agua de salida de humedal con papiro para análisis de laboratorio. ....	109
Fotografía 72. Agua de salida del Humedal con carrizo. ....	109
Fotografía 73. Etiquetado de muestras. ....	110
Fotografía 74. Comparación de Agua de salida (izquierda) y agua de entrada (derecha) del sistema. ....	110

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Valores de pH. ....	114
Gráfico 2. Porcentaje de reducción de pH. ....	115
Gráfico 3. Valores de temperatura. ....	116
Gráfico 4. Porcentaje de variación de Temperatura. ....	117
Gráfico 5. Valores de Alcalinidad. ....	117
Gráfico 6. Porcentajes de variación de Alcalinidad. ....	118
Gráfico 7. Valores de Conductividad. ....	118
Gráfico 8. Porcentajes de variación de Conductividad. ....	119
Gráfico 9. Concentración de Sólidos Totales. ....	120
Gráfico 10. Porcentaje de variación de Sólidos Totales. ....	121
Gráfico 11. Concentración de Sólidos Suspendidos. ....	122
Gráfico 12. Porcentajes de variación de Sólidos Suspendidos. ....	122
Gráfico 13. Concentración de Sólidos Disueltos. ....	123
Gráfico 14. Porcentajes de variación de Sólidos Disueltos. ....	124
Gráfico 15. Concentración de DQO. ....	124
Gráfico 16. Porcentajes de remoción de DQO. ....	125
Gráfico 17. Concentración de DBO <sub>5</sub> . ....	126
Gráfico 18. Porcentajes de variación de DBO <sub>5</sub> . ....	127
Gráfico 19. Concentración de Nitratos. ....	128
Gráfico 20. Porcentajes de variación de Nitratos. ....	129
Gráfico 21. Concentración de Nitrógeno Amoniacal. ....	130
Gráfico 22. Porcentajes de variación de Nitrógeno Amoniacal. ....	131
Gráfico 23. Concentración de Fósforo Total. ....	132
Gráfico 24. Porcentaje de variación de Fósforo Total. ....	132
Gráfico 25. Concentración de Coliformes Totales. ....	133
Gráfico 26. Porcentajes de variación de Coliformes Totales. ....	134
Gráfico 27. Concentración de Coliformes Fecales. ....	134
Gráfico 28. Porcentajes de variación de Coliformes Fecales. ....	135





Universidad de Cuenca  
Cláusula de derechos de autor

---

*Jhanina Fabiola Patiño Chávez*, autora de la tesis “Estudio comparativo de la capacidad depuradora de *Phragmites australis* y *Cyperus papyrus* en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en el cantón Santa Isabel”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 26 de noviembre de 2015.

Jhanina Fabiola Patiño Chávez

C.I: 0106442155



Universidad de Cuenca  
Cláusula de derechos de autor

---

Fanny Lucía Zhinín Chimbo, autora de la tesis “Estudio comparativo de la capacidad depuradora de *Phragmites australis* y *Cyperus papyrus* en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en el cantón Santa Isabel”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 26 de noviembre de 2015.

---

Fanny Lucía Zhinín Chimbo

C.I: 0302697958



Universidad de Cuenca  
Cláusula de propiedad intelectual

---

*Jhanina Fabiola Patiño Chávez*, autora de la tesis “Estudio comparativo de la capacidad depuradora de *Phragmites australis* y *Cyperus papyrus* en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en el cantón Santa Isabel”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 26 de noviembre de 2015.

Jhanina Fabiola Patiño Chávez

C.I: 0106442155



Universidad de Cuenca  
Cláusula de propiedad intelectual

---

Fanny Lucía Zhinín Chimbo, autora de la tesis “Estudio comparativo de la capacidad depuradora de *Phragmites australis* y *Cyperus papyrus* en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en el cantón Santa Isabel”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 26 de noviembre de 2015.

Fanny Lucía Zhinín Chimbo

C.I: 0302697958



## DEDICATORIA

### **JHANINA PATIÑO**

Quiero dedicar este trabajo de manera especial a mis padres, a mi papi Efraín porque a pesar de la distancia siempre me brindo el apoyo y el ejemplo para ser una profesional ejemplar; a mi mamita y mejor amiga Mery porque cada día con su sacrificio y ejemplo de mujer valiente y trabajadora me apoyo a pesar de las circunstancias vividas.

### **FANNY ZHININ**

Dedico el presente trabajo con todo cariño principalmente a mis padres Andrés y Dolores, que han estado presentes a lo largo de mi vida, que con sus sabias enseñanzas me han sabido conducir por el camino de la superación y mediante sacrificio y dedicación han hecho posible el cumplimiento de mi formación personal.



## AGRADECIMIENTOS

### **JHANINA PATIÑO**

Mis agradecimientos a mis padres por ser ejemplo de lucha y perseverancia, a mis hermanos por el apoyo incondicional, a nuestro director de tesis por su guía y apoyo en este trabajo, a la Universidad de Cuenca y profesores porque de ellos aprendimos que el Ingeniero nace en las aulas y crece en la práctica; a mi amiga incondicional y compañera de tesis Fanny por la confianza brindada; al GAD Municipal de Santa Isabel por el interés y apoyo en el proyecto y a todas las personas que de una u otra manera aportaron positivamente al cumplimiento de este sueño.

### **FANNY ZHININ**

Mis más sinceros agradecimientos a mis padres que a pesar de la distancia me han brindado todo su apoyo incondicional en mis años de estudio y durante toda mi vida; a nuestro Tutor de Tesis, Ing. Jorge García, quiero dejar mi reconocimiento de gratitud por habernos dirigido nuestra investigación y que a su vez compartió todos sus conocimientos para la realización y culminación de este trabajo; al I municipio de Santa Isabel por apoyo brindado al proyecto. Finalmente a todas las personas que de una u otra manera aportaron y que han potenciado nuestros esfuerzos para lograr concretar nuestro trabajo.



## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

#### 1.1 Antecedentes

El agua ha sido utilizada a lo largo de la historia como un medio para limpiar y llevar lejos los detritos humanos y otros residuos generados como residuos de las actividades diarias. En la antigüedad únicamente se reconoció al agua como un medio para transportar residuos, no se pensó en los términos como contaminación del agua, debido a que no se presentó una concentración lo suficientemente importante para generar un foco de polución (Orozco, 2005).

En el año 1871, William Dibdin un químico Londinense, utilizó un filtro de arena para el tratamiento de aguas residuales, a partir de un resultado negativo, en 1896 cambia el medio filtrante de arena a piedra para favorecer la oxigenación. A partir de estos experimentos se ha optimizado el proceso cambiando el medio filtrante con materiales distintos a la piedra tales como plástico, donde las bacterias se adhieren, crecen y degradan la materia orgánica (Orozco, 2005).

El tratamiento de las aguas residuales se realiza a consecuencia del desarrollo de la civilización, caracterizado por el crecimiento demográfico y la expansión industrial (Rojas , 2002). Para ello, se puede utilizar tratamientos convencionales en poblaciones grandes y tratamientos no convencionales en núcleos de poblaciones pequeñas o en zonas rurales, donde no se cuenta con el servicio de alcantarillado o las edificaciones están muy dispersas.

El cantón Santa Isabel esta conformada por las parroquias Santa Isabel, Abdón Calderón, Shagli y El Carmen de Pijilí. Estas parroquias cuentan con sistema de alcantarillado, pero solo las parroquias Santa Isabel y Abdón Calderón poseen tratamiento de aguas residuales. De esta forma no se cubre toda el área poblada, en especial la zona rural, por lo que se realiza conexiones a pozos sépticos, pozos ciegos, letrinas y en algunos casos no existe conexión a ningún sistema de evacuación de aguas residuales.





En el caso de la Parroquia Santa Isabel, específicamente la cabecera cantonal, el sistema de alcantarillado supone una cobertura del 44% de la población, seguido de un 39% de los casos conectados a pozos sépticos y pozos ciegos, y por último estos porcentajes se complementa con un 17% de conexiones a letrinas o descarga directa al campo.

Las aguas transportadas mediante el sistema de alcantarillado, llegan a la planta de tratamiento de las aguas residuales “El Guabo”, ubicadas en el sector Lacay en la vía Santa Isabel – Sulupali. La planta está compuesta de tres lagunas en serie: una aerobia, una facultativa y la última de maduración, funcionando esta última como decantador. Dicho tratamiento beneficia al sector centro de la cabecera cantonal.

El tratamiento de la cabecera cantonal se complementa con tratamientos individuales de 2 fosas sépticas: la primera está ubicada en Rolando Sarmiento en el sector La Victoria y la segunda se encuentra en el Alto Cenepa en el sector Chirimoyapamba.

Por último la zona oeste conformada por ciudadela Los Naranjos, descarga directa en la quebrada San Juan (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Santa Isabel, 2015).

## 1.2 Identificación del problema y justificación

En el cantón Santa Isabel hasta ahora se han utilizado métodos biológicos para el tratamiento de aguas residuales, pero aún no se han realizado investigaciones en la viabilidad del tratamiento con biofiltros utilizando macrófitas. Pudiendo presentarse la oportunidad para mejorar la calidad de aguas de descarga y comprobar un método que se pueda reproducir en las zonas rurales del cantón, debido a que los tratamientos convencionales no tienen cobertura total del área poblada.

La presente investigación gira en torno a la capacidad depurativa de las especies carrizo (*Phragmites australis*) y papiro (*Cyperus papyrus*) utilizadas en humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales del cantón mencionado. Los humedales artificiales nos brindan un sistema natural de





depuración de los contaminantes de las aguas residuales, su implementación representa un costo más conveniente en comparación con métodos de tratamientos convencionales.

En la cabecera cantonal de Santa Isabel no existe industrias a gran escala que aporten contaminantes a las aguas residuales, sino que estas provienen de fuentes domésticas y locales comerciales (restaurantes, lavadoras, entre otros) conteniendo altos niveles de carga orgánica; Razón por la cual se propone la construcción de humedales artificiales subsuperficiales con flujo vertical, debido a que trabajan con altas tasas de carga orgánica, además durante el proceso de depuración no existiría la presencia de olores ni insectos, el mismo que es una ventaja ya que la zona de implementación no se convertirá en una fuente de reproducción de vectores (Delgadillo et al., 2010).

Las macrófitas a utilizarse son: *Phragmites australis* conocido con su nombre común: carrizo y *Cyperus papyrus* de nombre común: papiro, se pretende evaluar su capacidad de depuración. Hay que recalcar que las dos especies citadas se desarrollan en ambientes con altos contenidos de humedad pero no inundados, por lo que dichas macrófitas fueron candidatas perfectas para los humedales debido que ya han sido utilizados como biofiltros y se ha demostrado su capacidad depurativa.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo General:

- Realizar un análisis comparativo de la capacidad depuradora entre *Phragmites australis* y *Cyperus papyrus* en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el cantón Santa Isabel.



### 1.3.2 Objetivos Específico

- Diseñar e implementar humedales experimentales en la PTAR “El Guabo”
- Evaluar el proceso de depuración de contaminantes de las aguas residuales en los humedales utilizando las macrófitas carrizo y papiro.

### 1.4 Hipótesis

El uso de *Phragmites australis* y *Cyperus papyrus* en humedales subsuperficiales de flujo vertical reducen la concentración de contaminantes químicos y biológicos en las aguas residuales.



## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Aguas Residuales

La OMS (Organización Mundial de la Salud) define a las aguas residuales como aguas utilizadas de manera colectiva, arrastrando desechos provenientes de residencias, edificios comerciales e industrias, así como las aguas subterráneas o superficiales que son recogidas en una red de alcantarillado.

De acuerdo a su origen, las aguas residuales son el resultado de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua, que proceden de residencias, edificios comerciales y oficinas, a esto se une los residuos industriales y agrícolas, así como se pueden presentar de manera eventual aguas subterráneas, superficiales y precipitación (Rolim, 2000), (Romero, 2008).

Las aguas residuales se clasifican de acuerdo a su origen en:

**Aguas pluviales:** aguas que provienen de la escorrentía superficial generadas por la precipitación atmosférica. Se caracterizan por aportar caudales considerables de manera intermitente y concentraciones importantes de contaminantes que se agregan al atravesar la atmósfera y por el lavado de superficies y terrenos, arrastrando arena, tierras, hojas y otros residuos.

**Aguas blancas:** son las aguas de escorrentía superficial y de drenaje. Se caracterizan por aportaciones de caudales drenados (aguas salobres, filtraciones de alcantarillados).

**Aguas domésticas:** vertidos generados en la actividad doméstica o comercial de centros poblados, es decir, utilizadas con fines higiénicos (sanitarios, cocinas, lavanderías, otros). El caudal es menor que las aguas blancas pero su contaminación es constante y su composición es principalmente orgánica.

**Aguas industriales:** son vertidos generados en procesos industriales. En este tipo de aguas puede aparecer contaminantes propios de cada actividad



industrial como: tóxicos, iones metálicos, elementos químicos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, productos radioactivos, entre otros.

**Aguas agrarias:** proceden de actividades agrícolas y ganaderas. Pueden contener sustancias similares a las aguas domésticas pero las concentraciones propias son de fertilizantes (de origen inorgánico como sulfatos, nitratos, fosfatos, etc.), biocidas (plaguicidas, productos fitosanitarios, etc.) estiércol, residuos varios, entre otros (Hernández et al., 1996), (Rolim, 2000), (Romero, 2008).

### 2.1.1 Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.

Las características físicas, químicas y biológicas determinan la calidad del agua residual. Estas características afectan la capacidad para mantener tanto a la vida humana como a la vida vegetal y animal. Mediante estos parámetros se puede detectar los problemas existen en los procesos de tratamiento en una estación depuradora de aguas residuales.

#### Temperatura

Es una propiedad física, mide el calor o energía térmica de las partículas en una sustancia en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). La temperatura del agua residual suele ser mayor que la del agua para abastecimiento, debido a descarga de agua caliente provenientes de uso doméstico e industrial. La temperatura es importante en las aguas residuales por su efecto en las características del agua, en procesos de tratamiento y métodos de disposición final.

También esta propiedad determina el desarrollo de la actividad microbiana, siendo el rango óptimo de 25 a 35  $^{\circ}\text{C}$ . Si la temperatura se eleva cerca a los 50  $^{\circ}\text{C}$  los procesos de digestión aerobia y nitrificación se suspenden, mientras que, si la temperatura es inferior a 5  $^{\circ}\text{C}$  se inhibe la actividad microbiana (Delgadillo et al., 2010). Cuando la temperatura es menor a 15 $^{\circ}\text{C}$  la digestión metanogénica es muy lenta (Romero, 2013).

#### pH

Es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno presentes en una solución.



El pH de las aguas residuales urbanas, se encuentra entre 6.5 y 8.5. Estos valores son los adecuados para realizar tratamientos y para la existencia de la mayoría de la vida acuática. Con valores mayores a 9.2 se tiene efectos inhibidores del crecimiento de *E. coli*. Para procesos biológicos de nitrificación se recomienda valores entre 7.2 y 9 y para procesos de desnitrificación valores entre 6.5 y 7.5. En una descarga con pH ácido, se disuelven los metales pesados; a su vez, el pH alcalino ocasiona la sedimentación de los metales (Romero, 2013), (Delgadillo et al., 2010).

### Sólidos Totales

Es la materia sólida contenida en el agua, que se obtiene como residuo después de someter el agua a temperaturas entre 10 y 105 °C hasta que se evapore. Se diferencian de acuerdo al tamaño de las partículas: sólidos disueltos totales o filtrables, aquellos que atraviesan un filtro de membrana; y sólidos suspendidos, aquellos que serán retenidos en un filtro de membrana de vidrio con tamaño de poro de 1.2 micras. Los sólidos totales se expresan en unidades de ml/l o mg/l. De acuerdo a la naturaleza del soluto: sólidos orgánicos volátiles y sólidos inorgánicos o fijos (Delgadillo et al., 2010).

### Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos no fotosintéticos, para metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente a una temperatura de 20°C.

Es parámetro fundamental para determinar: el estado o calidad de aguas residuales y superficiales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar la materia orgánica biodegradable, para el diseño de unidades de tratamiento biológico y a su vez evaluar la eficiencia y fijar la carga orgánica de vertidos en fuentes receptoras.

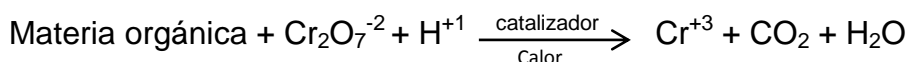
La DBO se cuantifica en condiciones normales de laboratorio, es decir, a 20°C; el ensayo estándar se realiza en cinco días de incubación. Su resultado está expresado en mg O<sub>2</sub>/l (Romero, 2013).



## Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es un parámetro químico que mide la cantidad de oxígeno requerida para descomponer la materia orgánica mediante el uso de agentes químicos oxidantes fuertes, por lo general dicromato de potasio, en un medio ácido y a temperaturas elevadas.

La reacción principal se puede representar de la siguiente manera:



En este proceso se oxidan todos los compuestos orgánicos en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Para ciertos compuestos orgánicos resistentes se necesita la ayuda de un catalizador, como el sulfato de plata.

Los resultados de las mediciones de DQO se obtienen cerca de tres horas, expresada en unidades de  $\text{mg O}_2/\text{l}$ .

Este parámetro también es útil para determinar la concentración orgánica en aguas residuales industriales o municipales, que pueden ser tóxicas para la vida biológica, (Romero, 2013).

## Nitrógeno

En las aguas residuales, la forma predominante del nitrógeno es el nitrógeno orgánico que se descompone en nitrógeno amoniacal y se transforma en nitritos y nitratos por acción de bacterias aerobias, los nitrosomas y los nitrobacter (Hernández et al., 1996). Si existe un predominio de nitratos este es un indicador de la estabilización de las aguas residuales con respecto a la demanda de oxígeno. Los nitratos al ser utilizados como nutrientes por algas y otros microorganismos, se pueden remover para prevenir o evitar el crecimiento de estas plantas (Romero, 2008).

En las aguas residuales domésticas la concentración de nitrógeno total puede estar en un intervalo de 30 a 100  $\text{mg/l}$ , nitrógeno amoniacal entre 5-20  $\text{mg/l}$ , nitritos y nitratos menor a 1  $\text{mg/l}$ . La concentración de nitratos en aguas residuales tratadas puede ser de 30  $\text{mg/l}$  (Romero, 2013).



## Fósforo

El fósforo es un elemento esencial para el crecimiento de microorganismos de las aguas y en consecuencia para el proceso de depuración biológica. En las aguas residuales el contenido de fósforo se debe por una parte a los vertidos urbanos (detergentes, productos de limpieza, fosas sépticas, etc.) y por otra parte a los vertidos de la industria agroalimentaria (fertilizantes, pesticidas, etc.) (Hernández et al., 1996). La descarga de fosfatos en fuentes receptoras estimula el crecimiento de organismos fotosintéticos, que pueden causar eutrofización de las aguas (Romero, 2013).

El fósforo generalmente se encuentra en formas usuales como ortofosfato ( $\text{PO}_4^{-3}$ ), polifosfatos y fosfatos orgánicos. La suma de los tres tipos de fósforo se considera como el contenido total de fósforo ( $\text{P}_{\text{tot}}$ ), que es un parámetro importante a considerar en las operaciones de las plantas de tratamiento de aguas (Romero, 2013).

## Coliformes

Los coliformes son un conjunto de bacterias u organismos capaces de producir enfermedades. Los coliformes son utilizados como organismos indicadores de contaminación; por lo general las bacterias coliformes se encuentran abundantemente en la capa superficial del agua o en los sedimentos acumulados en el fondo. Cada persona arroja diariamente entre  $10^9$  y  $4 \times 10^{11}$  de coliformes por gramo de heces, de esta manera su presencia se puede detectar con facilidad y utilizarse como norma de control sanitario (Romero, 2013).

Según Delgadillo et al. (2010) se clasifican en dos grupos:

**Coliformes totales:** son bacilos gram-negativos aerobios y anaerobios facultativos no esporulados. Estas bacterias tienen la capacidad de reproducirse fuera de los intestinos de los animales homeotérmicos, en condiciones favorables de temperatura, materia orgánica, pH y humedad. Otra fuente de reproducción es en el biofilm formado en las tuberías de distribución de agua potable.



**Coliformes fecales:** constituyen un subgrupo de los coliformes totales, su tamaño está comprendido entre 0.0002-0.0003 mm por 0.002 a 0.003 mm, son aerobios/anaerobios facultativos no esporulados. Se diferencian de los coliformes totales por ser tolerantes a temperaturas elevadas (hasta 44,5 °C), esto les permite adaptarse de mejor manera en el interior del animal. Se considera el género *Escherichia*, especie *Escherichia Coli*, como bacterias más representativas de contaminación fecal. Del total de coliformes fecales presentes en los excrementos humanos, entre el 90% y el 100% corresponden *E. coli*, y un gramo de heces contiene entre 5000 millones y 50000 millones de coliformes fecales; en otras palabras, que más del 40% del peso húmedo de los excrementos está compuesto por células bacterianas.

## 2.2 Sistemas De Tratamiento De Aguas Residuales

El sistema de tratamiento de aguas residuales consiste un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos para la depuración de los contaminantes provenientes de la descarga de aguas tanto de uso doméstico como industrial en un área definida y bajo parámetros controlados. El objetivo del tratamiento es reducir la concentración de contaminantes incorporados en el agua para cumplir con los límites establecidos en la legislación ambiental, así mismo mantener un balance ecológico y asegurar la protección de la biosfera (Hernández et al., 1996).

Las principales razones de tratamiento son:

- Salud pública
- Económicas
- Estéticas
- Legales.

Los tipos de tratamientos pueden ser:

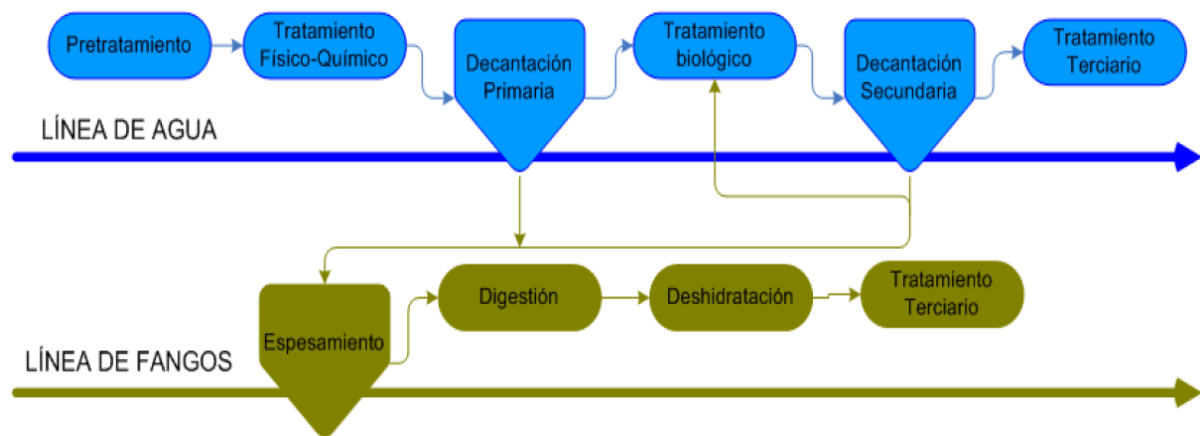
**Convencionales:** empleados para asentamientos humanos importantes y que producen efectos negativos en la fuente receptora. Consiste en el uso de tecnologías que consumen energía eléctrica de manera considerable y requieren de mano de obra especializada para la operación del sistema.



**Tratamientos para pequeñas poblaciones:** utilizados en núcleos de poblaciones pequeñas o en zonas rurales donde las edificaciones están aisladas del sistema de alcantarillado. Se aplican tratamientos no convencionales o convencionales adaptados con baja tecnificación y poco o nulo consumo de energía. Sus costos de construcción, operación y mantenimiento son bajos y no requiere de mano de obra especializada.

Los procesos para el tratamiento de aguas residuales trabaja en dos líneas principales, la primera enfocado al agua y la segunda respecto a los fangos.

Figura 1. Procesos para el tratamiento de aguas residuales.



## ETAPAS DE TRATAMIENTO

El tratamiento de aguas residuales consta de cuatro etapas:

- Tratamiento preliminar o pretratamiento, su objetivo es eliminar residuos fácilmente separables y algunos casos se requiere también de una etapa de preaireación.
- Tratamiento primario, comprende de procesos físicos como sedimentación simple por gravedad o asistida por coagulantes y floculantes.
- Tratamiento secundario, consiste en procesos biológicos aerobios, anaerobios y físico-químicos para disminuir la concentración de DBO.
- Tratamiento terciario, consta de procesos avanzados para una mayor reducción de DBO, elimina contaminantes químicos específicos, metales pesado, patógenos y parásitos.



### 2.2.1 Tratamiento preliminar

Esta etapa consiste en la eliminación de materias gruesas, cuerpos gruesos y arenosos presentes en el efluente que perturban y reducen la eficiencia de funcionamiento de máquinas, equipo e instalaciones de las plantas de tratamiento (Hernández et al., 1996).

Los procesos de pretratamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales depende de:

- El origen del agua residual (doméstica, industrial, etc.).
- La calidad del agua residual a tratar (cantidad de residuos, arenas, grasas, etc.)
- Importancia del sistema de tratamiento.

El pretratamiento consta de los siguientes procesos:

- Aliviaderos
- Rejillas de desbaste
- Tamizado
- Desarenado
- Desengrasado

En una planta depuradora no es necesaria una instalación para cada proceso, se puede construir un depósito y combinar los procesos. Dependerá de las características antes descritas.

### 2.2.2 Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene como objetivo eliminar los sólidos en suspensión (sedimentables o flotantes) presentes en el agua residual mediante procesos físicos o físico-químicos u otros procesos que reduzcan la contaminación biodegradable, debido a que una parte de sólidos eliminados contienen materia orgánica. En esta etapa se consigue quitar de 20 a 30% de  $\text{DBO}_5$  (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y de 50 a 70% de sólidos suspendidos totales (Alianza por el agua, 2008), (Olivos, 2010). Cabe destacar la importancia que tienen los tratamientos primarios en el sistema de tratamiento de aguas residuales, pues



de su correcta y eficiente operación depende en un gran porcentaje la reducción de la carga contaminante presentes en el efluente (Valencia, 2009).

Según su diseño y operación se pueden clasificar en (Osnaya, 2012):

- Tanque séptico
- Tanque Imhoff
- Tanques de sedimentación primaria

Para completar el tratamiento primario se puede incorporar los siguientes procesos físico – químicos (Alianza por el agua, 2008):

- Flotación
- Coagulación – floculación
- Homogeneización
- Neutralización
- Filtración

### 2.2.3 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario o tratamiento biológico tiene como objetivo eliminar la contaminación orgánica disuelta y en estado coloidal que no se eliminaron en procesos anteriores. Este proceso biológico se realiza con la participación de microorganismos presentes en el agua residual, que se desarrollan en un reactor en condiciones aerobias. Estos microorganismos, especialmente bacterias, descomponen la materia orgánica en suspensión y estado coloidal produciendo gases y agua, dando como resultado una biomasa bacteriana que precipita en el sedimentador secundario en forma de fangos activos. De esta manera, el agua contiene menos impurezas y los fangos generados se deben eliminar mediante otras técnicas (Pérez, 2012).

La materia orgánica generada en el tratamiento biológico debe ser removida, ya que representa una carga orgánica significativa.

Podemos encontrar una variedad de dispositivos utilizados para el tratamiento secundario de las aguas residuales:

- Lodos activados.



- Lagunas de estabilización.
- Filtros percoladores.
- Biodiscos
- Biotorres

#### 2.2.4 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario o avanzado tiene como objetivo eliminar los contaminantes específicos (pueden resultar tóxicos) presentes en el agua residual, tales como nitratos y compuestos derivados del fósforo que provienen del uso de detergentes domésticos e industriales, que no han podido ser separados en los tratamientos anteriores y cuya descarga en curso de agua favorece la eutrofización.

Este proceso complementa procesos anteriores para lograr efluentes más puros, es decir, aumenta la calidad del efluente disminuyendo la carga contaminante. Al efluente final se le puede dar diferentes usos como recarga de acuíferos, riego de cultivos, recreación, en zonas verdes, otros. Es un tratamiento completo, pero su aplicación resulta ser muy caro (Marín & Osés, 2013).

No todas las plantas tienen esta etapa ya que dependerá de la composición del agua residual y el destino que se le dará.

Existen muchos métodos de tratamiento terciario, algunos de los más importantes son los siguientes (Osnaya, 2012):

- Filtración.
- Adsorción.
- Intercambio iónico.
- Ósmosis Inversa.
- Electrodialisis.
- Oxidación química.
- Proceso Sonozone.



### 2.2.5 Fitorremediación

En las últimas décadas del siglo XX surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelos o emplazamientos contaminados y recuperar los ecosistemas afectados. Cuando estas tecnologías se basan en el uso de plantas, globalmente reciben el nombre de *fitorremediación* (en español se usan indistintamente también: *fitorrecuperación*, *fitocorrección*, *fitorrestauración* o *fitorrehabilitación*). Se define como el uso de plantas verdes para eliminar los contaminantes del entorno o para reducir su peligrosidad (Salt et al., 1998).

En la fitorremediación, los humedales artificiales o contruidos son una de las alternativas a las tecnologías convencionales de tratamiento, los cuales se expondrán con mayor profundidad en las próximas secciones.

## 2.3 Humedales Artificiales

Romero (2013) argumenta el concepto de tratamiento acuático en el que explica que consiste en la aplicación de aguas residuales en terrenos húmedos naturales o artificiales con el propósito de remover los contaminantes.

### 2.3.1 Concepto de humedal

Son complejos mosaicos de láminas de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas de nivel freático cercano a la superficie, el suelo se mantiene saturado durante largos periodos de tiempo; en los mismos crecen vegetales, animales y microorganismos adaptados especialmente a estas condiciones, todos estos componentes 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 químicos tóxicos, por estas razones los humedales son llamados los riñones del mundo (Cano, 2003).

Son utilizados para el tratamiento de aguas residuales municipales, para tratamiento secundario y avanzado, en el tratamiento de aguas de irrigación, para tratar lixiviados de rellenos sanitarios, en el tratamiento de residuos de



tanques sépticos y para el desarrollo de hábitats para crecimiento del valor ambiental.

Según Álvarez & Bécares (2008) los humedales se consideran como sistemas de bajo coste, en especial aplicables para comunidades con baja-media densidad poblacional.

### 2.3.2 Concepto de Humedal artificial o construido

Los humedales artificiales son sistemas pasivos de depuración contruidos con agua, poco profundos, normalmente de menos de un metro de profundidad, con plantas propias de zonas húmedas, y en los que los procesos de descontaminación se realizan simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos (Bayona et al., 2004).

Los humedales contruidos han recibido gran cantidad de nombres en distintas partes del mundo donde han sido usados, entre ellos son Humedales Artificiales o Humedales Contruidos. Hay que recalcar que se consideran humedales aquellos sistemas que usan macrófitos (Cano, 2003).

En estos sistemas el agua fluye continuamente, la superficie permanece libre al nivel del suelo o por encima del mismo, manteniéndolo en estado de saturación durante un largo periodo del tiempo. Existen humedales de tratamiento creados a partir de zonas húmedas naturales y humedales contruidos artificialmente. Los humedales naturales, en caso de ser utilizados para depuración de aguas residuales, deben de observarse las normas limitativas al respecto de la calidad del agua vertida (IGME, 1995).

Hay que tener en cuenta que estos sistemas no deben ser considerados como sistemas milagrosos que ingresa el agua por un extremo y sale ya tratada y apta para ser dispuesta en el suelo o en una fuente receptora, sino que debe ser entendido como sistemas complejos que interactúan entre sí para lograr un objetivo que es la depuración de las aguas (García, 2010).

### 2.3.3 Funciones

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales (Novotny & Olem, 1994):



- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

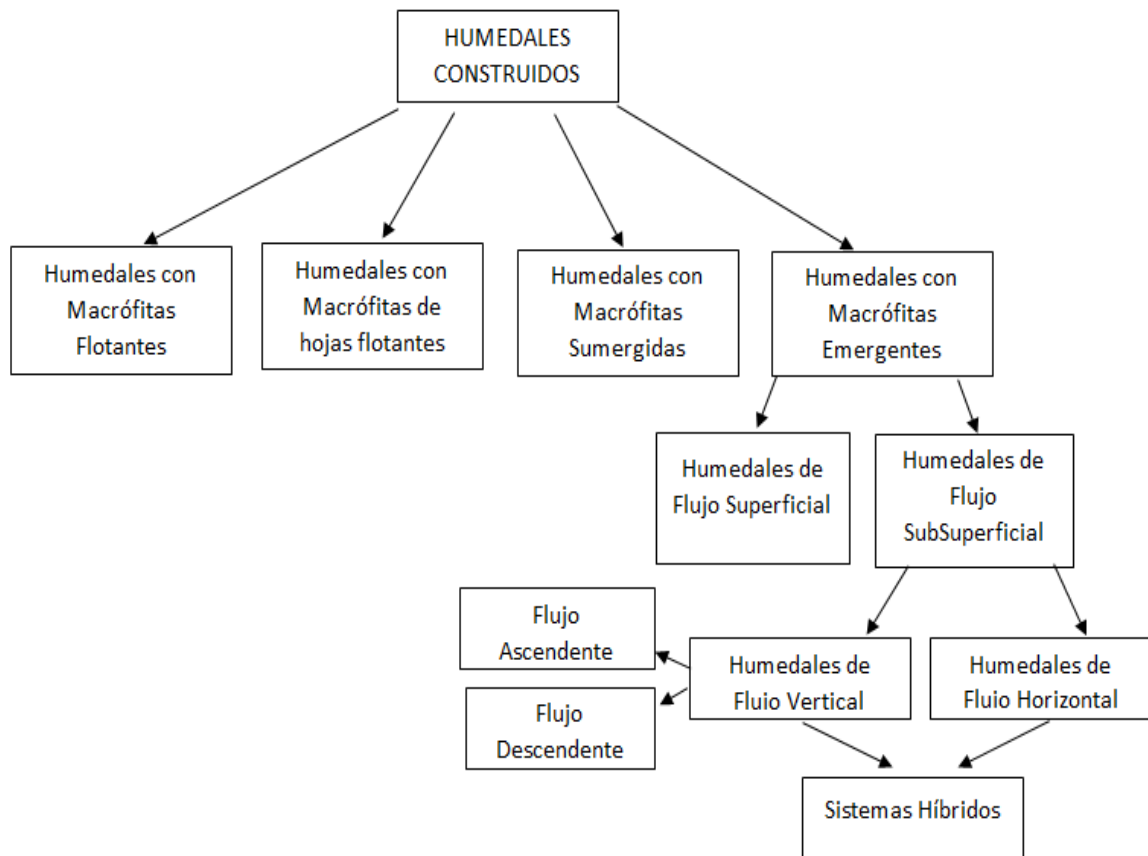
La utilización de plantas acuáticas ha sido desarrollada como un tratamiento secundario o terciario alternativo de aguas residuales, y ha demostrado ser eficiente en la remoción de una amplia gama de sustancias, orgánicas así como nutrientes y metales pesados.

El mecanismo de depuración de las aguas residuales en los humedales es el siguiente: las plantas acuáticas, que constituyen la base de la tecnología de los humedales, tienen la propiedad de inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces. El oxígeno que no es aprovechado por la especie y que ésta expele es absorbido por microorganismos, como bacterias y hongos, que se asocian a la raíz y se encargan de metabolizar los contaminantes que ingresan al sistema.

#### 2.3.4 Tipos de humedales

Al ser sistemas artificiales estos permiten sus modificaciones por lo que se establece una clasificación basada en el tipo de macrófitas, recordemos que los humedales establecen su función principal de depuración de las aguas residuales por las macrófitas que se desarrollan en los mismos; por lo que según Arias & Brix (2011) la clasificación es a partir del tipo de macrófitas utilizadas.

Figura 2. Mapa conceptual de tipos de humedales.



**Humedales con Macrófitas Flotantes.**-Se basa en estanques de 0,4 a 1,5m de profundidad, en estos sistemas se desarrolla una especie flotantes entre ellas tenemos: Jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*), lenteja de agua (*Lemna minor*) y Helecho de Agua (*Azolla caroliniana*). Hay que recalcar que dichas especies poseen capacidades depuradoras debido a que es sus raíces contienen microorganismos que favorece la acción depuradora de las plantas acuáticas (Hidalgo et al., 2005).

**Humedales con Macrófitas Sumergidas.**-En este sistema constan las macrófitas como helechos (*Azolla caroliniana*) y musgos (*Taxiphillum barbieri*).

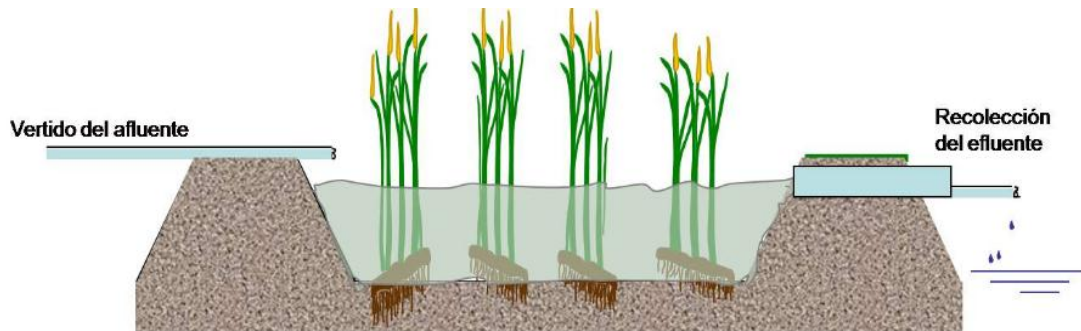
A partir del tipo de flujo de las aguas residuales que García & Corzo (2008), establecen una clasificación de los humedales de acuerdo a la circulación del agua:



#### 2.3.4.1 Flujo superficial

En estos sistemas el agua se encuentra expuesta directamente a la atmósfera y circula a través de tallos y hojas de las plantas; se podría entender como una modificación de un lagunaje natural, la lámina de agua posee una profundidad de 0.3 y 0.4 m.

Figura 3. Esquema del humedal de Flujo Superficial.



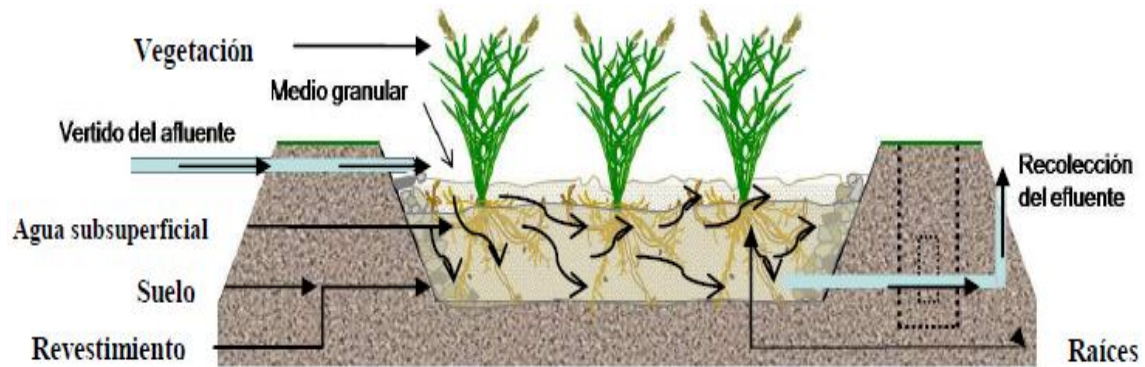
Fuente: (García & Corzo, 2008)

#### 2.3.4.2 Flujo Subsuperficial

En estos sistemas la circulación del agua es de tipo subterráneo por un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas, la profundidad de la lámina de agua suele ser entre 0.3 y 0.9 m; en el medio granular, raíces y rizomas se adhiere y crece una biopelícula que posee un papel fundamental en los procesos de depuración del agua. Cabe recalcar que este término es muchas veces confuso debido a que esta terminología se utiliza para filtros verdes, biofiltros, lechos de plantas y lechos de juncos, etc. Por lo que se recomienda conocer a los sistemas antes mencionados como humedales contruidos de flujo Subsuperficial.

La diferencia de los sistemas de flujo subsuperficial respecto a los de flujo superficial radica en la mayor capacidad de tratamiento debido a que admiten mayor carga orgánica, bajo riesgo de contacto del agua con las personas y la aparición de insectos (García & Corzo, 2008).

Figura 4. Esquema de humedal artificial de Flujo Subsuperficial.



Fuente: (García & Corzo, 2008)

## Tipos de humedales de flujo Subsuperficial

Estos sistemas se clasifican de acuerdo al sentido de circulación del agua.

### Humedal Subsuperficial de Flujo Horizontal

El agua circula horizontalmente a través del medio granular, rizomas y raíces de plantas, la profundidad de la lámina de agua se encuentra 0.3 y 0.9 m. Funcionan permanentemente inundados, por lo que el agua se halla a 0.05 y 0.1 m por debajo de la superficie y con cargas alrededor de 6g DBO/m<sup>2</sup> día (García & Corzo, 2008).

El agua fluye a través de la zona radicular de la vegetación por lo que no presentan una superficie libre de flujo, consiste en una excavación con un lecho de material gravoso, en donde se desarrolla la vegetación emergente. Este sistema es utilizado como tratamiento secundario o terciario de las aguas residuales (Peña et al., 2011).

### Los humedales están constituidos por:

1. Estructuras de entrada del efluente
2. Impermeabilización del fondo y laterales con láminas sintéticas o arcilla compactada
3. Medio granular
4. Vegetación emergente típica de zonas húmedas
5. Estructuras de salida regulables para controlar el nivel de agua.



### Estructuras de entrada y salida

Se requiere de una correcta distribución y recolección de las aguas, razón por la cual las entradas y salidas deben estar muy bien diseñadas y construidas.

El agua residual proveniente de los tratamientos previos llega hasta una arqueta donde el caudal es dividido equitativamente y es vertido al lecho. La recolección de las aguas se realiza con una tubería perforada que se encuentra asentada en el fondo del humedal (García & Corzo, 2008).

### Impermeabilización

Es importante contar con una barra de impermeabilización de manera que se confina el sistema y previene la contaminación de las aguas subterráneas, según las condiciones del terreno se recomienda una compactación previa a la colocación de láminas sintéticas o aportaciones de arcilla (García & Corzo, 2008).

### Medio granular

En las zonas de entrada y salida se colocan piedras que permiten diferenciar estas zonas de lo que es el medio granular principal. El conjunto medio granular/biopelícula/plantas debe ser considerado como el principal constituyente de los humedales.

En el medio granular suceden los procesos de retención y sedimentación de la materia en suspensión, degradación de la materia orgánica, transformación y asimilación de los nutrientes e inactivación de los microorganismos patógenos.

El medio granular debe ser limpio (exento de finos), homogéneo duro y durable y capaz de mantener su forma a largo plazo; Además debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula. Diámetros medios alrededor de 5-8mm.

La conductividad hidráulica del medio granular es importante debido a esta propiedad depende el flujo de agua que puede circular a través de él; hay que recalcar que con el paso del tiempo la conductividad hidráulica disminuirá (García & Corzo, 2008).

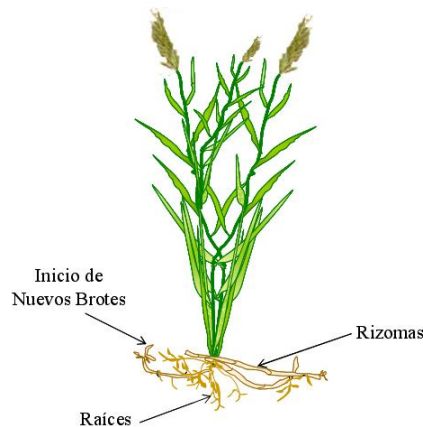
## Vegetación

Se basan en macrófitos emergentes típicos de las zonas húmedas tales como:

- Carrizo (*Phragmites*)
- Espadaña (*Typha*)
- Juncos (*Scirpus*)

Se recomienda la siembra de 3 ejemplares por metro cuadrado.

Figura 5. Esquema de Macrófitas para humedales con plantas emergentes de Flujo Subsuperficial.



Fuente: (García & Corzo, 2008)

Todas estas plantas presentan adaptaciones especiales para vivir en ambientes permanentemente anegados, sus tejidos internos disponen de espacios vacíos que permiten el flujo de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas. Los rizomas tienen gran capacidad colonizadora y proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula.

La biopelícula se adhiere a la partes subterráneas de las plantas y en el medio granular, alrededor de las raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos microbianos que usan oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación.

Las plantas reducen la intensidad de la luz que incide sobre el medio granular, lo que evita las bruscas gradientes de temperatura que puede afectar el proceso de depuración y en los climas fríos protege de las temperaturas bajas.

La vegetación a usarse en los sistemas de depuración deben cumplir con ciertas características como (García & Corzo, 2008):



1. Especies colonizadoras activas y con eficaz extensión de rizomas.
2. Capacidad de alcance de biomasa por unidad de superficie para asimilación de nutrientes.
3. Biomasa subterránea gran superficie específica para crecimiento de biopelícula.
4. Eficaz sistema de transporte de oxígeno hacia las raíces para la degradación aeróbica y nitrificación.
5. Especies capaces de soportan condiciones adversas en especial contaminantes.
6. Especies de flora local.

### Humedales Subsuperficiales de flujo vertical

Estos sistemas aparecieron como desarrollo de los sistemas horizontales con el objetivo de mejorar la eficiencia, en especial mejorar la nitrificación.

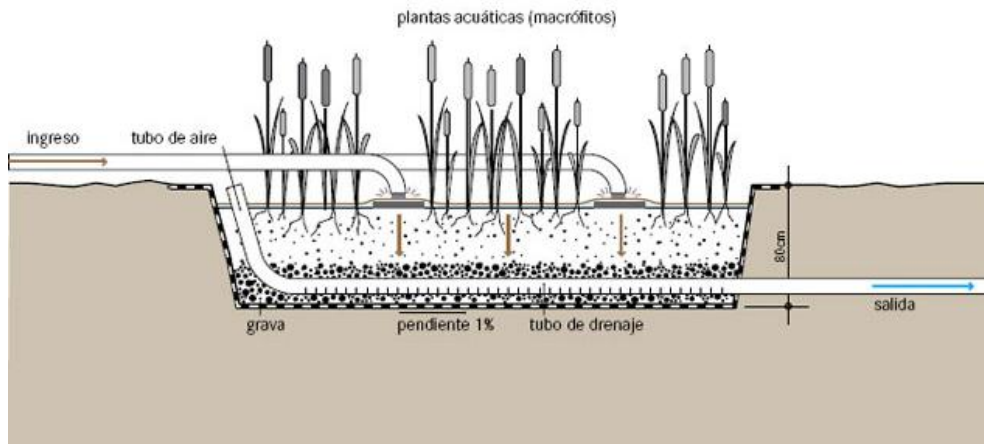
Es un lecho de filtración donde se planta vegetación acuática. Las aguas residuales se vierten o aplican a la superficie del humedal desde arriba usando un sistema mecánico de dosificación. El agua fluye verticalmente hacia abajo por la matriz del filtro. La diferencia importante entre el humedal vertical y el horizontal no sólo es la dirección del flujo, sino las condiciones aeróbicas.

Estos sistemas se diseñan con flujo intermitentes, es decir tienen fases de llenado, reacción y vaciado, por lo que poseen características diferentes a los humedales horizontales. La intermitencia en la alimentación mejora mucho la transferencia de oxígeno y el medio granular se encuentra en condiciones más oxidadas si se compara con el del tipo horizontal entre 20 y 40 g DBO/m<sup>2</sup> día; por lo tanto ocupan menos espacio en tratar el mismo caudal (García & Corzo, 2008).

En la actualidad son los más aplicados, muchas veces en combinación con los humedales horizontales para dar lugar a los llamados sistemas híbridos que consisten en una configuración de dos sistemas verticales seguidos o bien unos vertical seguido de otro horizontal, con estos sistemas es posible eliminar más de un 90% de la materia en suspensión. Los sistemas con flujo vertical se consideran como reactores bioquímicos de flujo pistón con una cinética de

primer orden que transforman compuestos disueltos (DBO y DQO) a compuestos inertes o a metabolitos que son asimilados por los organismos vivos.

Figura 6. Esquema de humedal artificial subsuperficial con plantas emergentes de flujo vertical.



Fuente: (García & Corzo, 2008)

Esta técnica se desarrolló en Europa como una alternativa de los humedales horizontales para la producción de efluentes nitrificados. Por lo general los sistemas verticales se combinan con los horizontales para que los procesos de nitrificación y desnitrificación ocurran. La circulación del agua es de tipo vertical por gravedad y tiene lugar a pulsos de forma que los sistemas no están constantemente inundados. La profundidad oscila entre los 0.5 y 0.8 m y operan con cargas de  $20\text{g DBO}_5/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ .

Los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento en comparación que los horizontales, requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica, pero tienden a ser susceptibles a la colmatación (García & Corzo, 2008).

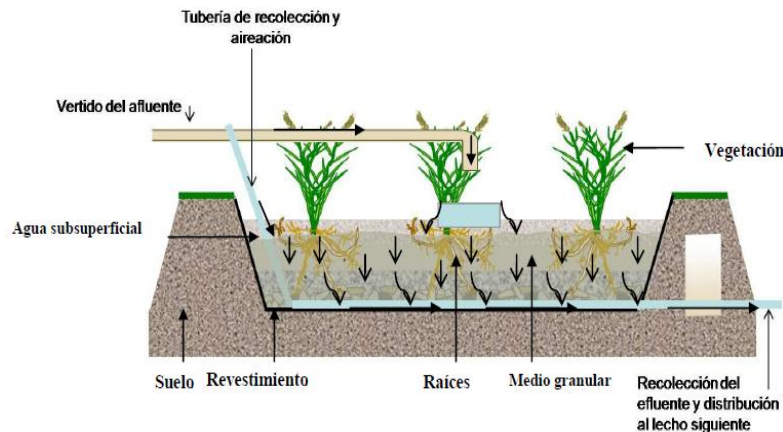
Los humedales verticales cuentan con elementos similares a los de flujo horizontal:

1. Estructuras de entrada del efluente
2. Impermeabilización
3. Medio granular
4. Vegetación



5. Estructura granular
6. Vegetación
7. Estructura de salida.

Figura 7. Esquema de elementos constitutivos de humedales artificiales subsuperficiales con plantas emergentes de flujo vertical.



Fuente: (García & Corzo, 2008)

### Medio granular

El medio granular debe ser limpio, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. En los humedales verticales el medio granular es de tipo heterogéneo, debido a que se cuenta con 3 capas horizontales con material de distinto diámetro, tenemos una capa superficial de arena gruesa, intermedia de grava y de fondo grava gruesa; todo esto se dispone de forma que el paso del agua por el lecho no sea excesivamente rápido o lento (García & Corzo, 2008).

### Tubería de aireación

Dichas tuberías tienen como función airear el lecho de manera que mejora y favorece los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación. Se recomienda la instalación de 1 tubería por cada metro cuadrado.

### 2.3.5 Ventajas y desventajas

La colmatación en los sistemas de flujo vertical hay que vigilarlo, ya que operan con altas cargas contaminantes, por lo que suelen tener mucha pérdida de carga con lo que frecuentemente requieren bombeos (García & Corzo, 2008).



El tratamiento de las aguas residuales por medio de humedales se ha empleado por más de 30 años, las ventajas en comparación a sistemas convencionales radica en sus bajos costos de operación y construcción, mantenimiento fácil, alta capacidad de remoción de contaminantes como: materia orgánica, nitrógeno, fósforo y microorganismos patógenos versatilidad y rentabilidad económica y por lo cual se ha empleado en la depuración de aguas agroindustriales y de algunos sectores específicos (Rodríguez & Durán, 2006).

Los humedales se acerca a lo que pasa en la naturaleza por lo que son denominados eco tecnologías, debido a que aprovecha los componentes del medio ambiente para depurar los componentes como suelo, aire, plantas y microorganismos para degradar contaminantes que se encuentran en las aguas residuales.

Una de las desventajas que presentan es la alta producción de la vegetación en estos humedales da como resultado la liberación de grandes cantidades de carbono al sistema cuando se degrada, por lo que es recomendable la cosecha de la vegetación, (Álvarez & Bécares, 2008). Otra de las desventajas de los sistemas de los humedales de Flujo Subsuperficial es la falta de experiencias en países con clima tropical.

El sustrato debe remplazarse cada 10 -15 años, debido a la obstrucción por lodos y residuos (Hidalgo et al., 2005).

### 2.3.6 Mecanismos de Depuración

Existen cuatro factores en combinación básicos:

- microorganismos depuradores,
- medio inerte de soporte o medio filtrante,
- tiempo de residencia hidráulica o tiempo de retención
- tipo de agua residual, el mismo que sirven como parámetros para el diseño de los humedales.

En los humedales de flujo subsuperficial la remoción de  $\text{DBO}_5$  ocurre por la deposición y filtración de materia orgánica sedimentable en los primeros





centímetros de lecho de grava, además es ahí donde ocurren procesos posteriores de descomposición microbiológica. La  $\text{DBO}_5$  remanente y que se encuentra en forma coloidal y disuelta entra en contacto con la película biológica que se encuentra adherida al lecho filtrante-rizoma; en esta etapa actúan los mecanismo de transferencia de masa, transporte de materiales entre la fase líquida y sólida y la acción enzimática heterotrófica (Peña et al., 2011).

Una relación constante de primer orden (KT) basada en la temperatura y la tasa de reacción a  $20^\circ\text{C}$ , la cual está relacionada con la porosidad del medio y con una tasa de reacción óptima para un medio con la zona radicular completamente desarrollada; aunque la porosidad del medio es difícil determinar debido a que decrece con el tiempo y varía espacialmente con la densidad de las raíces y el taponamiento propio del sistema; se debe tener precauciones en las estimaciones del valor de KT, ya que con ecuaciones más elaboradas se puede obtener una falsa precisión (Peña et al., 2011).

El material del vegetal muerto se acumula en la superficie del lecho filtrante, algunos nutrientes, metales u otros elementos captados por la planta son reciclados nuevamente dentro del sistema (Llagas & Guadalupe, 2006).

El oxígeno transportado por las macrófitas puede ser utilizado por los microorganismos que crecen sobre ellos en forma de biopelícula, en las biopelícula más próximas a los rizomas se dan procesos aerobios, mientras que en las más alejadas, al no difundirse el oxígeno, se dan procesos anaerobios, es así que se da la nitrificación y desnitrificación.

La capacidad de transferencia de oxígeno por las macrófitas se estima  $0\text{-}3 \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{día}$ , lo que equivale  $30\text{kg DBO}_5/\text{ha}/\text{día}$ , muy bajo para las cargas usuales del agua residual. En el interior de los humedales se da una transferencia de oxígeno entre la atmósfera en valores de  $0\text{-}0,5 \text{ g O}_2/\text{m}^2.\text{día}$ , por lo que en los humedales de flujo subsuperficial se dan condiciones fuertemente reductoras.

Las macrófitas asimilan macronutrientes (N y P) y micronutrientes, incluidos metales pesados, en unas tasas calculadas en  $12 \text{ g N}/\text{m}^2.\text{año}$  y  $1,8\text{-}18 \text{ g P}/\text{m}^2/\text{año}$ , muy bajas en comparación con las aguas residuales.



A todo esto se adiciona el efecto termorregulador de las macrófitas sobre el sistema, esto disminuye la insolación en verano y actúa como aislante en invierno, lo cual resulta positivo para los procesos biológicos. La calidad estética que aportan a las instalaciones es de gran valor para su uso en humedales.

El sedimento orgánico es un elemento fundamental en el proceso de depuración por humedales, este sirve de sustrato para el crecimiento de multitud de microorganismos, incluyendo los responsables de la nitrificación y desnitrificación; presenta además una elevada capacidad de cambio, juega un papel importante en la dinámica del fósforo, cuyo principal mecanismo de eliminación es la asimilación por los seres vivos, su adsorción a las arcillas y la precipitación y formación de complejos de Al, Fe y Ca presentes en los sedimentos.

#### 2.3.6.1 Eliminación de $DBO_5$

La eliminación de la  $DBO_5$  ocurre rápidamente por sedimentación y filtración de partículas en los espacios entre la grava y raíces, esta es eliminada por los microorganismos que crecen en la superficie de la grava, raíces y rizomas de las macrófitas.

La materia orgánica es degradada de forma aerobia en micro sitios de la superficie de las raíces de las plantas, pero en el resto de lecho sumergido ocurre de forma anaerobia: fermentación mecánica y sulfato de reducción.

La temperatura tiene una influencia muy fuerte, por lo que se observan variaciones estacionales en la  $DBO_5$  del efluente. Se puede obtener una  $DBO_5$  por debajo de 25 mg/l, aunque no es posible bajar de una  $DBO_5$  de 7-10 mg/l, que parece proceder de residuos orgánicos del propio sistema y no del agua residual original.

#### 2.3.6.2 Eliminación de Materia en Suspensión

En los humedales de flujo subsuperficial los mecanismos de eliminación son diversos, la materia en suspensión queda retenida en los humedales mediante



la combinación de diferentes fenómenos de tipos físico, es decir, se filtra en el medio granular.

La sedimentación se realiza a causa de la baja velocidad de circulación de agua y el tamizado que se da en los espacios intersticiales del medio granular.

Todos estos fenómenos son potenciados por las fuerzas de adhesión que se dan entre los sólidos para formar partículas más grandes (García & Corzo, 2008).

En los humedales horizontales la eliminación de la materia en suspensión sucede en su mayor parte en la zona de entrada lo que permite la mengua de la concentración a lo largo del lecho; es en  $1/4 - 1/3$  de la longitud del sistema que permite la eliminación total de la materia en suspensión.

En los humedales de flujo vertical la materia orgánica queda retenida en los primeros centímetros del medio granular. A medida que el agua recorre los horizontes del filtro se disminuye la concentración de los contaminantes.

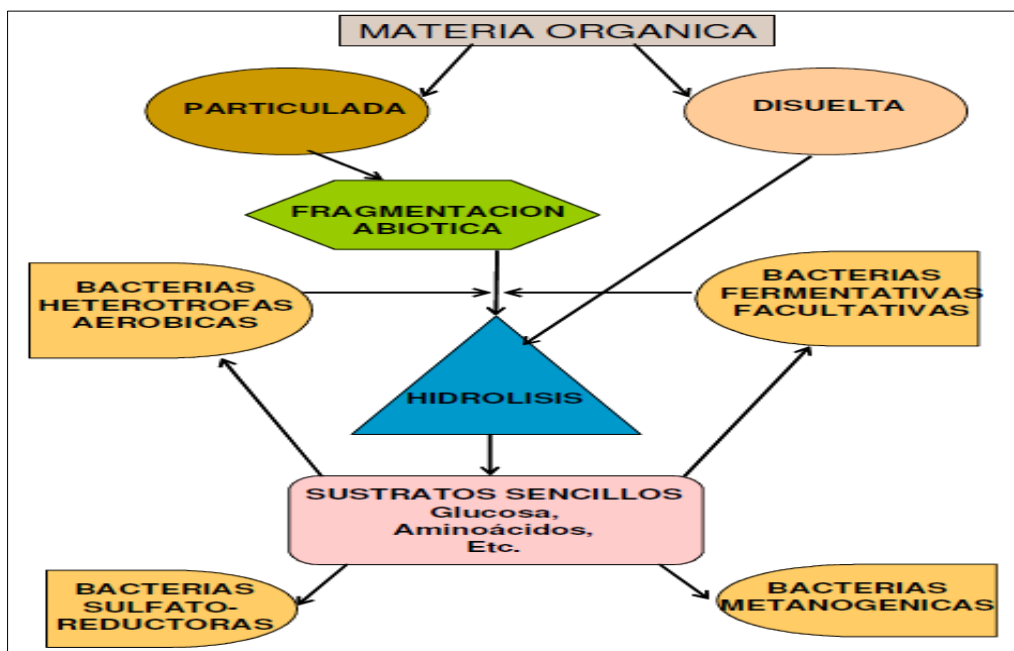
Tanto el sistemas de flujo horizontal y vertical el rendimiento de eliminación de la materia orgánica en suspensión suele ser de más del 90% lo que conlleva a la producción de efluentes con concentraciones menores de 20 mg/l de materia en suspensión.

#### 2.3.6.3 Eliminación Materia Orgánica

La eliminación de la materia orgánica es compleja debido a que interaccionan varios procesos físicos, químicos y bióticos que suceden de forma simultánea.

La materia orgánica articulada es retenida por filtración cerca de la entrada en el caso de los sistemas horizontales y en caso de los sistemas verticales en los primeros centímetros de los horizontes del lecho filtrante.

Figura 8. Diagrama de procesos que intervienen en la biodegradación de materia orgánica en los humedales artificiales.



Fuente: (García & Corzo, 2008).

Por fragmentación abiótica, la materia orgánica se convierte en partículas más pequeñas que pueden ser fácilmente hidrolizadas por enzimas extracelulares; dichas enzimas son producidas por bacterias heterótrofas aeróbicas y fermentativas facultativas. Como resultado de esta hidrólisis es la formación de sustratos sencillos tales como glucosa y aminoácidos que son asimilados por bacterias sulfatoredutoras, metanogénicas y bacterias heterótrofas aeróbicas. En el caso de los sustratos sencillos son asimilados directamente sin necesidad de hidrólisis.

Muchas de las sustancias disueltas se retienen por adsorción, ya sea en la materia orgánica o en el medio granular. Estas sustancias pueden simplemente quedar allí, o bien desplazarse y ser readsorbidas o degradadas por microorganismos.

En los humedales de flujo horizontal la degradación de materia por vía aeróbica se da en la superficie de agua, a 0.05 m de profundidad y en las zonas cercanas a las raíces.

El oxígeno que es liberado por las raíces no es suficiente para degradar completamente de forma aeróbica, en los sistemas horizontales la vía aeróbica



no es muy importante como la anaeróbica, es decir en los sistemas horizontales la degradación aeróbica es poco importante con respecto a la vía anaeróbica.

Las bacterias heterótrofas aerobias en ausencia de oxígeno pueden degradar la materia orgánica por vía anaerobia, opera en flujo horizontal debido a que en muchos se han observado eliminación de amoníaco y ausencia de nitrato, lo que indica que el nitrato formado se elimina rápidamente por desnitrificación; esto se debe a que en la profundidad del lecho hay condiciones aeróbicas que impiden la desnitrificación.

En humedales horizontales hay pocos lugares con condiciones aeróbicas por lo que una parte importante del lecho son las bacterias fermentativas facultativas que crecen originando ácidos grasos como el acético y el láctico, alcoholes como el etanol y gases como el  $H_2$ , estos compuestos representan sustratos para las bacterias sulfatoreductoras y metanogénicas, todas ellas anaeróbicas. Para las heterótrofas aeróbicas en el caso de que dichos sustratos estén disponibles en zonas aeróbicas (García & Corzo, 2008).

La sulfato reducción se presenta como un medio importante de degradación de la materia orgánica en sistemas horizontales, en los humedales las bacterias sulfatoreductoras y las metanogénicas pueden competir por el sustrato, y en presencia de sulfato y alta carga orgánica las bacterias sulfato reductoras crecen con más éxito. A medida que ganan importancia las vías anaeróbicas en detrimento de las anóxicas y anaerobias la eficiencia disminuye por lo que los humedales verticales alcanzan mejores rendimientos de eliminación debido a que predominan las vías aeróbicas (García & Corzo, 2008).

La eliminación de la materia orgánica en humedales horizontales y verticales es óptima si cuentan con buenos parámetros de diseño y construcción. Es así que para valores de DBO y DQO se alcanza rendimientos entre 75 y 95% produciendo efluentes con concentración de DQO menos de 60 mg/l y de DBO menor de 20 mg/l (García & Corzo, 2008).



#### 2.3.6.4 Eliminación de Nitrógeno

El nitrógeno posee un complejo ciclo bioquímico con varias transformaciones bióticas y abióticas teniendo 7 estados de valencia (+5 a -3). Los compuestos incluyen una variedad de formas orgánica e inorgánicas, que son esenciales para la toda la biota. La forma inorgánica más importante en los humedales es el amonio (Vymazal, 2007).

El nitrógeno se encuentra sometido a transformaciones de compuestos orgánicos a inorgánicos y viceversa, algunos de estos proceso requiere energía y otros liberan energía, que son usados por organismos para crecer y sobrevivir. Todas estas transformaciones son necesarias para el desempeño de los humedales, la mayoría de las transformaciones químicas son controladas por la producción de enzimas y catalizadores que son usados por organismos para su beneficio (Vymazal, 2007).

En las aguas residuales urbanas, el nitrógeno se encuentra en forma de amonio y también como nitrógeno orgánico, no es muy común encontrar concentraciones significativas de nitritos y nitratos.

El principal mecanismo de eliminación de nitrógeno es de tipo microbiano que consiste en la nitrificación seguida de desnitrificación. Hay otros procesos que contribuyen a la eliminación tales como adsorción del amonio y la asimilación realizada por las plantas, dado así el ciclo del nitrógeno esta acoplado al ciclo del carbono (materia orgánica) en especial por la desnitrificación. Las bacterias autótrofas aeróbicas realizan la nitrificación, estas aprovechan el amonio y lo convierten en nitrato. La nitrificación requiere 4,6 mg de oxígeno por cada 1 mg de amonio (García & Corzo, 2008).

En los humedales horizontales debido a que la transferencia de oxígeno es baja y hay pocas zonas aeróbicas, la nitrificación no es destacable y el rendimiento de eliminación no supera el 30%. En estos los procesos de nitrificación y desnitrificaron suceden de forma acoplada, de manera que el nitrato formado es rápidamente aprovechado, generándose nitrógeno gas.



La desnitrificación permite eliminar el nitrato formado por la nitrificación y convertirlo en gas, esta reacción ocurre en condiciones anaerobias y en presencia de materia orgánica debido a que es realizada por bacterias heterotróficas. El nitrógeno asimilado es incorporado a la biomasa u eliminado al agua. Al morir las partes aéreas de las plantas, el nitrógeno podría reincorporarse al humedal, por lo que se recomienda podar la vegetación antes del periodo de senescencia, el valor de eliminación de nitrógeno están en un 10 – 20% de las aguas urbanas. Otras vías de eliminación del nitrógeno son la volatilización del amonio y la asimilación microbiana (García & Corzo, 2008).

En humedales verticales se tiene buenos rendimientos de conversión del amonio a nitrato dado el carácter aeróbico de la gran parte del lecho, por lo que la nitrificación es total. Los humedales verticales tienen dificultades para eliminar el nitrato formado y frecuentemente se combinan en serie seguidos de humedales horizontales (García & Corzo, 2008).

#### 2.3.6.5 Eliminación de Fósforo

El fósforo en los humedales se presenta como fosfato en compuestos orgánicos e inorgánicos. El ortofosfato libre es la única forma de fósforo que es utilizado por algas y macrófitas y este representa el mayor enlace entre el fósforo orgánico e inorgánico que circula en los humedales. Otro grupo de fósforo inorgánico son los polifosfatos lineales condensado (Vymazal, 2007).

La eliminación del fósforo es complicada, por lo general se elimina el 10-20% sin diferencias entre humedales verticales y horizontales.

Los mecanismo de eliminación de este elemento puede ser de tipo biótico o abiótico; los abióticos lo componen específicamente el medio granular, se ha visto en estudios que luego del inicio del funcionamiento de los humedales se obtiene una buena eficiencia, para reducirse rápidamente en poco tiempo; esto es debido a que el medio granular limpio poseen una capacidad de adsorción, pero se pierde rápidamente.

Por lo que para aumentar la eliminación del fósforo se utilizan procesos de precipitación con adición de sales, hay que tener en cuenta que la adición de



sales de hierro se da la formación de sulfuro de hierro que le da color negro al agua.

#### 2.3.6.6 Eliminación de Patógenos

La eliminación de organismos patógenos en los humedales tanto verticales como horizontales depende de factores como filtración, adsorción, depredación, tiempo de permanencia y medio granular. Cuanto menos es el diámetro del medio granular, mayor es el nivel de eliminación obtenido. Se suele utilizar organismos indicadores de contaminación fecal tales como coliformes fecales; el grado de eliminación obtenido en humedales horizontales es similar a los obtenidos en los verticales, los mismos que oscilan entre 1-2 Unidades Logarítmicas/100 ml, pero estos valores no son aptas para el riego agrícola por lo que se recomienda dotar al sistema de humedales de lagunas o humedales de flujo superficial que favorece la desinfección. También se puede clorar el efluente (García & Corzo, 2008).

#### 2.3.6.7 Eliminación de Metales Pesados

Los metales pesados como cadmio, mercurio, plomo, zinc, cobre, cromo, selenio presentes en aguas residuales provenientes de fuentes industriales especialmente, en los humedales artificiales son eliminados mediante diferentes procesos (Alianza por el Agua, 2008):

- Adsorción
- Precipitación química
- Sedimentación
- Asimilación de las plantas.

Existe la posibilidad de que los metales retenidos puedan liberarse en determinadas épocas del año. Esto es posible debido a los procesos de óxido-reducción que ocurren dentro del sistema.

#### 2.3.7 Tipos de Vegetación

Las plantas que crecen en humedales son usualmente llamados macrófitas, esto incluye plantas vasculares acuáticas (angiospermas y helechos), musgos acuáticos y algunas algas grandes (Brix, 1997).





La presencia o ausencia de las plantas define el término humedal, de lo que determinamos que las macrófitas son componentes indispensables en estos sistemas debido a que la mayor capacidad de remoción de contaminantes en los humedales se basa en procesos físicos y microbianos.

El rol de estas macrófitas ha sido cuestionado, pero la importante función que desempeñan las macrófitas son los efectos físicos del crecimiento de las plantas, las macrófitas estabilizan la superficie del lecho filtrante, proporcionan buenas condiciones para la filtración física, previene en el sistema de flujo vertical de atascamientos, protege al sistema de la insolación en el verano y en el invierno de las bajas temperaturas.

Pero a pesar de que las plantas emergentes son el componente principal de los ecosistemas de los humedales, el tratamiento de las aguas residuales es completado por una combinación integral entre las plantas, el sustrato y la comunidad microbiana inherente (Vymazal, 2002).

Dado así los efectos físicos constan: distribuye y reduce la velocidad del flujo del agua, crea mejores condiciones para la sedimentación de sólidos, reduce el riesgo de erosión y resuspensión e incrementa el tiempo de contacto entre el agua y las áreas superficiales de la planta. Las macrófitas son además importantes por estabilizar el suelo superficial, como su denso sistema de raíces impide la erosión de los cauces (Brix, 1997).

Las especies vegetales a utilizarse suelen ser de diferentes especies y hábitos de enraizamiento y entre sus principales funciones se encuentra la absorción de nutrientes, la relación simbiótica que se establece con los microorganismos, el suministro de oxígeno y la filtración de partículas.

Las diferentes especies de plantas acuáticas que se utilicen son importantes, debido a que difieren en su capacidad de depuración del agua residual, en la remoción de nutrimentos específicos, de elementos traza y de compuestos potencialmente tóxicos como los metales pesados. Se hace énfasis de manera especial en la especie *Phragmites australis* o comúnmente conocida como carrizo, la misma que se ha implementado obteniendo muy buenos resultados (Romero et al., 2009).



La utilización de plantas en la depuración de aguas residuales ha demostrado ser un método efectivo en la remoción de una amplia gama de sustancias orgánicas tales como: nutrientes y metales pesados. Las plantas inyectan grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces, el oxígeno que no es aprovechado por la especie, es expelido y es aprovechado por los microorganismos (hongos y bacterias) (Hidalgo et al., 2005).

Un tipo de especial de macrófitas son los helófitos, plantas capaces de arraigar en suelos anegados o encharcados, con una parte sumergida y otra área emergente; los helófitos son capaces de transportar oxígeno desde los tallos y hojas a sus raíces y rizomas.

En el tratamiento de aguas residuales existe una posibilidad de alternativas pero con las condicionantes de la adaptabilidad a las condiciones ambientales de las especies vegetales a utilizar. En el caso de las macrófitas emergentes ha demostrado buena capacidad de adaptación y resistencia a condiciones ambientales adversas (Arias & Brix, 2011).

La vegetación del humedal crece y se desarrolla durante la primavera y verano, pero en las épocas de otoño empieza a decaer y se va degradando durante el resto del año, lo que representan un aporte extra de materia orgánica, de manera que la fase de cosecha es aun objeto de debate (Álvarez & Bécares, 2008).

En un sistema de flujo vertical la presencia de macrófitas con un régimen intermitente de carga, ayuda a prevenir el taponamiento en la mitad de lecho filtrante (Brix, 1997).

#### 2.3.7.1 Carrizo

*Phragmites australis* o comúnmente conocido como carrizo, es una planta perenne, con un rizoma rastrero con capacidad para crecer en la superficie buscando agua. Esta caña común forma grandes camas en aguas poco profundas; posee tallos huecos, flexibles y leñosos que normalmente crecen hasta 2 m de altura, pero puede llegar a 4m, de crecimiento rápido, vía rizomas; se extienden lateralmente y forman una capa muy densa en un año.

Las hojas anchas asperosas y planas se estrechan en un punto, y se unen al tallo por vainas lisas, las hojas apuntan en una dirección en el viento. Las flores nacen en altamente ramificadas inflorescencias de color púrpura, que miden de 20 a 60 cm de longitud. Habita en suelos húmedos y orillas de cursos de agua y lagunas. En ríos se encuentran fundamentalmente en los tramos más bajos, en los que la velocidad del curso de agua les permite enraizar.

**Fotografía 1. Izquierda: Ambiente de desarrollo de carrizo. Derecha: carrizo en su hábitat.**



Foto: Autoras

Puede soportar bastante bien niveles moderados de salinidad en el agua y en el suelo, necesitando suelos encharcados hasta profundidades de 5 cm, por lo que es posible encontrarlo en las proximidades de pantanos y zonas más salobres.

### 2.3.7.2 Papiro

*Cyperus papyrus L.*, es una planta originaria de Egipto que crece en las orillas del río Nilo y su delta, y servía para elaborar los antiguos papiros manuscritos. El *Cyperus papyrus L.*, es una herbácea acuática perenne, monocotiledónea, cespitosa, con rizomas horizontales cortos y gruesos y un extenso aparato radical; presenta tallos (cañas) en secciones más bien triangulares, erectos, altos 2-5 m y anchos en la base hasta cerca 6 cm, lisos llenos de un tejido esponjoso (parénquima) en donde están presentes grandes espacios intercelulares que facilitan la circulación del aire, con el fin de llevar el oxígeno

hacia las partes sumergidas. Sus hojas son de color verde jade, largas, delgadas, firmes, con espigas marrones, de diez a treinta cm de largo y sus hojas dispuestas en estrella. Tiene una gran inflorescencia liviana y plumosa en abanico y, curiosamente, los nuevos brotes surgen siempre del mismo segmento. El papiro se multiplica principalmente a través de sus rizomas, de las que brotan nuevos troncos a intervalos regulares. Produce también semillas que pueden ser transportadas por el viento. Tolera temperaturas de 20 a 33 °C, y pH entre 6 y 8,5.

**Fotografía 2. Hoja de Papiro dispuesto en forma de estrella.**



Foto: Autoras

**Fotografía 3. Papiro desarrollándose en su hábitat natural.**



Foto: Autoras

En las riberas cubiertas de papiros, sólo los animales grandes y pesados pueden abrirse camino, como elefantes o hipopótamos, y los demás seres utilizan estas vías para transitar. Crece sobre terrenos arenosos y colmados de humedad, con abundante insolación durante todo el año, pudiendo tener el pie de su tronco totalmente sumergido en el agua.

**2.3.7.3 Plantación**

Se obtienen buenos resultados con plantaciones monoespecíficas de carrizo (*Phragmites australis*), espadaña (*Typha latifolia* o *T. angustifolia*) o juncos (*Scirpus lacustris*). No es necesario utilizar especies diferentes en una misma instalación ya que la eficiencia del sistema no se ve afectada. En Europa la especie más utilizada es el carrizo, con densidad de plantación de 3 ejemplares por m<sup>2</sup>. Se pueden utilizarse plántulas que han sido previamente cultivadas en vivero o bien de rizomas que se obtienen de otros sistemas de humedales contruidos o de humedales naturales.

Al inicio de un proyecto se suele desconfiar del crecimiento de las especies plantadas, pero si las plántulas cuentan con agua y luz su crecimiento es rápido y dar buenos resultados. Hay que vigilar la luz debido a que suelen ser plantas que requieren de un alto grado de insolación.





La salinidad extrema puede afectar al crecimiento, pero en general las especies son tolerantes a la salinidad.

#### 2.3.7.4 Cosecha de vegetación

La fase de cosecha en los humedales es un proceso que depende de muchos factores tales como: clima, tipo de especies y características del agua residual. Se determina que el cosechado no influye sobre la eliminación de nutrientes y no es una práctica recomendada, debido a que la cantidad de nutrientes eliminados por la actividad de cosecha es insignificante respecto a los de aporte.

La cosecha de la vegetación tiene un efecto significativo sobre el pH, el oxígeno disuelto y la temperatura debido que la ausencia del mismo favorece la fotosíntesis algar y disminuye la inercia térmica, aunque la ausencia en materia orgánica y la liberación de materia orgánica reduce el aporte de sólidos suspendidos totales (SST) y DBO del afluente 45.4% y 50.7% respectivamente.

Cabe recalcar que la fase de cosecha es una estrategia de explotación adecuada en las condiciones climatológicas del estudio, sin embargo su aplicación real debe compensarse en función de la dilución del agua de entrada (Álvarez & Bécares, 2008).

Las épocas de cosecha ideal se recomienda podar la vegetación antes del periodo de senescencia de la vegetación, hay que recalcar que el nitrógeno juega un papel importante en el periodo de poda o cosecha debido a que en el periodo de senescencia el nitrógeno puede retornar al humedal (García & Corzo, 2008).

A esto se adiciona además que el cosechado o poda se debe realizar una vez al año para evitar la acumulación de materia muerta en los humedales, además con este practica se realiza la limpieza de los lechos y la revisión de los sistemas de alimentación-distribución (Alianza por el Agua, 2008).

En el caso del carrizo según su periodo la poda o cosecha se realizará una vez al año (Viteri, 2014).



Una de las desventajas de la fase de cosecha es el costo de mantenimiento, la reducción de nichos para ciertas especies, el efecto de la resuspensión del sedimento durante el cosechado, y la desprotección del sistema frente a bajas temperaturas, pero hay que recalcar que una de las ventajas es que ayuda a mantener la conductividad hidráulica y el control de biomasa para el control de mosquitos (Álvarez & Bécares, 2008).

La descomposición de las macrófitas es otro de los factores que fomenta la obstrucción del manto de grava en los humedales subsuperficiales, e incrementa la capa de sedimento en los humedales de flujo superficial.



## CAPITULO III

### DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

En el caso de nuestro proyecto debido a los factores como espacio físico, especies vegetales, factor económico entre otros, se eligió el tipo Humedales artificiales subsuperficial de flujo vertical debido a diferentes experiencias exitosas en el uso de este modelo. Los humedales de flujo vertical (HFV) son más adecuados que los de flujo horizontal (HFH) cuando hay una restricción de espacio, ya que tienen una mayor eficiencia de tratamiento. Razón por la cual a continuación se presenta el diseño del humedal piloto que se implementó.

El diseño de este tipo de humedales está basado en superficies unitarias, es decir, en función de la población equivalente.

En el diseño se debe considerar la construcción de dos humedales que operen en paralelo para que el funcionamiento sea más óptimo. Se puede aplicar el caudal de forma intermitente, donde cada unidad tendrá un periodo de llenado y un periodo de vaciado, o su aplicación puede ser de manera continua.

#### 3.1 Dimensionamiento a Escala Real

Se debe tomar en cuenta las siguientes variables en el diseño de humedales de flujo vertical:

- Área superficial.
- Profundidad del humedal.
- Medio granular
- Tiempo de retención hidráulico.
- Pendiente.
- Relación largo-ancho.

##### 3.1.1 Área superficial

El área superficial para humedales verticales se puede calcular utilizando diferentes métodos:





### 3.1.1.1 Área superficial basadas en la población equivalente

La población equivalente se expresa como una relación entre la carga orgánica biodegradable y el valor de  $DBO_5$  (g/día. Hab) correspondiente a un habitante equivalente (García & Corzo, 2008), (Delgadillo et al, 2010).

$$carga\ orgánica\ (DBO_5) = Q * C_0$$

Donde:

$Q$  = Caudal promedio,  $m^3/d$  (d=día).

$C_0$  = Concentración inicial del contaminante ( $DBO_5$ ) o afluente, mg/l.

Para dimensionar estos sistemas se puede tomar un valor de  $2.5\ m^2/hab\text{-}eq$ . El valor de la  $DBO_5$  autores como Corzo & García (2008) recomiendan  $40\ g/día.hab\text{-}eq$ , mientras Delgadillo et al. (2010) recomiendan  $60\ g/día.hab\text{-}eq$ . Por lo tanto los valores se encuentran en un rango de 40 a 60.

$$Población\ equivalente = \frac{Q * C_0}{(40 - 60)\ DBO_5\ \frac{g}{día.hab}}$$

Una vez determinada la población se calcula el área superficial del humedal:

$$A_s = población\ eq * 2.5\ \frac{m^2}{hab - eq.}$$

### 3.1.1.2 Área superficial en base a la tasa hidráulica

$$A_s = \frac{Q}{THA}$$

Donde:

$Q$  = Caudal promedio,  $m^3/d$ .

$THA$  = Tasa de aplicación hidráulica, mm/dosis.

$$THA = \frac{THC}{F}$$



Donde:

$THC$  = Tasa de carga hidráulica, mm/día.

$F$  = Frecuencia de dosis, dosis/día.

La frecuencia de dosificación se encuentra en un rango de 4-24 veces/día, se recomienda una dosis de 12 veces/día (Delgadillo et al., 2010).

### 3.1.1.3 Área superficial basadas en ecuaciones

Para el cálculo del área también se puede utilizar expresiones basadas en investigaciones de diversos autores, una de ellas es la siguiente ecuación (ONU-HABITAT, 2008):

$$A_s = \frac{Q}{k_{DBO}} \ln \left[ \frac{C_0}{C_1} \right]$$

Donde:

$A_s$  = Área superficial, m<sup>2</sup>.

$Q$  = Caudal promedio, m<sup>3</sup>/d.

$C_0$  = Concentración inicial del contaminante o afluente, mg/l.

$C_1$  = Concentración final del contaminante o efluente, mg/l.

$k_{DBO}$  = Constante de velocidad, m/día.

$k_{DBO}$  se determina mediante la siguiente expresión:

$$k_{DBO} = K_T * d * n$$

Donde:

$K_T$  = Constante de temperatura, día<sup>-1</sup>.

$d$  = Profundidad del humedal, m.

$n$  = Porosidad del sustrato, %.

$$K_T = K_{20} * 1.06^{(T-20)}$$

Donde:

$K_{20}$  = Constante de temperatura a 20°C,  $1.1 \text{ d}^{-1}$ , para aguas residuales municipales.

$T$  = Temperatura de operación del sistema, °C.

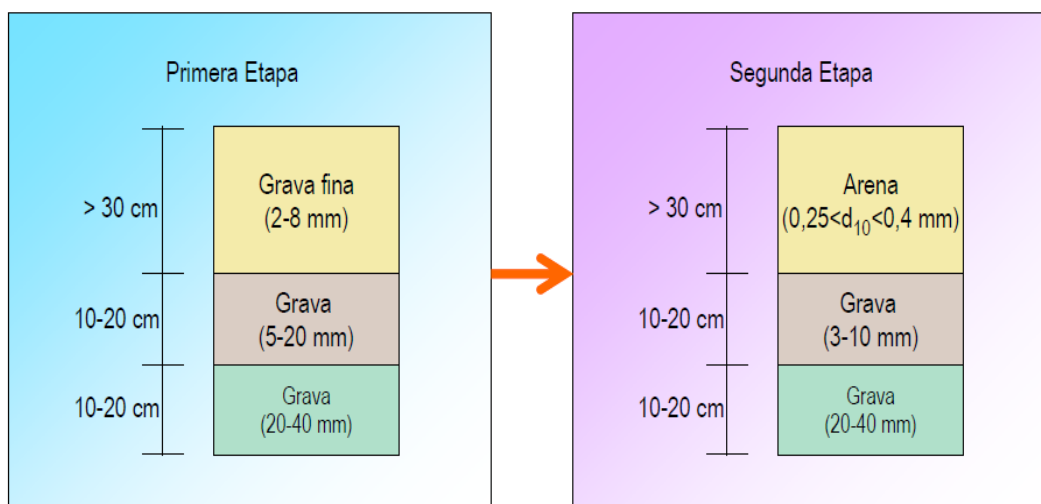
### 3.1.2 Profundidad

La profundidad para este tipo de humedales está comprendida entre 50 a 80cm (Delgadillo et al., 2010). Se recomienda una profundidad de 70 cm que favorece a una nitrificación correcta y la remoción de contaminantes orgánicos. La profundidad del humedal está en función del tamaño de las raíces de las plantas y el tiempo de retención hidráulico (TRH), (ONU-HABITAT, 2008). A esto se adiciona la zona de seguridad o resguardo que oscila entre 0.1m.

### 3.1.3 Medio granular

Las capas del medio granular se pueden disponer de la siguiente manera:

Figura 9. Capas del medio granular.



En el diseño y construcción de humedales se pueden utilizar los materiales granulométricos que se muestra en la Tabla 1.



Tabla 1. Conductividad hidráulica ( $K_s$ ) del tipo de material granulométrico a utilizar en los humedales artificiales de flujo subsuperficial.

<b>Tipo de material granulométrico</b>	<b>Tamaño efectivo <math>D_{10}</math> (mm)</b>	<b>Porosidad (%)</b>	<b>Conductividad hidráulica <math>K_s</math> (<math>m^3/m^2.d</math>)</b>
Arenas graduadas	2	28-32	100-1000
Arenas gravosas	8	30-35	500-5000
Gravas finas	16	35-38	1000-10000
Gravas medianas	32	36-40	10000-50000
Rocas pequeñas	128	38-45	50000-250000

Fuente: (García & Corzo, 2008)

### 3.1.4 Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de residencia hidráulica, es el tiempo que el agua permanece en el sistema de tratamiento, en el caso de una alimentación intermitente para los humedales de flujo vertical.

Para obtener el tiempo de retención se calcula el volumen necesario mediante la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{V}{h}$$

$$V = A_s * h$$

Donde:

$V$  = Volumen,  $m^3$ .

$h$  = Profundidad del humedal, m.

Al tener un caudal promedio y el volumen del sistema se procede a calcular el tiempo de retención hidráulico (días):

$$TRH = \frac{V}{Q}$$



Esta fórmula se aplica si la alimentación en el sistema va a ser de forma intermitente, en el que el tiempo de retención será superior a 3 días.

Mientras que si el sistema va a operar de forma continua, en donde el tiempo de retención será menor a un día. Para lo cual se puede utilizar las siguientes expresiones:

**a.**

$$TRH = \frac{n * A_s * h}{Q}$$

Donde:

$n$  = porosidad

$A_s$  = área superficial

$h$  = profundidad

$Q$  = caudal

**b.** El tiempo de retención hidráulico también se puede calcular en función a la carga contaminante.

A continuación se detalla la ecuación para una cinética de primer orden que se aplica para los humedales de flujo vertical que simulan un flujo pistón, donde los contaminantes se degradan, (García & Corzo, 2008):

$$\frac{dC}{dt} = -K_t C$$

Al integrar la ecuación entre la concentración inicial o del afluente  $C_0$  para  $t=0$  y la concentración final  $C_1$  para  $t=t$ , se obtiene el tiempo de retención hidráulico:

$$\frac{C_1}{C_0} = e^{-K_t * t}$$

$$t = THR = \frac{\ln \left[ \frac{C_0}{C_1} \right]}{K_t}$$



Donde:

$C_0$  = concentración inicial del contaminante o afluente mg/L.

$C_1$  = concentración final del contaminante o efluente mg/L.

$T$  = Tiempo de residencia o tiempo de retención (días)

$K_t$  = constante cinética de primer orden,  $d^{-1}$ . El signo negativo nos indica que la concentración del contaminante disminuye a través de tiempo.

Este modelo ha sido utilizado en el diseño de varias investigaciones y proyectos a escala piloto (Carpio, 2013).

### 3.1.5 Pendiente

La pendiente o gradiente hidráulico del humedal en la superficie debe ser plana (0%) para evitar encharcamientos, mientras que en el fondo se encuentra entre 0.5 a 2%, pero se recomienda una inclinación del 1% para facilitar una construcción y drenaje adecuado (Delgadillo et al, 2010).

### 3.1.6 Relación largo-ancho

En base al área determinada se calculan las dimensiones del humedal a escala real, la relación largo/ancho están entre 2:1 y 4:1, por lo que se recomienda 3:1 (García & Leal, 2006).

$$L = 3W$$

Donde:

$L$  = Longitud, m.

$W$  = Ancho, m.

$$A_s = L * W = 3W * W = 3W^2$$

$$W = \sqrt{\frac{A_s}{3}}$$



### 3.2 Dimensionamiento a Escala Piloto

Una vez determinada las dimensiones a escala real, se establece un factor de escalonamiento para mantener la relación de las medidas entre el humedal artificial a escala real y a escala piloto (García & Leal, 2006).

Caudal a escala piloto:

$$Q_{piloto} = Q_{real} - (Q_{real} * Factor\ de\ escala)$$

*Factor de escala*= expresada en %.

Área a escala piloto:

$$A_{piloto} = A_{real} - (A_{real} * Factor\ de\ escala)$$

Longitud a escala piloto:

$$L_{piloto} = L_{real} - (L_{real} * Factor\ de\ escala)$$

Ancho a escala piloto:

$$W_{piloto} = W_{real} - (W_{real} * Factor\ de\ escala)$$

En el caso de la profundidad, el tiempo de retención y la pendiente se utilizan las mismas ecuaciones del dimensionamiento a escala real.

### 3.3 Sistemas Híbridos

Consiste en un sistema con humedales verticales seguidos por humedales horizontales, en los verticales se logra la eliminación de DBO y la nitrificación, y en los humedales se logra la desnitrificación, aunque en los sistemas verticales también se puede lograr la desnitrificación si se recircula el agua.

Las dimensiones de estos suelos basarse en los valores de habitante equivalente hab-eq, por lo que se establece 2.5 m<sup>2</sup>/hab-eq.

### 3.4 Construcción

Un humedal se basa en una construcción rectangular impermeabilizada con material sintético (geomembrana) u otros sistemas que hagan impermeable al



humedal ( arcilla compactada), así se reduce el riesgo de contaminación del subsuelo y el manto freático. Luego se procede a colocar en la construcción capas de material de distinta granulometría, así se compone el medio filtrante y el soporte para la vegetación utilizada, dicho material lo constituye arena, grava.

El medio filtrante también sirve como hábitat y soporte para la diversidad de microorganismos que se desarrollan en el interior del sistema, su mantenimiento fácil o alta capacidad de remoción de contaminantes como: materia orgánica, nitrógeno, fósforo y microorganismos patógenos, permite que se ha empleado en la depuración de aguas agroindustriales y de algunos sectores específicos (Rodríguez & Durán, 2006).

### Sistemas de distribución y recogida

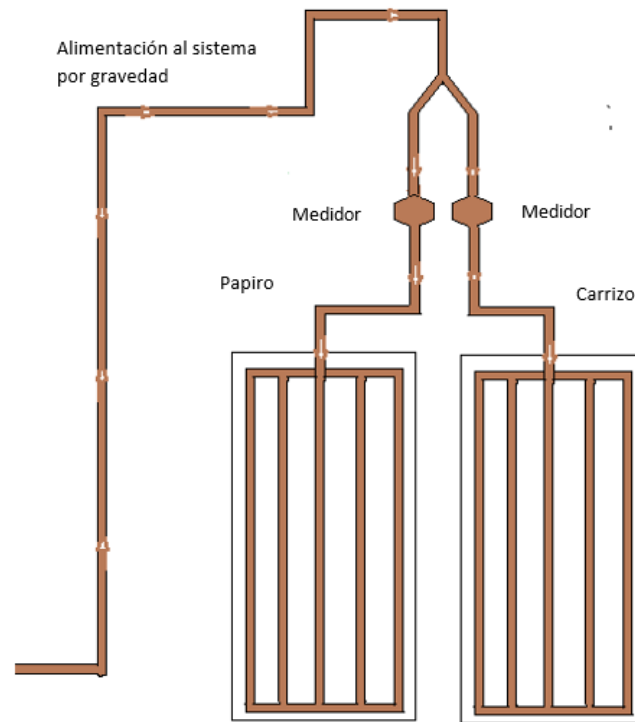
Para distribución de las aguas residuales en los humedales pilotos implementados se realizó una toma de agua en una tubería de  $\frac{3}{4}$ " a través del método de sifón y caída por gravedad distribuyéndose a los dos humedales, para distribución del caudal y medida del mismo se utiliza dos medidores de agua.

El sistema de vertido se basa en tuberías perforadas con disposición lineal o radial que tienen como objetivo distribuir homogéneamente el agua en toda la superficie del sistema.

Estas tuberías están asentadas sobre la superficie del medio granular. En climas fríos se suelen colocar las tuberías enterradas en el medio granular entre 0.05 y 0.1 m por debajo de la superficie con el fin de evitar la congelación.



Figura 10. Esquema general de ingreso de caudal al sistema piloto.



Elaboración: Autoras

El sistema de recolección consiste en una red de tuberías perforadas pero que están situadas en el fondo de cada una de las celdas. Las tuberías se cubren con una capa de gravas gruesas (2-20cm) que evita que el medio granular entre en las tuberías.

### Tubería de aireación

En el medio filtrante se insertan tuberías de manera vertical, que sirven como tubería de aireación para las capas más profundas, así se favorece los procesos de degradación aeróbica y nitrificación. Se recomienda la instalación de 1 tubería por cada  $m^2$ .

### 3.5 Funcionamiento

El funcionamiento el sistema vertical se basa en la alimentación durante 2 días y luego se da la fase de reacción durante 4 días en el cual se vacía el sistema. Aunque en nuevos sistemas verticales compactos no se opera en con la fase de reacción, de tal forma que el agua ingresa y sale de forma continua.

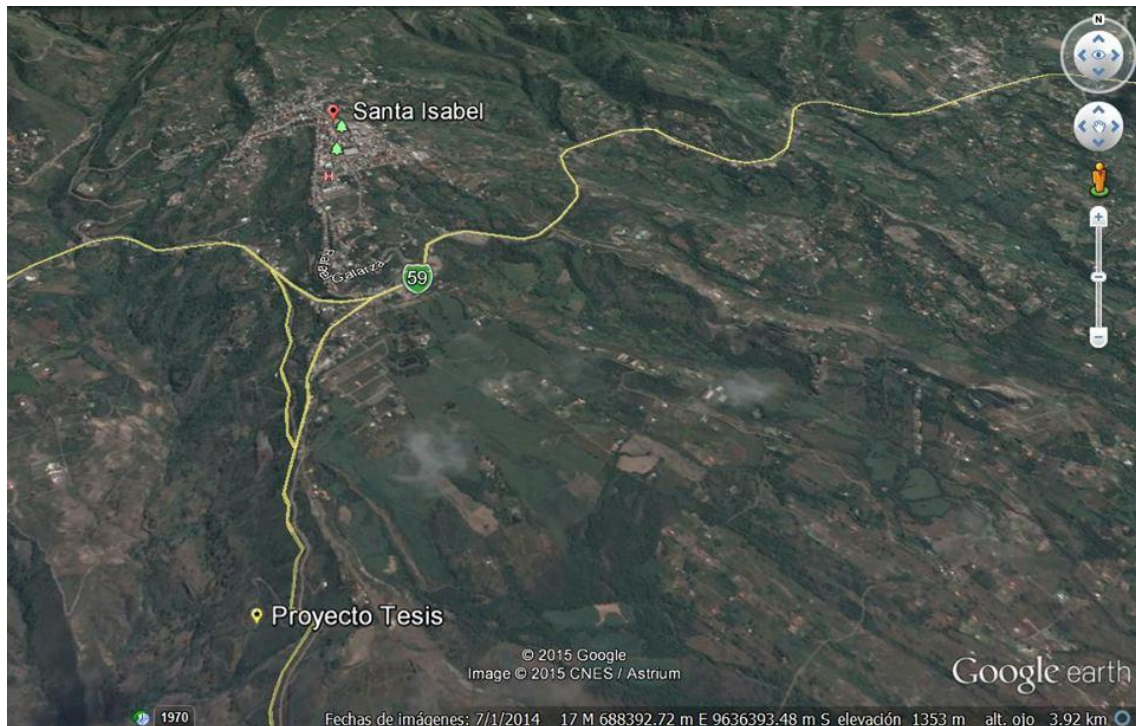
## CAPITULO IV

### IMPLEMENTACIÓN DE HUMEDALES PILOTO DE FLUJO VERTICAL

#### 4.1. Ubicación Geográfica del Proyecto

Los humedales experimentales se implementaron en los predios junto a la Planta de tratamiento de Aguas Residuales “El Guabo”, situada en la comunidad de Santa Ana de Lacay del cantón Santa Isabel, perteneciente a la provincia del Azuay. La planta se ubica en las siguientes coordenadas geográficas: Longitud 79.313732°O y Latitud 3.298460°S UTM, WGS84.

**Fotografía 4. Ubicación de la implementación de los humedales artificiales junto a la Planta de Tratamiento “El Guabo”**



Fuente: Google Earth

Elaboración: Autoras

En la cabecera cantonal existe dos tipos de tratamientos de aguas residuales: el primero, mediante fosas sépticas, la primera está ubicada en Rolando Sarmiento en el sector La Victoria y la segunda se encuentra en el Alto Cenepa en el sector Chirimoyapamba; el segundo, mediante el sistema de lagunaje PTAR “El Guabo”, la misma trata aguas residuales de la zona centro de la cabecera cantonal (véase Figura 10. Esquema PTAR El Guabo). El sistema de

lagunajes nos sirve como tratamiento primario, aplicando los humedales como tratamiento secundario. Se construyeron dos unidades experimentales una para cada especie (papiro y carrizo). El caudal del ingreso se tomó de la salida de la tercera laguna (véase Figura 8. Esquema general de ingreso de caudal al sistema piloto).

**Fotografía 5. Sistema de Tratamiento “El Guabo”**



Foto: Autoras

## 4.2 Diseño de Humedales Artificiales

### 4.2.1 Diseño a escala real.

Los cálculos del diseño se obtienen en base a las fórmulas del capítulo 3.

#### Cálculo de caudal

El cálculo del caudal se realizó mediante el método volumétrico, el mismo que consiste en medir el tiempo que tarda en llenarse un recipiente de volumen conocido. En este caso se utilizó un recipiente de 15 litros.

Luego se calcula el caudal mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{T}$$

Tabla 2. Valores de caudal tomados por el método volumétrico.

#	Día 1		Día 2	
	T(s)	Q (l/s)	T(s)	Q (l/s)
t1	10	1.5	4.61	3.25
t2	9	1.667	3.37	4.45
t3	8	1.875	4.14	3.62
t4	7	2.143	2.95	5.08
t5	6	2.5	3.09	4.85
t6	6	2.5	3.55	4.23
t7	6	2.5	4.51	3.33
t8	7	2.143	3.66	4.10
t9	7	2.143	2.39	6.28
t10	9	1.667	4.29	3.50
t11	6	2.5	3.41	4.40
t12	10	1.5	3.9	3.85
t13	6	2.5	3.69	4.07
t14	8	1.875	3.26	4.60
t15	7	2.143	3.62	4.14
t16	7	2.143	4.54	3.30
t17	6	2.5	3.19	4.70
t18	7	2.143	3.46	4.34
t19	6	2.5	3.59	4.18
t20	8	1.875	2.82	5.32
t21	7	2.143	2.68	5.60
Q <sub>1</sub> promedio (l/s)		2.12	Q <sub>2p</sub> (l/s)	4.34
Q <sub>1</sub> promedio (m <sup>3</sup> /d)		182.91	Q <sub>2</sub> p (m <sup>3</sup> /d)	375.14
Q <sub>Total</sub> promedio (m <sup>3</sup> /d)				279.03

Elaboración: Autoras

Fotografía 6. Tercera laguna de tratamiento



Foto: Autoras

Fotografía 7. Medición de caudal en la tercera laguna.



Foto: Autoras



## Área superficial

El cálculo del área se realiza con dos de los tres métodos citados.

### 1. Cálculo del área superficial basadas en la población equivalente:

$$Población\ equivalente = \frac{Q * C_0}{40 - 60DBO_5 \frac{g}{dia.hab}}$$

En este caso utilizaremos los siguientes datos:

$$\text{Valor promedio: } 50 \frac{g}{dia.hab} DBO_5$$

Se toma la concentración de la DBO de las tablas de valores típicos de materia orgánica en desechos domésticos:

$$C_0: 100 \frac{mg}{l}$$

$$Q: 279.03 \frac{m^3}{d}$$

$$Población\ equivalente = \frac{Q * C_0}{(40\ a\ 60) * DBO_5 \frac{g}{dia.hab}}$$

$$Población\ equivalente = \frac{279.03 \frac{m^3}{d} * 100 \frac{mg}{l}}{50 \frac{g}{dia.hab} DBO_5} = 558\ hab$$

$$A_s = población\ eq * 2.5 \frac{m^2}{hab - eq.}$$

$$A_s = 558\ hab * 2.5 \frac{m^2}{hab - eq.}$$

$$A_s = 1395.1m^2$$



## 2. Cálculo de área superficial basadas en ecuaciones:

Tabla 3. Datos para el cálculo de área superficial.

Datos		
Q	279.03	m <sup>3</sup> /d
Co	100	mg/l
C1	25	mg/l
T	23.1	°C
K <sub>20</sub>	1.1	día <sup>-1</sup>

Elaboración: Autoras

C1: valor obtenido suponiendo que el humedal trabaja con una eficiencia del 75%.

T: valor tomado del agua residual de la planta de tratamiento.

$$A_s = \frac{Q}{k_{DBO}} \ln \left[ \frac{C_0}{C_1} \right]$$

$$K_T = K_{20} * 1.06^{(T-20)}$$

$$K_T = 1.1d^{-1} * 1.06^{(23.1-20)} = 1.31d^{-1}$$

$$k_{DBO} = K_T * d * n$$

$$n = \frac{(30 * 0.1) + (32.5 * 0.3) + (36.5 * 0.075) + (38 * 0.075) + (41.5 * 0.1)}{0.65 * 100}$$

$$n = 0.346$$

$$k_{DBO} = 1.31d^{-1} * 0.65m * 0.346 = 0.294 \frac{m}{d}$$

$$A_s = \frac{279.03 \frac{m^3}{d}}{0.294 \frac{m}{d}} \ln \left[ \frac{100}{25} \right]$$

$$A_s = 1313.07m^2$$

El área calculada por los dos métodos se asemeja.



## Profundidad

Para los humedales se estableció una profundidad de 75 cm. Del total de la profundidad, 10 cm se utiliza como superficie libre o zona de seguridad del sistema. Los materiales ocupan una profundidad de 65 cm dispuestos en diferentes capas de material granulométrico de la siguiente manera:

Tabla 4. Dimensiones de material granulométrico y sus respectivas alturas.

Material	Tamaño efectivo	H (cm)
Arena gruesa	2 mm	10
Arena gravosa	8 mm	30
Grava fina	16 mm	7.5
Grava media	32 mm	7.5
Roca gruesa	128 mm	10

Elaboración: Autoras

$$h = 0.65 \text{ m}$$

## Tiempo de retención hidráulico

**Cuando el sistema opera de forma intermitente:**

$$V = A_s * h$$

$$1 \ A_s = 1395.1 \text{ m}^2$$

$$V = 1395.1 \text{ m}^2 * 0.65 \text{ m} = 906.84 \text{ m}^3$$

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

$$TRH = \frac{906.84 \text{ m}^3}{279.03 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 3.25 \text{ d}$$

$$2 \ A_s = 1313.07 \text{ m}^2$$

$$V = 1313.07 \text{ m}^2 * 0.65 \text{ m} = 853.5 \text{ m}^3$$



$$TRH = \frac{853.5m^3}{279.03 \frac{m^3}{d}} = 3.05 d$$

El tiempo de retención se asemeja.

**Cuando el sistema opera de forma continua:**

a.

$$TRH = \frac{n * A_s * h}{Q}$$

$$1 A_s = 1395.1m^2$$

$$TRH = \frac{0.346 * 1395.1m^2 * 0.65m}{279.03 \frac{m^3}{d}} = 1.12 d$$

$$2 A_s = 1313.07m^2$$

$$TRH = \frac{0.346 * 1313.07m^2 * 0.65m}{279.03 \frac{m^3}{d}} = 1.05 d$$

b. En función de la carga contaminante

$$t = THR = \frac{\ln \left[ \frac{C_0}{C_1} \right]}{K_t}$$

$$TRH = \frac{\ln \left[ \frac{100}{25} \right]}{1.31d^{-1}} = 1.05d$$

En este caso de la misma manera los tiempos de retención se asemejan.

**Relación largo-ancho.**

Para el sistema se utilizó el valor recomendado: 3-1.

$$L = 3W$$



$$A_s = L * W = 3W * W = 3W^2$$

$$W = \sqrt{\frac{A_s}{3}}$$

$$1 \ A_s = 1395.1 m^2$$

$$W = \sqrt{\frac{1395.1 m^2}{3}} = 21.56m$$

$$L = 3 * 21.56m = 64.69m$$

$$2 \ A_s = 1313.07 m^2$$

$$W = \sqrt{\frac{1313.07 m^2}{3}} = 20.92m$$

$$L = 3 * 20.92m = 62.76m$$

#### 4.2.2 Diseño a escala piloto

Para nuestro diseño se utiliza como factor de escalonamiento ( $f_s$ ) 0.9977.

#### Cálculo de caudal piloto:

$$Q_{piloto} = Q_{real} - (Q_{real} * \text{Factor de escala})$$

$$Q_{piloto} = 279.03 - (279.03 * 0.9977)$$

$$Q_{piloto} = 0.6 \frac{m^3}{d}$$

#### Cálculo de área piloto:

$$A_{piloto} = A_{real} - (A_{real} * \text{Factor de escala})$$

$$1 \ A_s = 1395.1 m^2$$

$$A_{piloto} = 1395.1 - (1395.1 * 0.9977)$$

$$A_{piloto} = 3.2 m^2$$



$$2 \quad A_s = 1313.07 m^2$$

$$A_{\text{piloto}} = 1313.07 - (1313.07 * 0.9977)$$

$$A_{\text{piloto}} = 3.02 m^2$$

El área piloto determinada a partir de las áreas a escala real, se asemejan por lo tanto se redondea el valor a  $3 m^2$ .

### **Cálculo de ancho y longitud piloto:**

$$W_p = \sqrt{\frac{3m^2}{3}} = 1m$$

$$L = 1m * 3 = 3m$$

### **Cálculo del tiempo de retención:**

**Cuando el sistema opera de forma intermitente:**

$$V = A_s * h$$

$$A_s = 3 m^2$$

$$V = 3 m^2 * 0.65 m = 1.95 m^3$$

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

$$TRH = \frac{1.95 m^3}{0.6 \frac{m^3}{d}} = 3.25 d$$

**Cuando el sistema opera de forma continua:**

a.

$$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{n * A_s * h}{Q}$$

$$TRH = \frac{0.346 * 3m^2 * 0.65m}{0.6 \frac{m^3}{d}} = 1.12 \text{ días}$$

b. Tiempo hidráulico en función de la carga orgánica, en este caso es el mismo que calculado en el diseño a escala real debido a que las concentraciones no se han cambiado.

El tiempo de retención se debe comprobar que sea menor a un día. En este caso el sistema trabaja de forma continua, por lo tanto el tiempo de retención será de 1 día.

Tabla 5. Datos de los parámetros de diseño del humedal artificial a escala piloto.

Parámetro	Unidades	Valor
Factor de escala		0.9977
Caudal piloto	m <sup>3</sup> /d	0.6
Profundidad	m	0.65
Borde libre	m	0.1
Área	m <sup>2</sup>	3
Relación largo-ancho		3:1
Largo	m	3
Ancho	m	1
Tiempo	día	1
Pendiente	%	1

Elaboración: Autoras

### 4.3 Construcción de los Humedales a Escala Piloto

#### Preparación del terreno

Para la construcción de los humedales se realizó como primer trabajo labores de desmonte, es decir, limpieza y extracción de las malezas del área de emplazamiento.

**Fotografía 8. Limpieza y desmonte de sitio de emplazamiento del proyecto.**



Foto: Autoras

**Fotografía 9. Trazo de área de implantación directa de proyecto.**



Foto: Autoras

**Fotografía 10. Limpieza del área de construcción de los humedales.**



Foto: Autoras

**Fotografía 11. Nivelación del área de construcción de los humedales.**



Foto: Autoras

**Fotografía 12. Terreno listo para trabajos de excavación**



Foto: Autoras



Posteriormente se realiza el trazo de los humedales, en el cual se delimita y marca sobre el terreno, el área necesaria para la construcción de las unidades experimentales establecidas.

**Fotografía 13. Inicio del trazo para construcción de humedales**



Foto: Autoras

**Fotografía 14. Trazado para construcción de humedales**



Foto: Autoras

### **Excavación del terreno para los humedales**

Una vez establecida el trazo, se procede a excavar la profundidad y pendiente determinada en el diseño para cada de las unidades experimentales.

**Fotografía 15. Inicio de excavación de terreno para construcción de humedales.**



Foto: Autoras

**Fotografía 16. Excavación a profundidad para los humedales.**



Foto: Autoras

**Fotografía 17. Fosas para los humedales.**



Foto: Autoras

A los alrededores también se construyó canales de seguridad con el fin de prevenir el ingreso de caudales extras y materiales arrastrados durante la temporada de lluvias.

### **Excavación de canales para la salida de agua del sistema.**

Luego de profundizar las fosas para los humedales, se procedió a excavar los canales (con una distancia de 12 m) para enterrar las tuberías de salida del sistema que conducen hacia el punto de muestreo.

**Fotografía 18. Excavación de canales de salida del agua tratada.**



Foto: Autoras

### **Instalación de tuberías de salida del sistema**

Para la instalación de las tuberías de conducción del agua de salida del sistema, se utilizó tubos de PVC de 2". Estas tuberías están conectadas mediante llaves a mangueras de riego de 1", las mismas se unen al sistema de salida de agua tratada de la Planta de tratamiento "El Guabo", para realizar la respectiva descarga del agua de salida de los humedales construidos. En este lugar de unión, está ubicado el punto de muestreo.



**Fotografía 19. Unión de tuberías**



Foto: Autoras

**Fotografía 20. Instalación de tuberías de salida del sistema.**



Foto: Autoras

**Fotografía 21. Fosas y sus respectivos canales de salida del sistema.**



Foto: Autoras

Fotografía 22. Relleno de canales.



Foto: Autoras

Fotografía 23. Punto unión de tubos de PVC y mangueras para descarga de aguas tratadas.



Foto: Autoras



## Colocación de la capa impermeabilizante.

**Fotografía 24. Colocación de Geomembrana.**



Foto: Autoras

Antes de colocar la capa impermeable (geomembrana) se nivela y compacta la base del humedal, para que la pendiente se mantenga de manera uniforme y proteger de elementos punzantes. De la misma manera para que las paredes no presenten deformaciones. La capa impermeabilizante que se utilizó fue la geomembrana 750  $\mu$  (micras) a base de PVC plastificado, color negro.

**Fotografía 25. Geomembrana colocada en área de implantación directa.**



Foto: Autoras

**Fotografía 26. Perforación de geomembrana en tubería de salida de agua.**



Foto: Autoras

### **Colocación del sistema de drenaje o recolección y ventilación.**

El sistema de drenaje se armó con tuberías de PVC de 2" y los accesorios necesarios como: crucetas, codos, tes y soldaduras líquidas (kalipega); formando así un circuito para garantizar la recolección del agua. A las tuberías se perforaron con orificios de  $\frac{1}{2}$ ". Las tuberías están distribuidas en toda la base del humedal, en forma de espina de pescado.

De acuerdo a las fuentes bibliográficas citadas, en lo que se refiere a tuberías de aireación recomiendan instalar 1 tubería por cada  $m^2$ . En este sistema de drenaje se conectaron 6 tuberías de aireación, con el objetivo de incrementar la cantidad de oxígeno al humedal.

**Fotografía 27. Materiales para la instalación de tuberías de drenaje y de aireación.**



Foto: Autoras

**Fotografía 28. Pegado de tuberías para el sistema de drenaje.**



Foto: Autoras

**Fotografía 29. Tuberías de recolección con orificios.**



Foto: Autoras

**Fotografía 30. Colocación del sistema de recolección.**



Foto: Autoras



**Fotografía 31. Colocación de tuberías de ventilación.**



Foto: Autoras

**Fotografía 32. Vista de Tubería de Aireación y Recolección.**



Foto: Autoras

## Preparación y llenado de las capas filtrantes

Para el llenado de capas se utilizó materiales disponibles de la zona, comprados en las mineras de material pétreo, ubicadas a las orillas del río Jubones. Para cada una de las unidades se trató en lo posible utilizar la misma cantidad de materiales, según la altura de cada material granulométrico. La forma de los materiales utilizados es redonda y arena de río y también se adicionó una capa delgada de arena sílice.

**Fotografía 33. Vista de la zona de extracción del material para proyecto.**



Foto: Autoras

**Fotografía 34. Transporte de Materiales desde Mina hacia zona de proyecto.**



Foto: Autoras

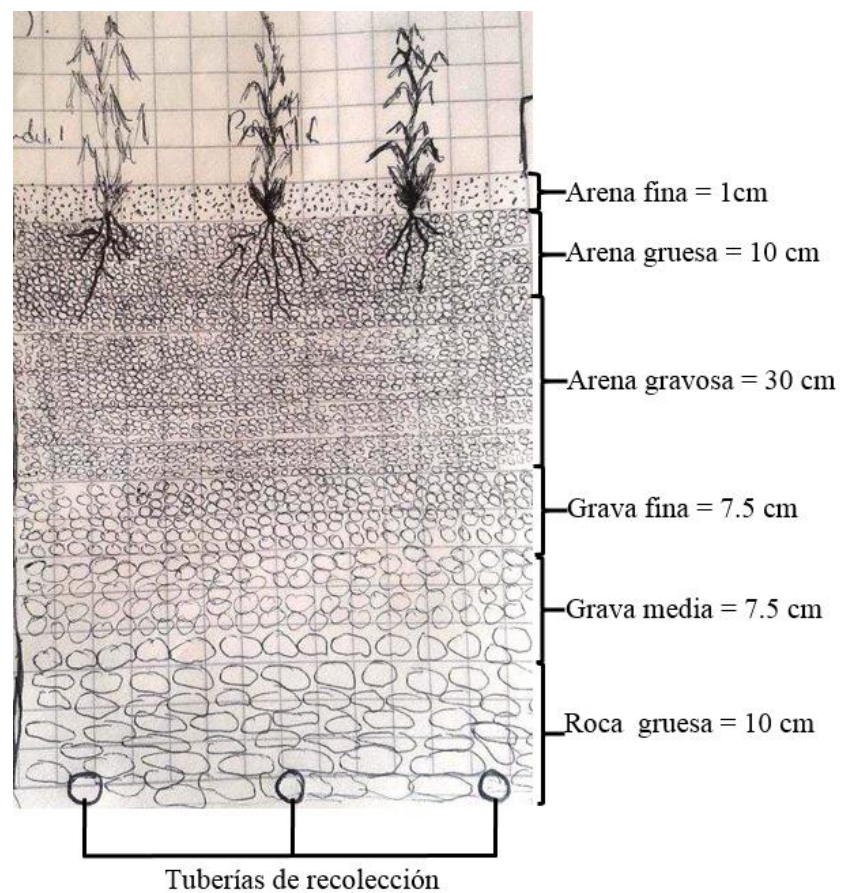
Fotografía 35. Descarga de Materiales en zona de implantación de Proyecto.



Foto: Autoras

El relleno de los materiales granulométricos se realizó de siguiente forma:

Figura 11. Disposición de cada material en el humedal.



Elaboración: Autoras



En el sitio de implantación del proyecto se preparó tres materiales: roca gruesa, grava media y arena gruesa. Para clasificar estos materiales se emplearon tres tamices con orificios de forma cuadrada, con las siguientes medidas: 2x2 cm para roca gruesa, 1x1 cm para grava media y un último tamiz para arena gruesa. Los materiales retenidos en los tamices fueron los elegidos para colocar en los humedales.

**Fotografía 36. Tamices para clasificación de Material**



Foto: Autoras

**Fotografía 37. Tamiz 2x2 cm para primera capa de material filtrante.**



Foto: Autoras

Fotografía 38. Tamiz 1x1 cm para segunda capa para material filtrante.



Foto: Autoras

Fotografía 39. Tamiz para cuarta capa (arena gruesa) de material filtrante.



Foto: Autoras



Una vez clasificado los tres materiales, se procedió al lavado, para esta actividad se contó con el apoyo del Cuerpo de Bomberos de Santa Isabel.

**Fotografía 40. Lavado de Material con el apoyo de Cuerpo de Bomberos de Santa Isabel.**



Foto: Autoras

**Fotografía 41. Lavado de material de material filtrante.**



Foto: Autoras

La tercera capa de material filtrante correspondiente a la grava fina, se recolectó de forma manual del material de rechazo o pachillas que las mineras acumulaban a las orillas del Rio Jubones. Se clasificó en relación al tamaño de la grava media. La cuarta capa correspondiente a la arena gravosa se compró en mineras de la misma zona.

**Fotografía 42. Zona de recolección de material filtrante.**



Foto: Autoras

**Fotografía 43. Recolección manual de grava fina.**



Foto: Autoras

A continuación se presenta el relleno de cada una de las capas del material filtrante en las fosas. En la base de los humedales se colocó material con tamaño superior a la roca gruesa, con el fin de proteger las tuberías.



**Fotografía 44. Colocación de una base de material para protección de tuberías.**



Foto: Autoras

**Fotografía 45. Izquierda: Material para primera capa. Derecha: Colocación de primera capa de material filtrante.**



Foto: Autoras

**Fotografía 46. Izquierda: Material para segunda capa. Derecha: Colocación de segunda capa filtrante.**



Foto: Autoras

**Fotografía 47. Material para la tercera capa filtrante.**



Foto: Autoras

**Fotografía 48. Izquierda: material para cuarta capa filtrante. Derecha: Colocación de cuarta capa.**



Foto: Autoras



En la cuarta capa se realizó el trasplante de cada una de las especies. Luego se colocó el quinto material correspondiente a la arena gruesa.

**Fotografía 49. Colocación del quinto material filtrante luego del trasplante.**



Foto: Autoras

**Fotografía 50. Colocación de una capa fina de material filtrante (arena de mar).**



Foto: Autoras

### **Preparación y siembra de la vegetación**

Se utilizaron 10 plantas de cada especie designada para cada humedal. El carrizo común se extrajo de las riberas del río Minas afluente al río Jubones, mientras que el papiro se obtuvo de viveros de la zona.

En el caso del carrizo se sembraron rizomas en arena para un desarrollo previo al trasplante en el humedal.

**Fotografía 51. Rizomas de carrizo sembradas en arena.**



Foto: Autoras

**Fotografía 52. Rizomas de carrizo en sus primeros brotes.**



Foto: Autoras

Como se indicó en la Fotografía 48, el trasplante de carrizo y papiro se realizó en la cuarta capa del material filtrante.



**Fotografía 53. Trasplante de Papiros en humedal**



Foto: Autoras

**Fotografía 54. Distribución de papiros en humedal.**



Foto: Autoras

### **Colocación de sistemas de entrada del agua.**

Para la captación del agua de entrada a los humedales, desde la tercera laguna de la Planta de tratamiento, se colocó una botella perforada con el fin de prevenir el ingreso de materiales sólidos que aceleren el proceso de colmatación del sistema.

*Jhanina Fabiola Patiño Chávez*

*Fanny Lucía Zhinín Chimbo*

**Fotografía 55. Botella perforada para la toma de agua, para evitar el ingreso de solidos mayores de 3mm**



Foto: Autoras

La botella perforada se conecta a una manguera de riego de 1", esta a su vez se conecta a un tubo en forma de "Y", lo que permite la división de caudal para cada humedal.

**Fotografía 56. Colocación de tuberías de distribución de agua hacia los humedales.**



Foto: Autoras

**Fotografía 57. Colocación de bridas de seguridad en tuberías.**



Foto: Autoras

En cada una de las tuberías de distribución del agua de ingreso a cada humedal se colocó medidores de agua, que nos permiten regular el caudal. Alrededor de los medidores se construyó una caja de protección.

**Fotografía 58. Construcción de caja de protección para medidores de caudal de ingreso.**



Foto: Autoras

### **Colocación del sistema de aplicación.**

Para armar el sistema de aplicación de aguas a los humedales, se utilizó mangueras de 16 mm de diámetro. Las mismas que se perforaron para colocar goteros de riego con la finalidad de regular el caudal en cada punto. Los orificios se ubican de acuerdo al número de celdas divididas en el área



superficial; permitiendo formar un circuito cerrado y a su vez distribuir equitativamente el líquido en todo el humedal.

**Fotografía 59. Colocación de Goteros en el sistema de distribución del humedal.**



Foto: Autoras

**Fotografía 60. Vista de los dos humedales con sus tuberías de distribución respectivamente.**



Foto: Autoras

## CAPITULO V

### PARTE EXPERIMENTAL

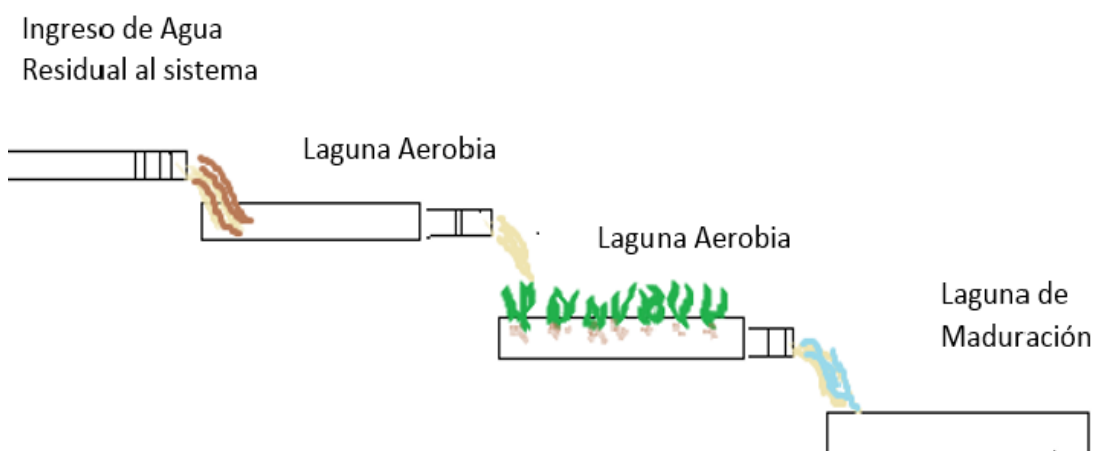
#### 5.1 Operación de los Humedales Construidos

Una vez finalizada la plantación, se procedió a ingresar el agua al sistema. El caudal de ingreso se tomó de la salida de la tercera laguna (laguna de maduración) de sistema de tratamiento “El Guabo”. Desde el primer suministro de agua (27 de febrero del 2015), se esperó dos meses para iniciar con la etapa de monitoreo, con la finalidad de obtener un mayor crecimiento de las plantas.

Las dos primeras semanas, se realizó fases de llenado sin regulación de caudal, para que las plantas puedan adaptarse al medio. El agua se cambiaba cada dos días. A partir de la tercera, se inicia con una -alimentación de forma continua y por ende el control del caudal. El caudal de entrada al ser muy pequeño ( $0.6 \text{ m}^3/\text{d} = 0.416 \text{ lt}/\text{min} = 0.006 \text{ lt}/\text{s}$ ), se reguló de la siguiente manera:  $1 \text{ lt}/2 \text{ min}$ .

En esta etapa de crecimiento de las especies, se realizó un seguimiento periódico para verificar el ingreso de agua a los humedales, observar el aspecto de las plantas y el efluente depurado.

Figura 12. Esquema de Tratamiento de Aguas Residuales desde donde se realiza la toma de caudal.



Elaboración: Autoras.



**Fotografía 61. Fase de desarrollo inicial de humedal con papiro y humedal con carrizo.**



Foto: Autoras

**Fotografía 62. Primer mes de desarrollo de papiro y carrizo en los humedales.**



Foto: Autoras



**Fotografía 63. Segundo mes de desarrollo de papiro y carrizo en los humedales.**



Foto: Autoras

Durante el funcionamiento se presentó problemas de encharcamiento, debido a que el afluente que se tomó del sistema de tratamiento de aguas PTAR El Guabo, contiene gran cantidad de lodos, así como debido a la presencia de fuertes lluvias en el mes de Abril. Por lo que se procedió a extraer los restos de lodo en el humedal y lavar la primera capa de la columna de material filtrante antes de realizar el primer monitoreo.

**Fotografía 64. Presencia de problemas encharcamiento en los humedales.**

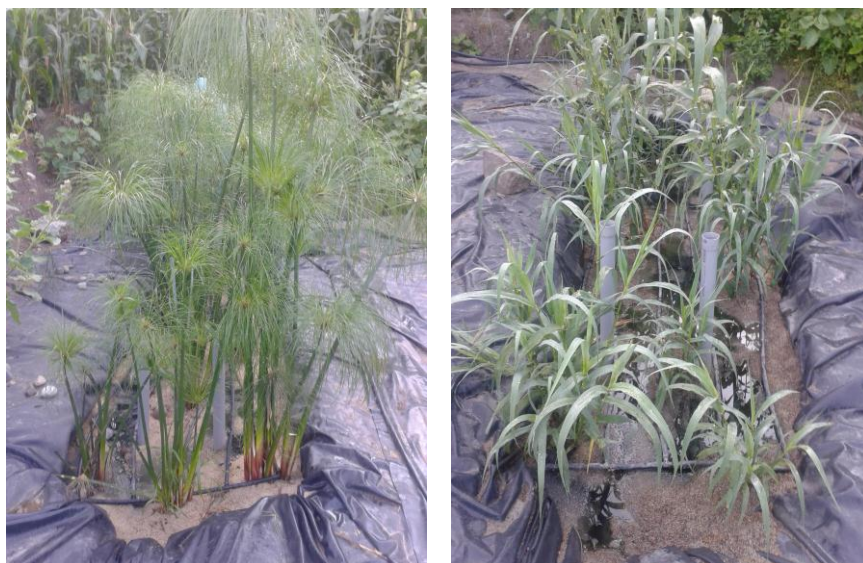


Foto: Autoras



**Fotografía 65. Tercer mes de desarrollo de papiro y carrizo en los humedales.**



Foto: Autoras

**Fotografía 66. Cuarto mes de desarrollo de papiro y carrizo en los humedales.**



Foto: Autoras



**Fotografía 67. Quinto mes de desarrollo de papiro y carrizo previo a la poda.**



Foto: Autoras

Después de cinco meses de desarrollo el plantas, han llegado a una determinada altura. En el caso del papiro al tener tallos más débiles en comparacion al carrizo y debido a la presencia de viento, empezaron a quebrarse. Para evitar la excesiva acumulación de restos de papiro en el humedal se realizó una poda. En el caso del carrizo se extrajo las hojas secas depositadas en el humedal.

**Fotografía 68. Vista de Humedal con papiro después de la fase de poda.**



Foto: Autoras

## Programa de monitoreo

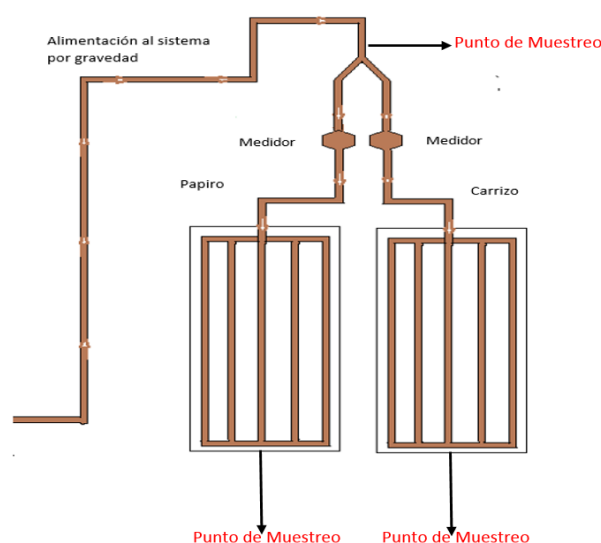
El monitoreo nos permitió evaluar el funcionamiento de las unidades experimentales, con el que se pudo verificar posibles anomalías, evidenciar el cumplimiento de los objetivos establecidos y comprobar si los parámetros físicos, químicos y biológicos del agua de la salida de los humedales están dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la normativa legal para su vertido.

El programa de monitoreo se inició dos meses después de la implementación de los humedales, es decir, a principios del tercer mes de desarrollo de las plantas. Se esperó este lapso de dos meses para que las especies puedan adaptarse al nuevo medio, en el caso del carrizo para que broten todos los rizomas y el papiro haya proliferado el humedal con sus nuevos brotes y a su vez que las dos plantas alcancen cierta altura.

## Localización de los puntos de muestreo.

Para evaluar el funcionamiento de los humedales, se estableció los puntos de muestreo de la siguiente manera: ingreso de agua a los humedales (debido a que el agua residual que ingresa es el mismo para los dos humedales) y en la salida de agua del humedal con papiro y con carrizo.

Figura 13. Esquema general de ingreso de caudal y puntos de muestreo al sistema.



Elaboración: Autoras



El monitoreo tuvo un periodo de 1 mes y dos semanas, se realizó un muestreo cada semana. En las siguientes fechas:

- Muestreo 1: 29 de Abril del 2015
- Muestreo 2: 13 Mayo del 2015
- Muestreo 3: 20 de Mayo del 2015
- Muestreo 4: 27 de Mayo del 2015
- Muestreo 5: 04 de Junio de 2015
- Muestreo 6: 10 de Junio del 2015

En donde se realizó el análisis de los siguientes parámetros físicos, químicos y microbiológicos:

- pH
- Temperatura
- Alcalinidad Total
- Conductividad
- Sólidos Totales
- Sólidos Suspendidos Totales
- Sólidos Disueltos Totales
- Nitratos
- Nitrógeno Amoniacal
- Fósforo Total
- Demanda Química de Oxígeno
- Demanda Bioquímica de Oxígeno
- Coliformes Totales
- Coliformes Fecales (E. Coli)

### **Análisis en campo y en laboratorio**

Se realizó mediciones de pH y temperatura in situ, en la entrada y salida de cada uno de los humedales. Para lo cual se adquirió (financiación propia) instrumentos de medición directa. Para determinar y registrar las lecturas de temperatura y pH se utilizó: un termómetro digital (resolución 0.1°C) y pH metro de mano (resolución 0.1 pH).

**Fotografía 69. Prueba in situ de pH y temperatura en agua de ingreso de humedales**



Foto: Autoras

Mientras se realizaba las mediciones de temperatura y pH, simultáneamente para los otros parámetros, se tomaron muestras puntuales simples en cada punto de muestreo. Las muestras se llevaron al Laboratorio de Sanidad de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de Cuenca. Esta actividad se realizó en horas de la mañana, las muestras se recolectaron en botellas de plástico de 2,5 litros para parámetros físico-químicos, y en envases de 50 ml para los parámetros microbiológicos. Las botellas para la recolección fueron llevadas del laboratorio, previamente lavadas con agua destilada y en el sitio de muestreo nuevamente fueron lavadas con el agua de salida de cada humedal correspondiente. Posteriormente las muestras se colocaban en una hielera térmica de poliuretano (espuma flex), cubiertas con hielo triturado, con el fin de conservar la muestra durante el transcurso de viaje desde Santa Isabel a Cuenca.



**Fotografía 70. Toma de muestras de agua de ingreso para análisis en laboratorio.**



Foto: Autoras

**Fotografía 71. Toma de muestras de agua de salida de humedal con papiro para análisis de laboratorio.**



Foto: Autoras

**Fotografía 72. Agua de salida del Humedal con carrizo.**



Foto: Autoras

Fotografía 73. Etiquetado de muestras.



Foto: Autoras

Fotografía 74. Comparación de Agua de salida (izquierda) y agua de entrada (derecha) del sistema.



Foto: Autoras

## 5.2 Análisis e Interpretación de Resultados

Los resultados obtenidos de cada parámetro en los seis muestreos realizados, a la entrada y salida de cada humedal, se presentan en la Tabla 6. Se puede observar que la concentración de los parámetros varía con el tiempo, es decir, mientras se desarrollaban las plantas. Cada uno de los parámetros físico-



químicos y biológicos presenta una reducción en su concentración, excepto los siguientes parámetros que presentan un incremento en su concentración: temperatura (en todos los muestreos existe pequeñas variaciones de valores de entrada y salida), sólidos totales (durante los muestreos 2,3 y 4) y nitratos (en todos los muestreos, debido al proceso de nitrificación). Los seis resultados de análisis de laboratorio escaneados están adjuntados en el capítulo VII (Anexos).

En la Tabla 7, se presenta en forma porcentual el nivel de remoción los contaminantes en los humedales, durante el periodo de muestreo. Posteriormente cada parámetro es analizado por separado. En la Tabla 5, se presenta el promedio general de remoción cada parámetro durante el periodo de monitoreo y su respectiva comparación con la normativa ambiental del Ecuador, TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente), Libro VI, Anexo 1: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de efluentes, Recurso Agua; en donde establece en la Tabla 6, Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola y en la Tabla 12, Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.





Tabla 6. Resultados de los análisis Físico-Químico y Microbiológicos para determinar la eficiencia del sistema de humedales propuesta.

Fechas de muestreos			29 de Abril (M1)			13 de mayo (M2)			20 de mayo (M3)			27 de mayo (M4)			04 de Junio (M5)			10 de Junio (M6)		
Análisis	Parámetros	Unidad	Ingreso	Papiro	Carrizo	Ingreso	Papiro	Carrizo	Ingreso	Papiro	Carrizo	Ingreso	Papiro	Carrizo	Ingreso	Papiro	Carrizo	Ingreso	Papiro	Carrizo
Físico-Químico	pH	Up H	6.79	6.19	5.96	6.94	6.32	6.45	7.02	6.65	6.69	6.97	6.25	5.91	6.93	5.86	5.98	7.06	6.58	6.26
	Temperatura	°C	26.7	26.1	26.1	23.1	22.8	23	25.4	25.5	25.3	25.4	25.5	25.3	24.7	24.5	23.6	22.4	21.8	22.1
	Alcalinidad	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	210.2	126.6	111.6	SA*	SA	SA	167	64.2	58.6	199.2	17.4	18	176.8	23	62.4	126.2	112.8	62.4
	Conductividad	µs/cm	680	545	521	772	634	665	537	472	590	602.5	1072	841	627	548	512	641	531	522
	Sólidos Totales	mg/l	427	395	49	457	549	472	354	521	509	369	923	851	629	486	353	464	338	345
	Sólidos Disueltos Totales	mg/l	372	337	27	379	405	390	302	441	466	306	872	818	480	478	349	328	319	331
	Sólidos Suspendidos	mg/l	55	58	22	78	144	82	52	80	43	63	51	33	149	8	4	136	19	14
	DBO <sub>5</sub>	mg/l	102.5	31.97	51.9	89.5	16.85	22.3	39	18.6	22.2	84	16	15.6	102	9.02	6.6	157.5	18.5	22.8
	DQO	mg/l	205.04	90.89	79.04	280	68	100	139.44	71.72	83.66	215.13	71.71	79.68	235.06	55.78	67.73	260	44	60
	Nitratos	mg/l	0.605	2.105	7.615	SA	SA	SA	1.442	10.42	10.08	1.369	9.384	9.208	0.33	9.96	10.13	0.31	3.94	4.72
	Nitrógeno Amoniacal	mg/l	22.3	3.3	2.4	35.56	11.65	13.83	19.66	2.24	5.88	30.63	3.3	2.6	38.9	20.8	11.9	30.1	12.4	15.3
	Fósforo Total	mg/l	5.01	3.57	4.14	SA	SA	SA	4.56	3.57	3.21	6.4	3.64	3.21	10.13	3.81	4	11.02	3.97	4.23
Microbiológico	Coliformes Totales	NMP/100ml	1.60E+10	1.60E+09	1.60E+09	SA	SA	SA	1.20E+10	2.00E+08	3.30E+07	3.50E+10	3.90E+08	2.10E+09	4.70E+10	2.00E+08	3.50E+09	1.60E+11	2.80E+09	3.50E+09
	Coliformes Fecales	NMP/100ml	1.60E+10	1.60E+09	1.60E+09	SA	SA	SA	1.20E+10	1.70E+09	2.80E+07	1.40E+10	3.90E+07	7.00E+08	3.90E+10	3.30E+07	2.80E+09	4.70E+09	3.90E+08	2.40E+08

Elaboración: Autoras

\* SA= Sin Análisis

Tabla 7. Porcentajes de remoción en el periodo de muestreo. Se presentan en forma porcentual los niveles de remoción en los humedales.



Fechas de muestreo		29 de Abril		13 de Mayo		20 de Mayo		27 de Mayo		04 de Junio		10 de Junio	
Análisis	Parámetros	Papiro	Carrizo	Papiro	Carrizo	Papiro	Carrizo	Papiro	Carrizo	Papiro	Carrizo	Papiro	Carrizo
Físico-Químico	pH	8.84%	12.22%	8.93%	7.06%	5.27%	4.70%	10.33%	15.21%	15.44%	13.71%	6.80%	11.33%
	Temperatura	2.25%	2.25%	1.30%	0.43%	-0.39%	0.39%	-0.39%	0.39%	0.81%	4.45%	2.68%	1.34%
	Alcalinidad	39.77%	46.91%	sin análisis	sin análisis	61.56%	64.91%	91.27%	90.96%	86.99%	64.71%	10.62%	50.55%
	Conductividad	19.85%	23.38%	17.88%	13.86%	12.10%	-9.87%	-77.93%	-39.59%	12.60%	18.34%	17.16%	18.56%
	Sólidos Totales	7.49%	88.52%	-20.13%	-3.28%	-47.18%	-43.79%	-150.14%	-130.62%	22.73%	43.88%	27.16%	25.65%
	Sólidos Disueltos Totales	9.43%	92.74%	-6.86%	-2.90%	-46.03%	-54.30%	-184.97%	-167.32%	0.42%	27.29%	2.74%	-0.91%
	Sólidos Suspendidos Totales	-5.45%	60.00%	-84.62%	-5.13%	-53.85%	17.31%	19.05%	47.62%	94.63%	97.32%	86.03%	89.71%
	DBO5	68.81%	49.37%	81.17%	75.08%	52.31%	43.08%	80.95%	81.43%	91.16%	93.53%	88.25%	85.52%
	DQO	55.67%	61.45%	75.71%	64.29%	48.57%	40.00%	66.67%	62.96%	76.27%	71.19%	83.08%	76.92%
	Nitratos *	-71.26%	-92.06%	sin análisis	sin análisis	-86.16%	-85.69%	-85.41%	-85.13%	-96.69%	-96.74%	-92.13%	-93.43%
	Nitrógeno Amoniacal	85.20%	89.24%	67.24%	61.11%	88.61%	70.09%	89.23%	91.51%	46.53%	69.41%	58.80%	49.17%
	Fósforo Total	28.74%	17.37%	sin análisis	sin análisis	21.71%	29.61%	43.13%	49.84%	62.39%	60.51%	63.97%	61.62%
Microbiológicos	Coliformes Totales	90.00%	90.00%	sin análisis	sin análisis	98.33%	99.73%	98.89%	94.00%	99.57%	92.55%	98.25%	97.81%
	Coliformes Fecales	90.00%	90.00%	sin análisis	sin análisis	85.83%	99.77%	99.72%	95.00%	99.92%	92.82%	91.70%	94.89%

Elaboración: Autoras

\*En el caso de los nitratos, el signo negativo indica que no existe remoción, sino un incremento en la concentración, debido a que en este tipo de humedales de flujo vertical, por tener condiciones aerobias da lugar a la nitrificación, en donde el nitrógeno amoniacal se convierte en nitrato. Los valores negativos de los sólidos totales, sólidos suspendidos y disueltos, indican un incremento en su concentración, debido a la presencia de problemas explicados anteriormente.

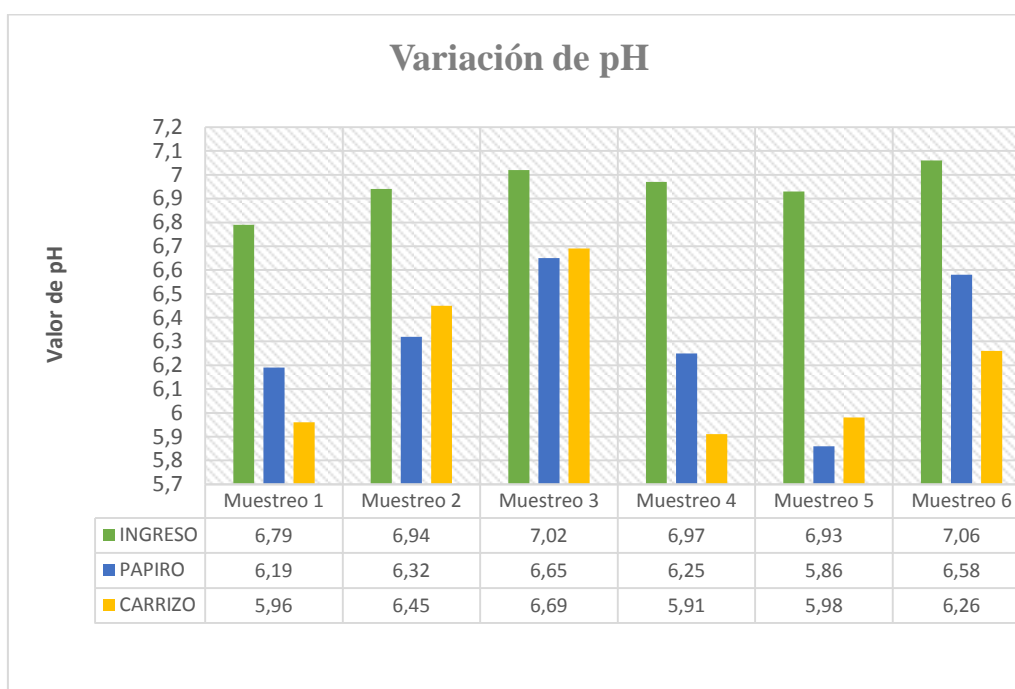
### 5.2.1 Análisis de resultados por parámetros

El análisis de resultados obtenidos, se realizará mediante graficas de histogramas, en los cuales se compara la concentración de los contaminantes del agua de ingreso y el agua de salida del humedal con papiro y humedal con carrizo. También se presenta gráficos de líneas con los porcentajes de remoción (calculados en la Tabla 2) de cada especie.

Estos datos nos permitirán evaluar el proceso de depuración de contaminantes en los humedales con carrizo y determinar cuál de estas dos especies es la que posee mayor capacidad de remoción.

#### 5.2.1.1 Análisis de pH

Gráfico 1. Valores de pH.

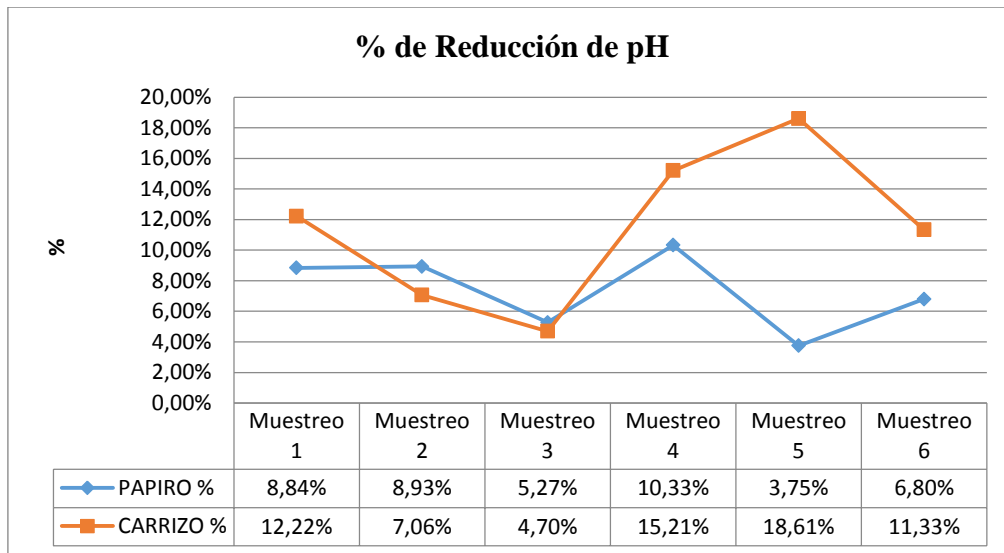


Elaboración: Autoras

Los valores de pH del agua de ingreso mantienen valores altos a lo largo del periodo de muestreo con relación a los valores de salida de los humedales, los valores de salida tanto del papiro como el carrizo presentan los valores más altos en el tercer muestreo para luego descender hasta el quinto muestreo alcanzando valores cercanos a la acidez en el cuarto y quinto muestreo; para luego ascender los valores en el sexto muestreo.

Los valores de pH bajo en los resultados de salida no indican una acidificación, indican que se realiza una depuración anaerobia. Aunque en dichos valores también influye el oxígeno disuelto, por lo que según Ramalho et al. (1990) explica las variaciones del pH en el día, debido a que durante el día el amoníaco como producto de la descomposición de compuestos nitrogenados contribuye el aumento del pH, pero durante la noche por la liberación del Dióxido de Carbono hace disminuir el pH, por lo que asegura que los valores del pH del agua puede ser acida durante la noche y básica en el día; a todo esto se resume que todas las muestras fueron tomadas en horarios de 8 o 9 de la mañana, por lo que existen remanentes de aguas que han reposado en horarios nocturno.

**Gráfico 2. Porcentaje de reducción de pH.**



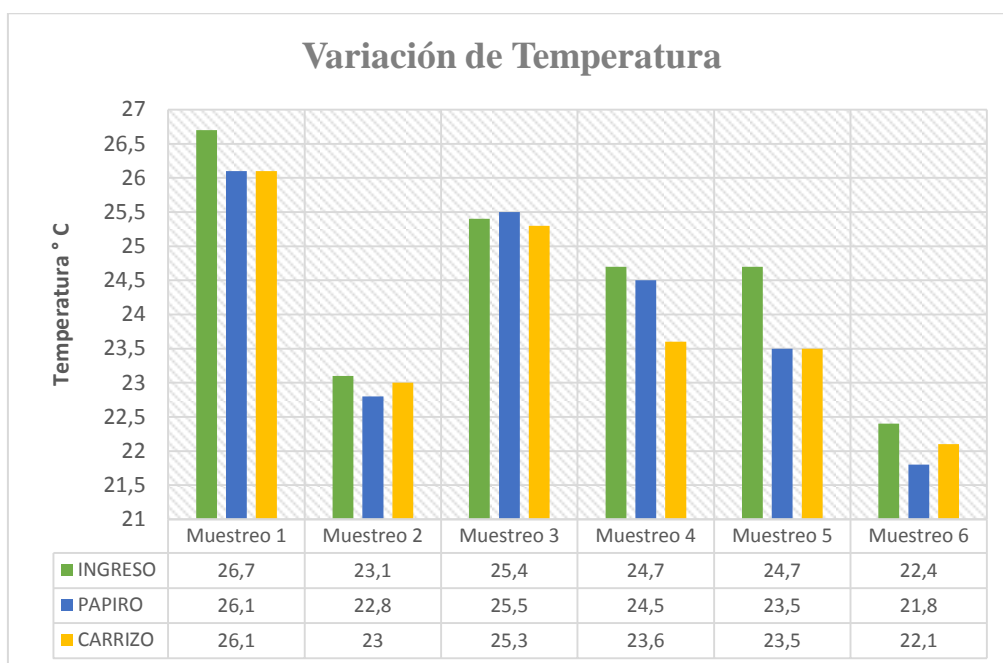
Elaboración: Autoras

En el gráfico 2, los tres primeros muestreos tanto el papiro como el carrizo presentan valores de reducción parecidos, con la diferencia que el papiro mantiene valores altos de reducción de pH en el segundo y tercer muestreo, pero es a partir del cuarto muestreo que existe más del 10% de diferencia entre el papiro el carrizo, alcanzando los valores más altos de reducción el carrizo; esto quiere decir que en los últimos tres muestreos los valores de pH del carrizo fueron más bajos, dándonos que las condiciones anaerobias estuvieron más presentes en el humedal con carrizo.

### 5.2.1.2 Análisis Temperatura

Los valores de temperatura fueron tomados in situ, usando un termómetro digital. En el gráfico 3, se presenta los valores de temperatura obtenidos durante periodo de monitoreo. Se presenta un comportamiento muy parecido el primer muestreo, con valores de 26 grados con variación de decimales, en el ingreso, salida de papiro y carrizo. Es en el segundo muestreo que alcanzan valores bajos entre 22 y 23 °C. Hay que recalcar que en todos los seis muestreos se presentan en el agua de ingreso, valores altos con relación a los valores de salida de los humedales experimentales. Pero es en el muestreo 6, que se alcanza los valores más bajos de todos los muestreo, dándonos una diferencia de decimales.

Gráfico 3. Valores de temperatura.

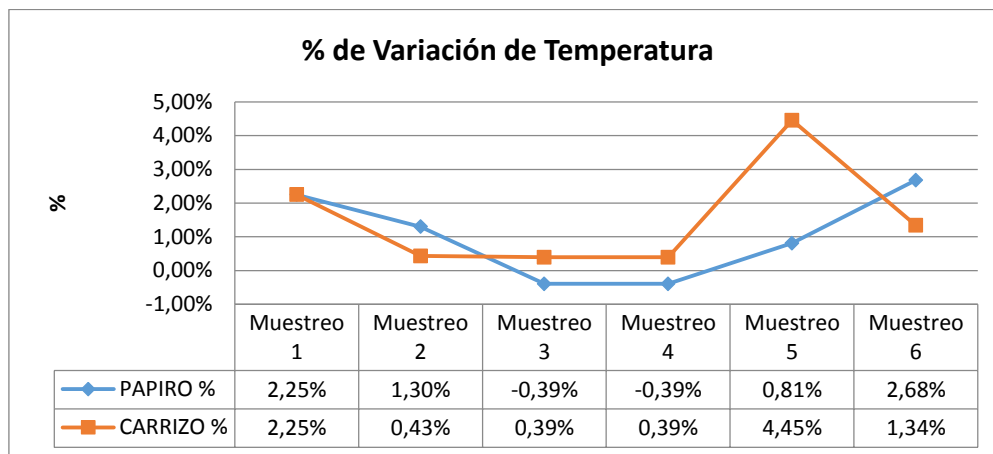


Elaboración: Autoras

En el gráfico 4, se observa que no existe una variación significativa temperatura entre el Carrizo y Papiro; pero hay que considerar que los valores se encuentran por debajo de los valores de ingreso a los humedales.



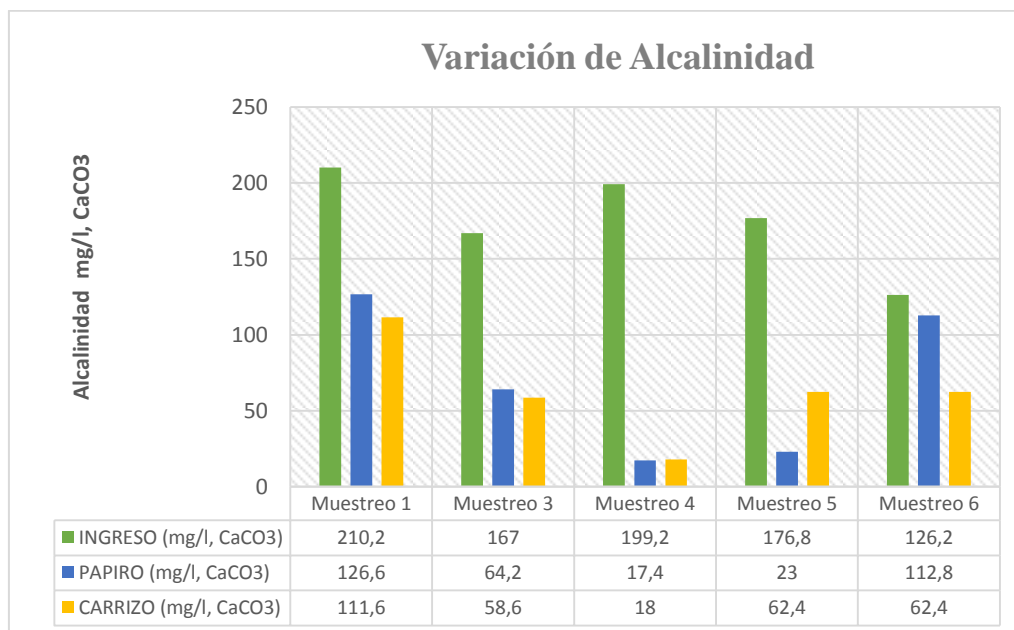
Gráfico 4. Porcentaje de variación de Temperatura.



Elaboración: Autoras

### 5.2.1.3 Análisis Alcalinidad

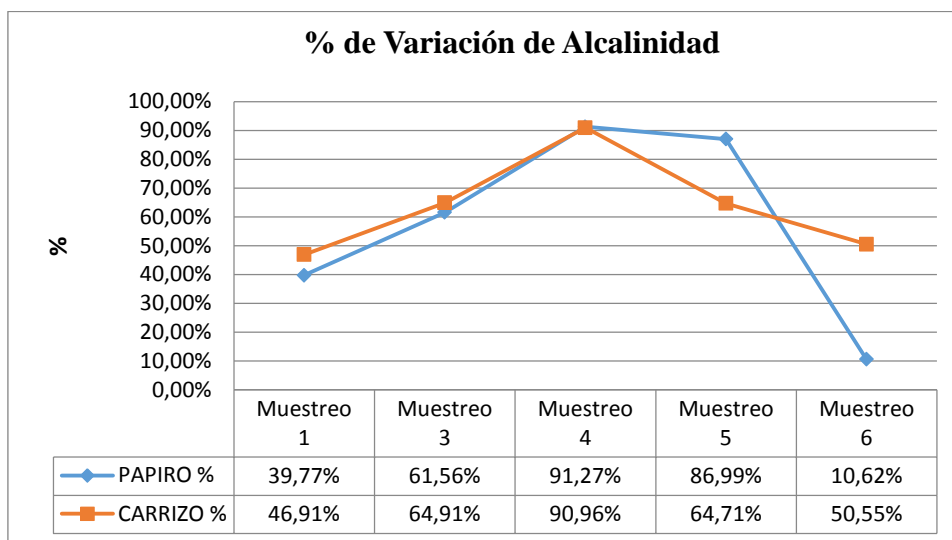
Gráfico 5. Valores de Alcalinidad.



Elaboración: Autoras

En el gráfico 5, se aprecia los valores de Alcalinidad también presentan una reducción en todos los muestreos tanto en los humedales con carrizo como en los humedales con papiro, aunque en el tercer, cuarto, y quinto muestreo la reducción es bastante considerable. La alcalinidad presenta una relación con el proceso de nitrificación, si existe suficiente alcalinidad y condiciones aeróbicas dará lugar a la nitrificación de manera eficiente. Se puede evidenciar en los gráficos 19 y 21, variación de nitratos y nitrógeno amoniacal respectivamente.

**Gráfico 6. Porcentajes de variación de Alcalinidad.**

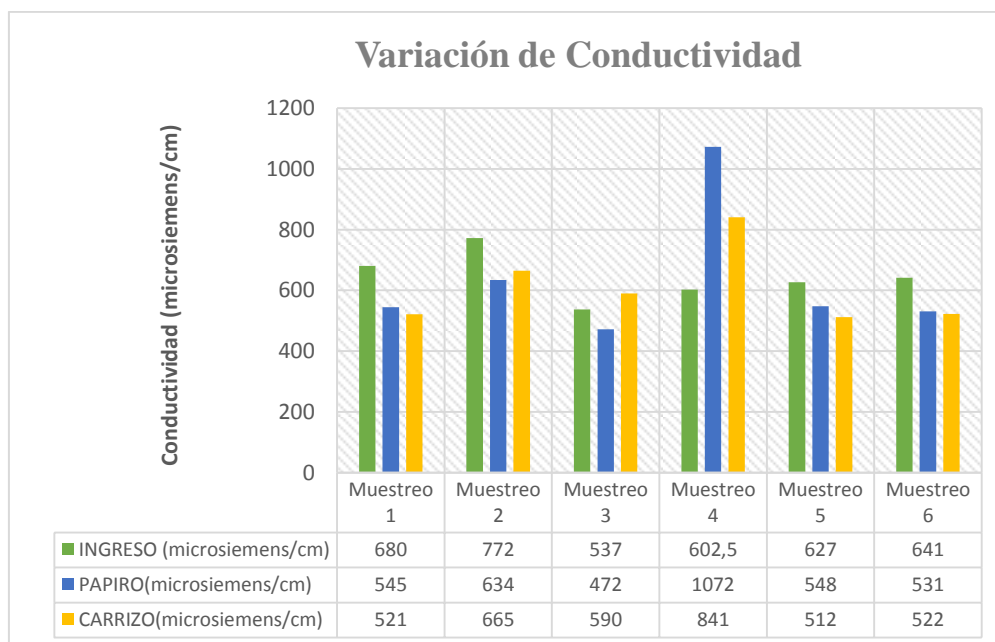


Elaboración: Autoras

Dicho comportamiento no se repite en el primer y sexto muestro cuyos valores se encuentran en un 25% y 50% de reducción, aunque en el último muestro el valor de alcalinidad para el agua de salida del humedal con carrizo presenta una reducción del 50% más con relación al humedal con carrizo.

#### 5.2.1.4 Análisis Conductividad

**Gráfico 7. Valores de Conductividad.**



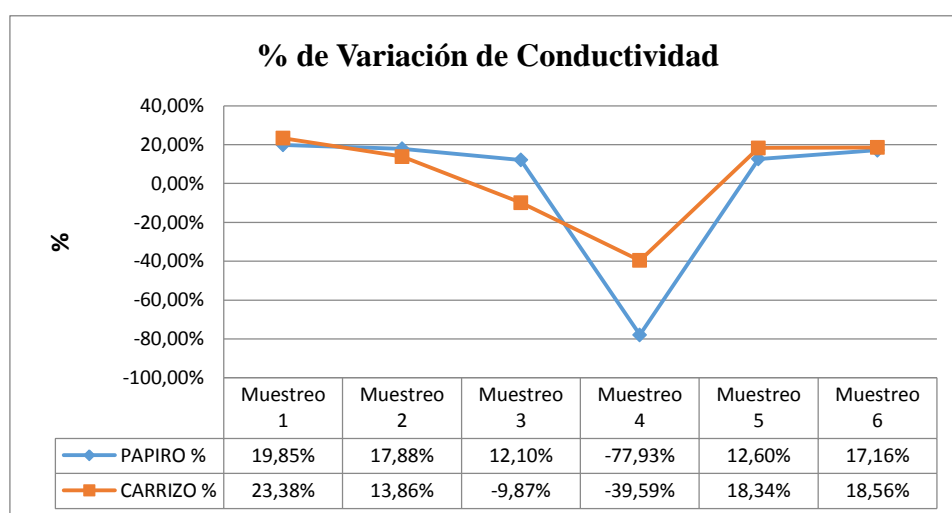
Elaboración: Autoras

La conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo que los resultados de conductividad estarán relacionados directamente con los valores sólidos disueltos.

Los valores de ingreso de conductividad se mantienen altos con relación a los valores de salida de papiro y carrizo, pero es en el tercer muestreo que el valor del papiro se incrementa más del 50% del valor de ingreso, al igual el papiro incrementa un 20% del valor de ingreso; en el quinto muestreo los valores de salida se reducen al igual que en el sexto muestro.

La concentración de sólidos responde directamente a la concentración de sólidos totales, por lo que podemos ver un incremento de los valores en el cuarto muestreo.

**Gráfico 8. Porcentajes de variación de Conductividad.**



Elaboración: Autoras

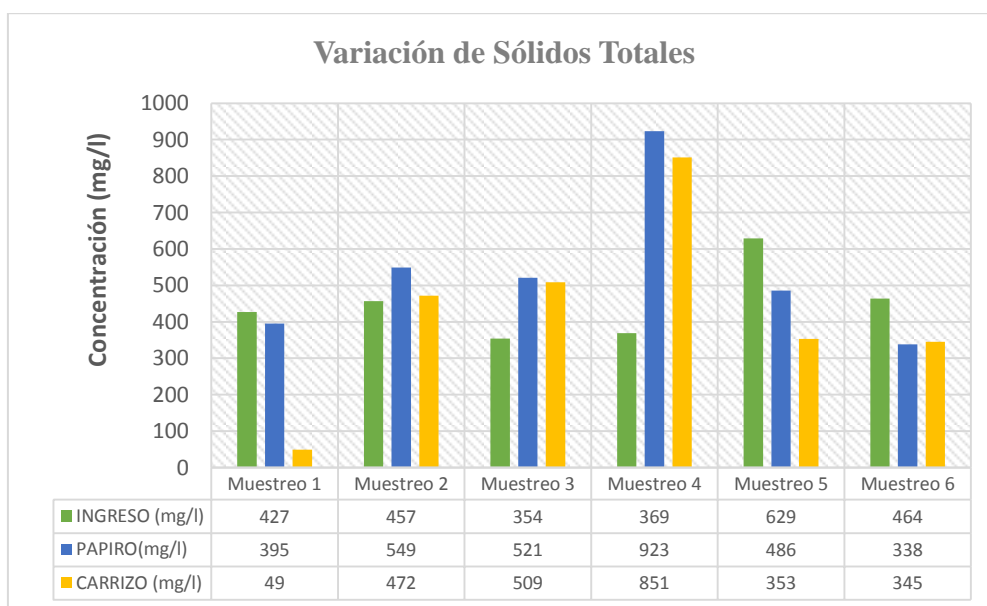
No existe una diferencia significativa entre los dos resultados de papiro y carrizo, pero en el cuarto muestreo se ve que los valores de remoción de la conductividad se elevan, por lo cual los valores se vuelven negativos.

#### 5.2.1.5 Análisis Sólidos Totales

En el TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Tabla 12, establece 1600 mg/l como Límite Máximo Permisible (LMP) para la concentración de sólidos totales, para la descarga a cuerpos de agua dulce.

El gráfico 9, muestra la concentración de sólidos totales de entrada contra los de salida de cada humedal. En todos los muestreos el afluente no presenta valores que superan la concentración de referencia. Sin embargo, las concentraciones que ingresan son elevadas (debido a la presencia de lodos en la laguna de captación de caudal). En adición, se presentó fuertes lluvias, lo que dio lugar al arrastre de material sólido hacia el pequeño sistema de tratamiento, generando problemas de inundación en el humedal. Razón por la cual, se puede observar que a partir del Muestreo 2 hasta el Muestreo 4 las concentraciones de salida son superiores con respecto al de ingreso, es el tiempo que tardó en salir (no en su totalidad) los sólidos que habían llegado a las capas más profundas del humedal. Mientras que en el Muestreo 1, 5 y 6 se aprecian una reducción de sólidos, es decir, cuando el sistema ya no presenta problemas de encharcamiento.

**Gráfico 9. Concentración de Sólidos Totales.**

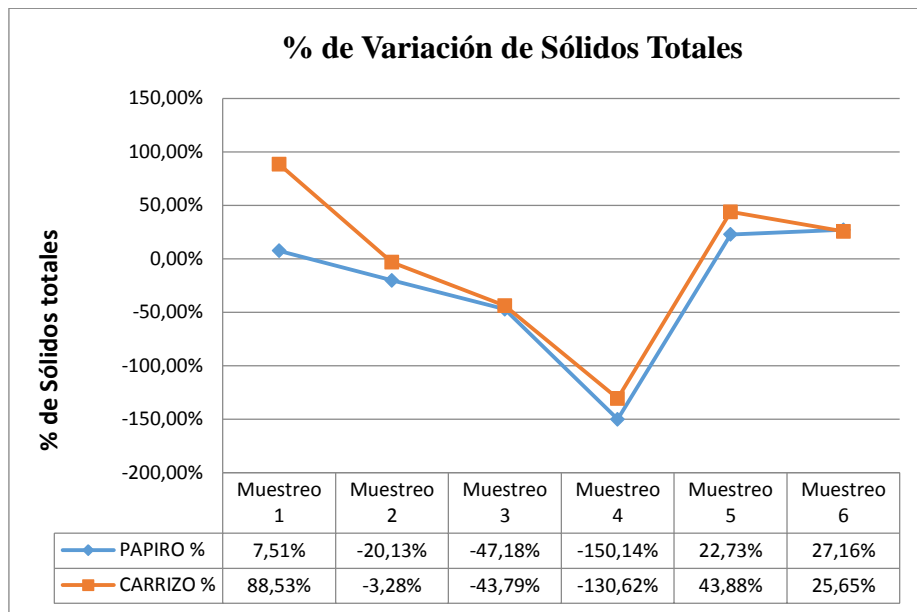


Elaboración: Autoras

En el gráfico 10, se ilustra los porcentajes de rendimiento alcanzados por cada humedal para sólidos totales. Por los problemas en el sistema descritos anteriormente, los resultados del porcentaje de remoción de sólidos totales presenta un valor negativo lo cual muestra un aumento del valor de sólidos totales en al agua de salida de ambos humedales con relación al agua de ingreso a los humedales.

En el muestreo 1, con el carrizo se alcanza el mayor porcentaje de remoción con un valor de 88.53%, con el papiro se consigue el menor porcentaje con un valor de 7.51%. En los muestreos 5 y 6, el papiro alcanzan porcentajes de 22.73 y 27.16%, el carrizo alcanza porcentajes de 43.88 y 25.65%. Mientras que los muestreos 2, 3 y 4 presentan incremento de concentración. De acuerdo a los datos obtenidos se aprecia que el humedal con carrizo retiene mayor cantidad de sólidos.

**Gráfico 10. Porcentaje de variación de Sólidos Totales.**



Elaboración: Autoras

#### 5.2.1.6 Análisis Sólidos Suspendidos

En el gráfico 11, se muestra la concentración de sólidos suspendidos de entrada contra los de salida de cada humedal. Los valores del afluente en los muestreos 1, 2, 3, 4 y 5 se encuentran por debajo del LMP (100 mg/l) para descarga en fuentes hídricas, establecido en el TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Tabla 12, Límites de descarga de un cuerpo de agua dulce; mientras que en el muestreo 6 supera el LMP.

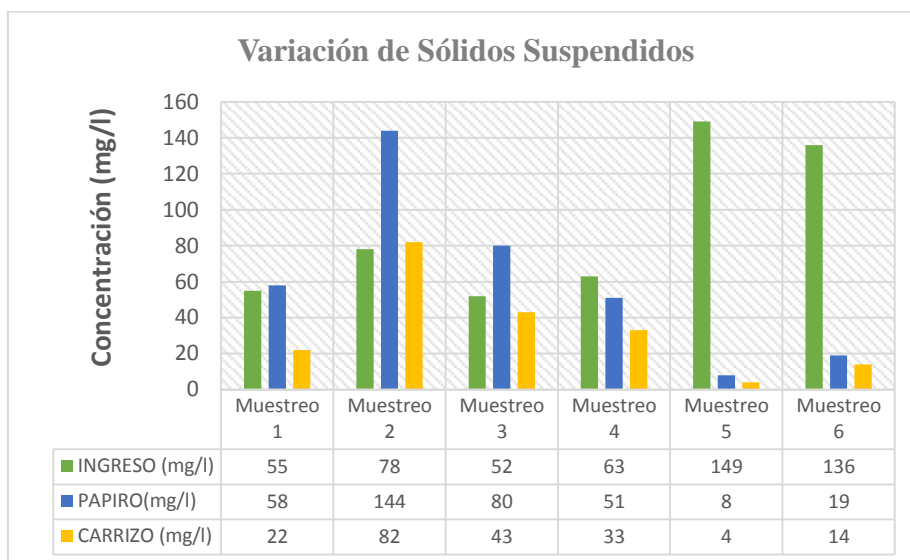
En el muestreo 1, se observa que existe incremento en el valor salida en comparación al valor de ingreso en el caso del papiro; en cambio con el carrizo se presenta una reducción de concentración, al ser los sólidos totales una



suma de los sólidos suspendidos y disueltos, este valor está incluido en el porcentaje de remoción presentado en el muestreo 1 de los sólidos totales.

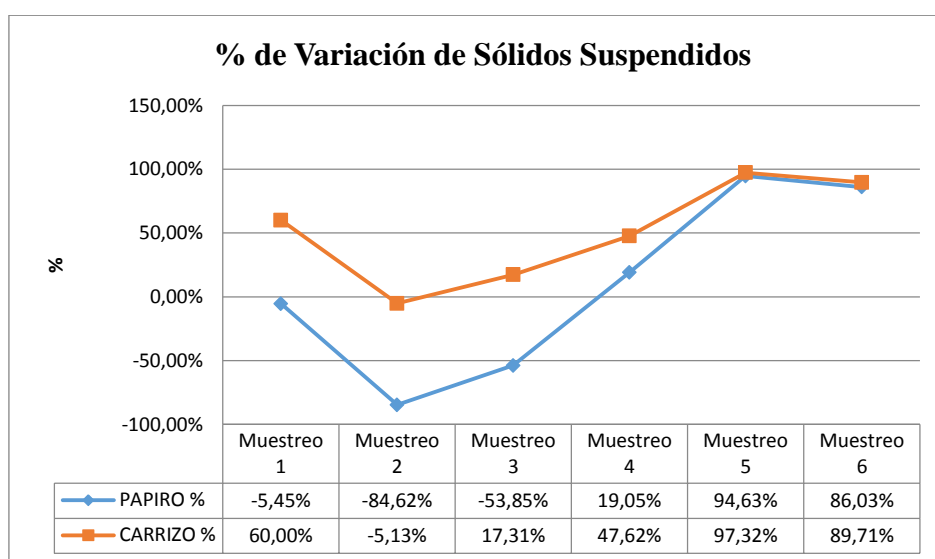
De la misma forma presentada en gráfico 9 de sólidos totales, existe incremento representativo de concentración de sólidos suspendidos en la salida de humedal con carrizo, en los muestreos 2 y 3. En los muestreos 5 y 6 se observa mayor concentración en el agua de ingreso, pero son los muestreos que mayor remoción representan.

**Gráfico 11. Concentración de Sólidos Suspendidos.**



Elaboración: Autoras

**Gráfico 12. Porcentajes de variación de Sólidos Suspendidos.**



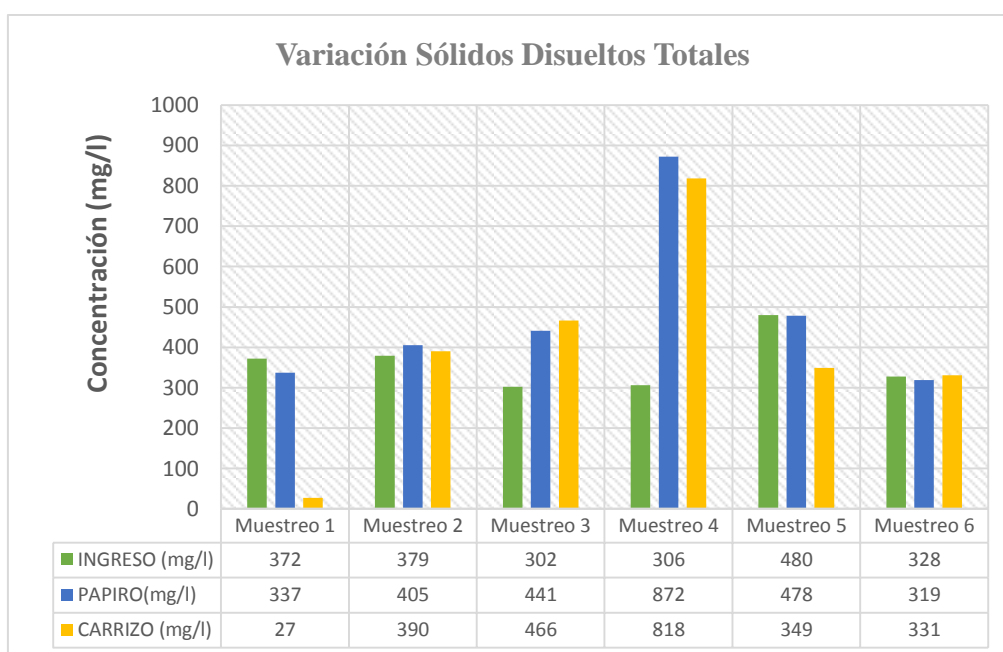
Elaboración: Autoras

En el gráfico 12 se muestra la comparación de los porcentajes de remoción de cada especie para sólidos suspendidos. De acuerdo a los porcentajes obtenidos, se observa que en los muestreos 2 y 3 presenta porcentajes negativos, lo que indica un incremento en la concentración de este parámetro. En los muestreos 5 y 6 existen altos niveles de rendimiento, siendo el carrizo con mayor capacidad de remoción.

#### 5.2.1.7 Análisis de Sólidos Disueltos Totales

La conductividad es directamente proporcional a los sólidos disueltos, es por eso que en el cuarto muestreo los valores de la conductividad y sólidos totales se incrementaron para el carrizo y el papiro. Estos dos incrementos rápidos de valores se dieron en un lapso de una semana.

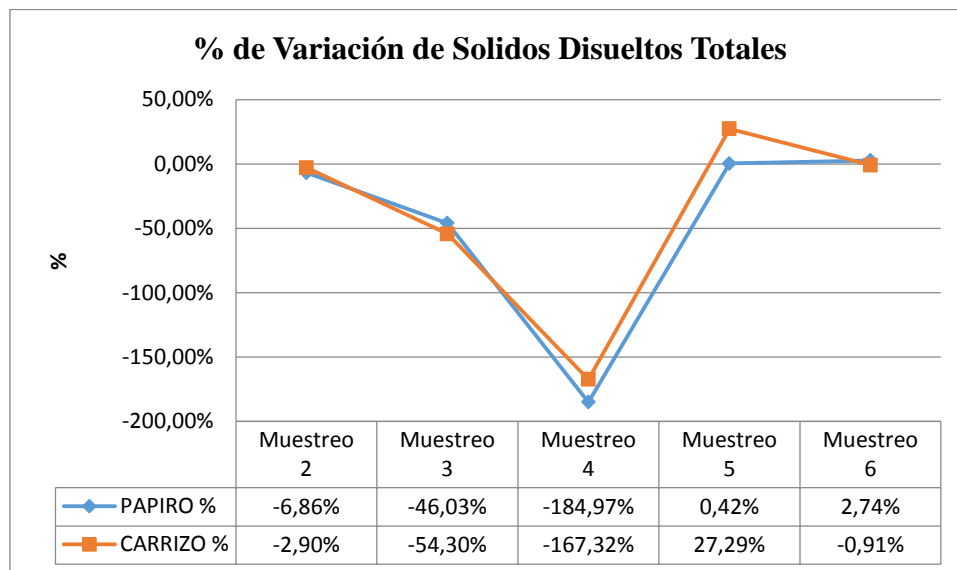
**Gráfico 13. Concentración de Sólidos Disueltos.**



Elaboración: Autoras

No existe un valor de referencia para sólidos disueltos establecido en el TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Tabla 12, Límites de descarga de un cuerpo de agua dulce; pero si establece en la Tabla 6, Criterios de calidad admisibles para guas de uso agrícola, un valor de 3000 mg/l. Por lo tanto se puede observar, que las concentraciones en todos los muestreos no supera el criterio de referencia.

**Gráfico 14. Porcentajes de variación de Sólidos Disueltos.**

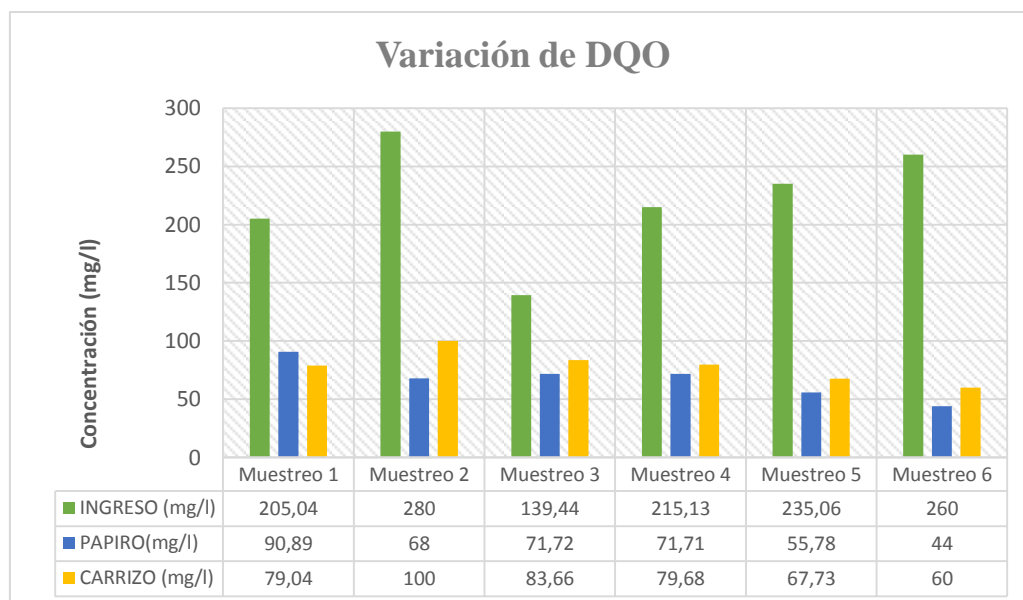


Elaboración: Autoras

En el gráfico 14, podemos observar que no existe una diferencia significativa entre los valores del carrizo y papiro, pero en los tres primeros muestreos observamos valores negativos lo que nos indica que los valores de salida fueron superiores a los valores de ingreso.

#### 5.2.1.8 Análisis Demanda Química de Oxígeno

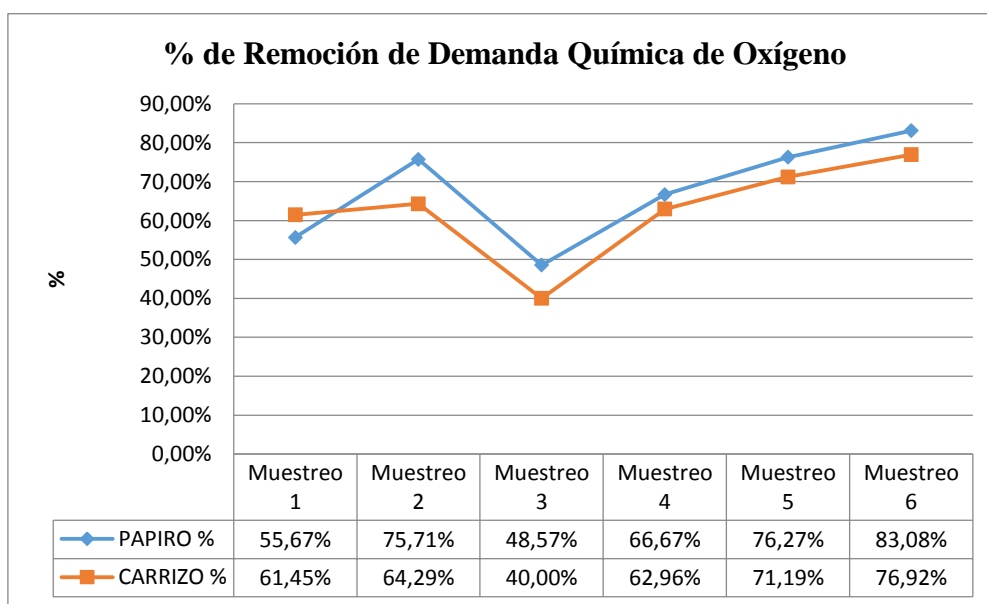
**Gráfico 15. Concentración de DQO.**



Elaboración: Autoras

En el gráfico 15, se observa la remoción de la Demanda Química de Oxígeno. En los seis muestreos realizados se existe una reducción en la concentración de la DQO en los dos humedales. En todos los muestreos, los valores del efluente se encuentran por debajo del Límite máximo permisible de descarga (LMP=250 mg/l), establecido en el TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Tabla 12, Límites de descarga de un cuerpo de agua dulce. En el muestreo 6 se presentó la concentración de DQO más alta en el agua de ingreso, con valor de 260 mg/l; es en este muestreo donde existe mayor remoción de este parámetro, con valores de 44 mg/l para el papiro y 60 mg/l para el carrizo, es decir se reduce en 216 y 200 mg/l respectivamente. Mientras que en el muestreo 3 se presentó la concentración más baja en el agua de ingreso, con un valor de 139.44 mg/l reduciéndose a 71.72 mg/l con el papiro y a 83.66 mg/l con el carrizo, lo que representa una remoción de 67.72 y 55.78 mg/l respectivamente, es el muestreo con menor cantidad de remoción.

**Gráfico 16. Porcentajes de remoción de DQO.**



Elaboración: Autoras

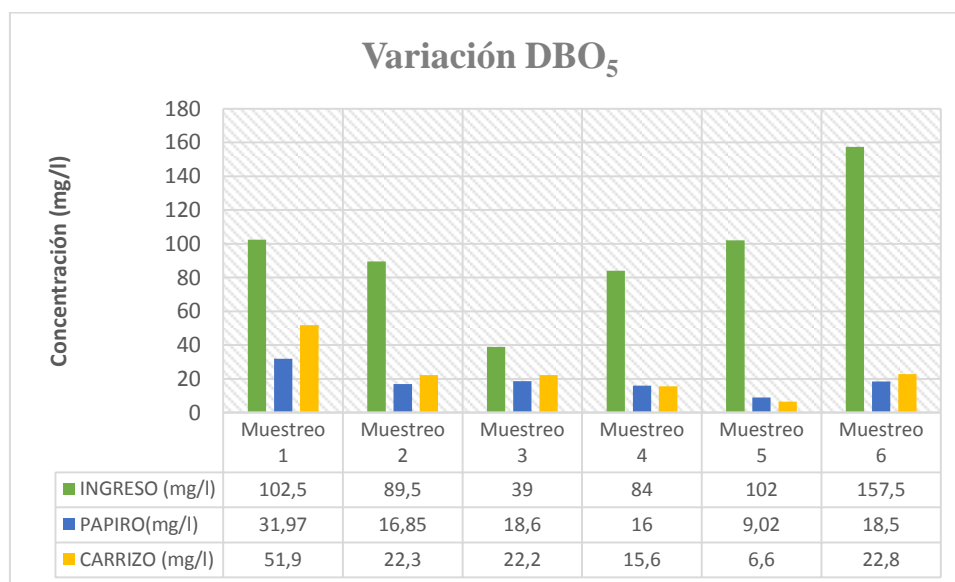
En el gráfico 16, se ilustra los porcentajes del nivel de remoción de la DQO en cada humedal. Este gráfico nos permite comparar los rendimientos alcanzados por cada especie y a su vez determinar cuál de las dos especies posee mayor capacidad de depuración para este parámetro.

Como se describió en el gráfico anterior es el muestreo 6 el que representa mayor porcentaje de remoción, con valores de 83.08% para el papiro y 76.92% para el carrizo. En cambio el muestreo 3 representa los porcentajes más bajos de remoción, 48.47% para el papiro y 40% para el carrizo. Sin embargo, se puede evidenciar que en todos los muestreos el papiro es más eficiente que el carrizo.

#### 5.2.1.9 Análisis Demanda Bioquímica de Oxígeno

El gráfico 17, ilustra la concentración de la DBO<sub>5</sub> de la entrada con respecto a la concentración de salida de cada humedal.

Gráfico 17. Concentración de DBO<sub>5</sub>.



Elaboración: Autoras

Los valores del afluente en el muestreo 1, 5 y 6 se encuentran sobre el LMP (100 mg/l) establecido en el TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Tabla 12, Límites de descarga de un cuerpo de agua dulce. El valor del muestreo 4 está por debajo del LMP y el muestreo 3 presenta el valor más bajo de concentración con respecto a los demás valores.

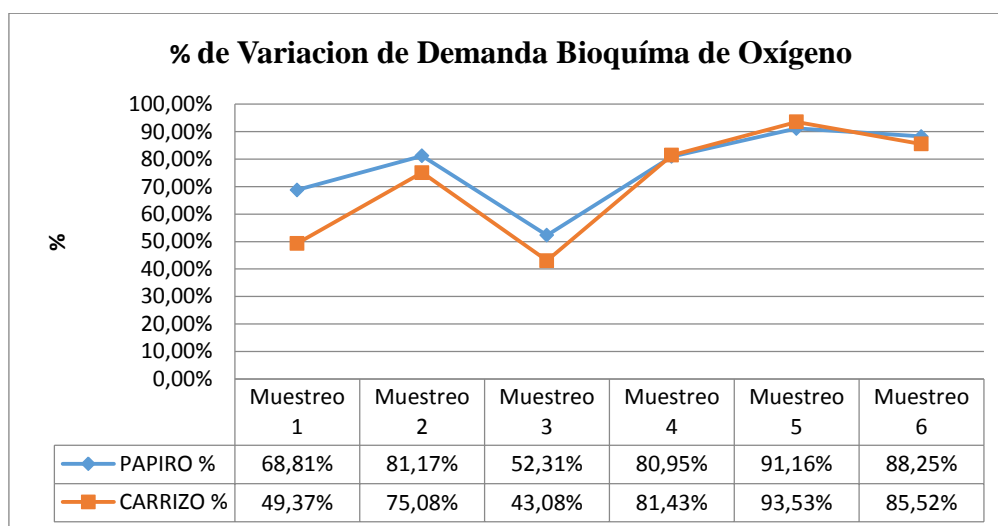
Se observa que en todos los muestreos, excepto en el muestreo 3, existe reducción considerable de la concentración inicial en comparación con la concentración de salida de cada humedal.



Se presentó una mayor remoción en el muestreo 5 con un valor de entrada de 102 mg/l que se reduce a 9.02 con el papiro y 6.6 mg/l con el carrizo. Mientras que en el muestreo 3 se presentó menor remoción con un valor de 39mg/l que se reduce a 18.6 para el papiro y 22.29 mg/l para el carrizo.

En el gráfico 18, se muestra la comparación de los porcentajes de remoción de cada especie para la Demanda Bioquímica de Oxígeno. De acuerdo a los porcentajes obtenidos, se observa que en los muestreos realizados existe altos niveles de rendimiento de depuración de DBO<sub>5</sub>, que superan el 50%; excepto en el muestreo 1, en el caso del carrizo alcanza el 49.37% y gráfico 3 también el carrizo con 43.08% y papiro con 52.31%.

**Gráfico 18. Porcentajes de variación de DBO<sub>5</sub>.**



Elaboración: Autoras

En el muestreo 5 se alcanza mayor porcentaje de remoción, 91.16% para el papiro y 93.53% para el carrizo. En este muestreo 5 el carrizo es más eficiente que el papiro, sin embargo, en la mayoría de muestreos el papiro presenta porcentajes altos de remoción. Por lo tanto, con el papiro se obtiene mayores rendimientos de remoción para DBO<sub>5</sub>.

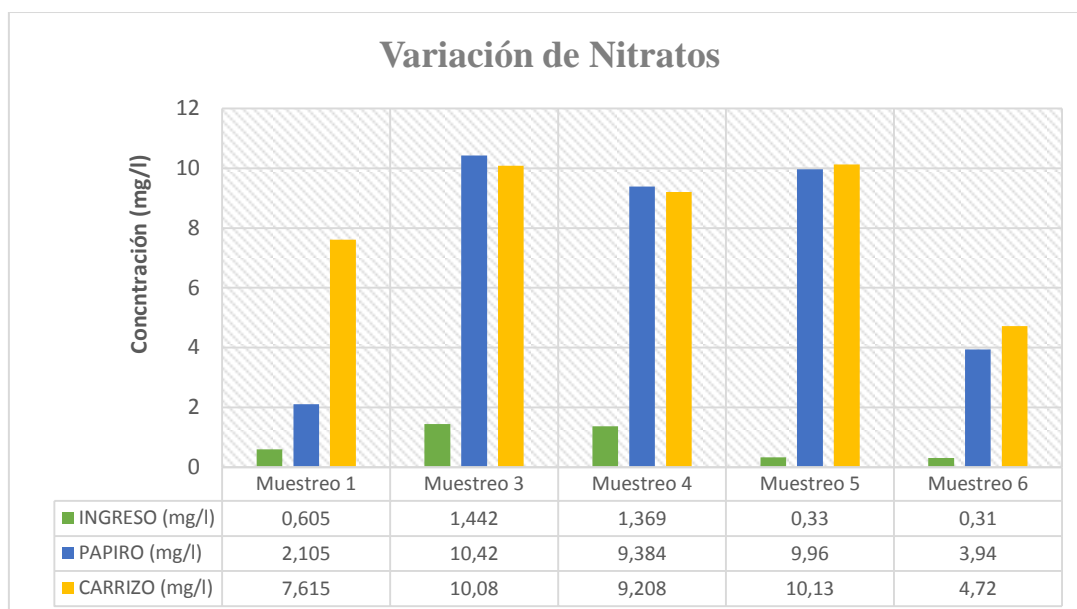
#### 5.2.1.10 Análisis de Nitratos

El gráfico 19, ilustra la concentración de nitratos de la entrada con respecto a la concentración de salida de cada humedal. En este caso se aprecia que no existe reducción, más bien los valores se incrementan.

La oportunidad de nitrificar existe en condiciones aeróbicas, suficiente alcalinidad y temperatura adecuada, y después que la mayoría de  $\text{DBO}_5$  haya sido removida para que los organismos nitrificantes puedan competir con los organismos heterótrofos por el oxígeno disponible.

Los valores del afluente y efluente en todos los muestreos, se encuentran debajo el LMP (10 mg/l) establecido en el TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Tabla 12, Límites de descarga de un cuerpo de agua dulce; excepto en el muestreo 3 y 5 (solo para el carrizo, agua de salida) están sobre el LMP, con pocos decimales de diferencia.

**Gráfico 19. Concentración de Nitratos.**



Elaboración: Autoras

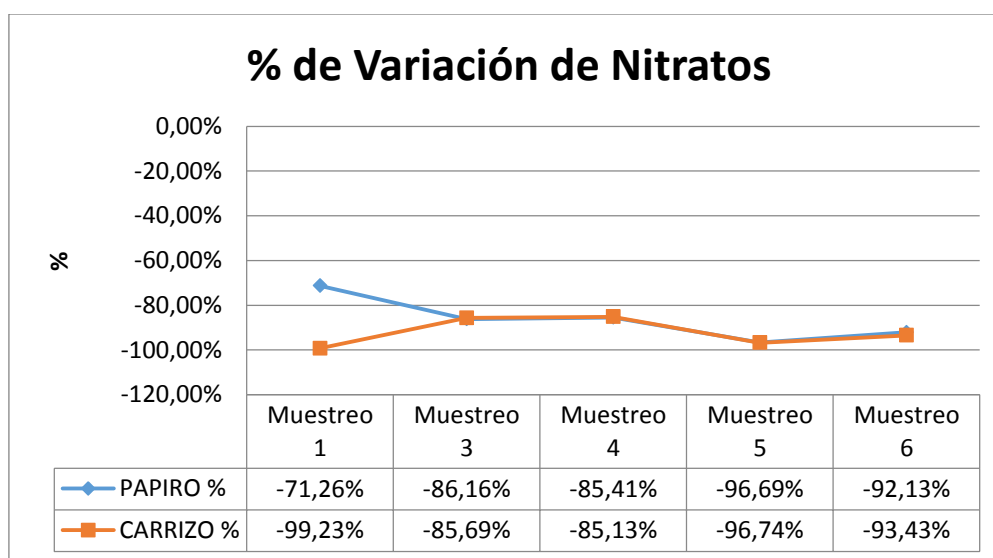
En todos los muestreos se observa que ingresan valores bajas de concentraciones y a la salida posee valores elevados de concentración, lo cual evidencia que el humedal se encuentra condiciones aerobias para que se dé lugar la nitrificación. Pero es en el muestreo 5 que presenta mayor nitrificación, con un valor de entrada de 0.33mg/l que se transforma a 9.96 mg/l para el papiro y 10.13 mg/l para el carrizo.

Los humedales de flujo vertical tienen la función principal de realizar la nitrificación, en donde el nitrógeno amoniacal o todas las formas de nitrógeno que ingresa se transforman a nitritos y nitratos, por lo que se observa un

incremento del valor de los nitratos en la salida de ambos humedales. Por tal motivo, en el gráfico 20, se observa que todos los muestreos, los porcentajes de nitratos presentan valores negativos.

En cada uno de los muestreos los porcentajes de nitratos son superiores al 70% (de manera negativa), lo que indica que el sistema es muy efectivo en la nitrificación. Es el muestreo 5 que alcanza los mayores valores de nitrificación, tanto para el papiro como para el carrizo, con pocos decimales de diferencia. Los porcentajes de incremento en todos los muestreos de cada humedal, excepto el muestreo 1, tienen poca diferencia

**Gráfico 20. Porcentajes de variación de Nitratos.**



Elaboración: Autoras

La remoción de los nitratos se mantiene en un valor aproximando de manera constante. Sin embargo, al calcular la media aritmética de los porcentajes de incrementos de cada especie, nos da como resultado: para el papiro 86.33 % y para el carrizo 90.61%. Por lo tanto es el carrizo la especie con más efectividad de nitrificación.

#### 5.2.1.11 Análisis de Nitrógeno Amoniacal

El propósito de los humedales es de remover la carga contaminante, al mismo tiempo dentro de los humedales da lugar la depuración de las aguas a través del procesos de adsorción, absorción, y transformación de los contaminantes, el nitrógeno es al igual removido ya sea transformado en nitritos, nitratos,

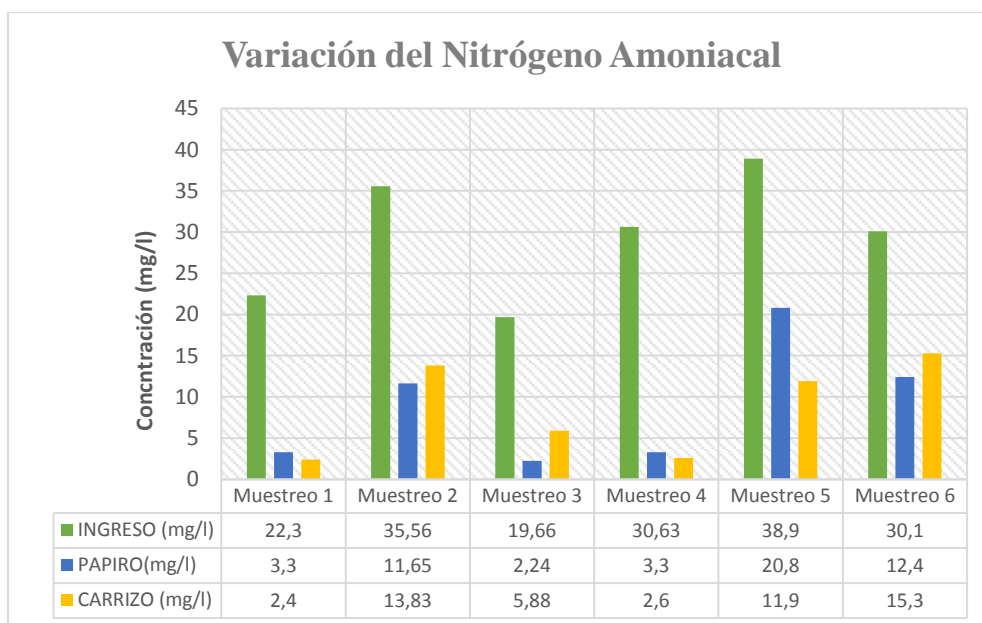
adsorbido o absorbido en el sistema. Por tal motivo presentan una reducción considerable en todos los muestreos.

En el TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Tabla 12, Límites de descarga de un cuerpo de agua dulce; no existen valores de límites máximos permisibles para este parámetro.

En el gráfico 21, se observa la concentración del nitrógeno amoniacal de entrada con respecto a la salida de cada humedal, durante los 6 muestreos realizados.

En el muestreo 4 se presentó mayor remoción con el papiro con un valor de ingreso de 30.63 mg/l y salida de 3.3 mg/l; en el caso del carrizo se presentó mayor remoción en el muestreo 1, se reduce de 22.3mg/l a 2.4mg/l.

**Gráfico 21. Concentración de Nitrógeno Amoniacal.**

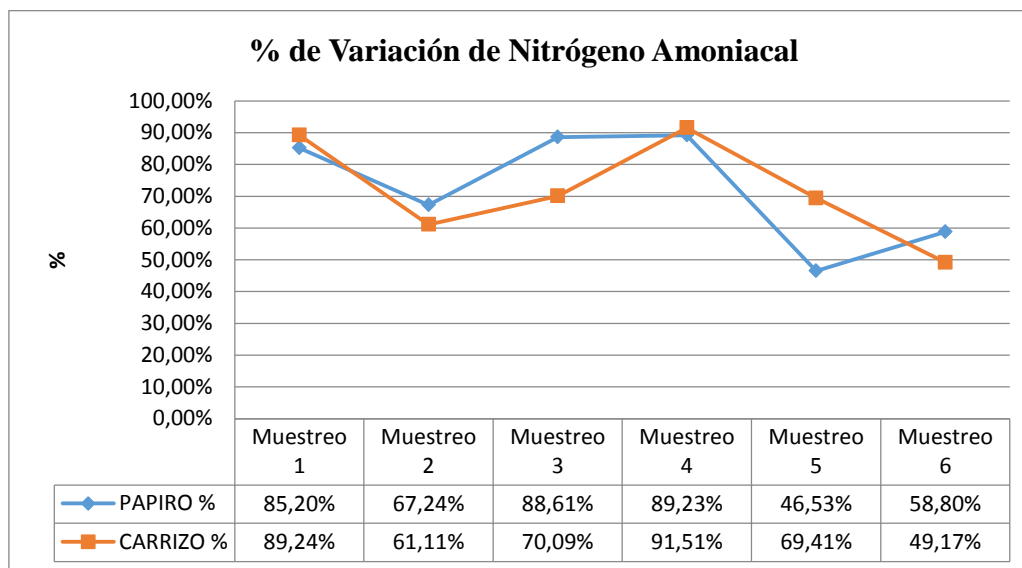


Elaboración: Autoras

En el gráfico 22 se muestra la comparación de los porcentajes de remoción de cada especie para la el nitrógeno amoniacal. Todos los muestreos representan porcentajes de remoción superiores al 50%, excepto en el muestreo 5 en el caso del papiro y muestreo 6 en caso del carrizo que presentan los porcentajes más bajos.

Para determinar la especie con mayor eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal, se calculó la media aritmética de los porcentajes obtenidos en cada humedal, proporcionando los siguientes resultados: para el papiro 72.06% y para el carrizo 71.75%. En este caso no existe una diferencia significativa.

**Gráfico 22. Porcentajes de variación de Nitrógeno Amoniacal.**



Elaboración: Autoras

#### 5.2.1.12 Análisis de Fósforo Total

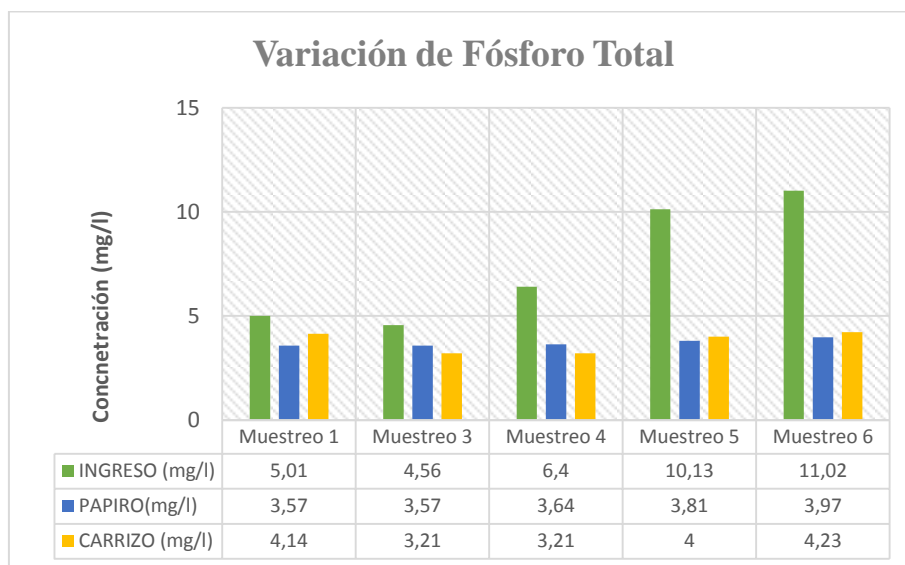
En el gráfico 23, se ilustra la concentración de fósforo total de entrada con respecto a la concentración de salida de cada humedal. Se observa que en cada muestreo la concentración de ingreso se va incrementado y al mismo tiempo las concentraciones de salida logran valores bajos.

Los valores del afluente en todos los muestreos, excepto en los muestreos 5 y 6, se encuentran debajo el LMP (10 mg/l) establecido en el TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Tabla 12, Límites de descarga de un cuerpo de agua dulce. Los valores del efluente de cada humedal también están debajo del LMP.

En el muestreo 1 el humedal carrizo, se presenta la menor cantidad de remoción, reduciéndose de 5.01 mg/l en 0.87 mg/l. El muestreo 6 se observa la concentración de fósforo más elevada en el agua de ingreso, pero es el que mayor remoción posee, se reduce de 11.02 mg/l en 7.05 mg/l con el papiro y en 6.79 mg/l con el carrizo.

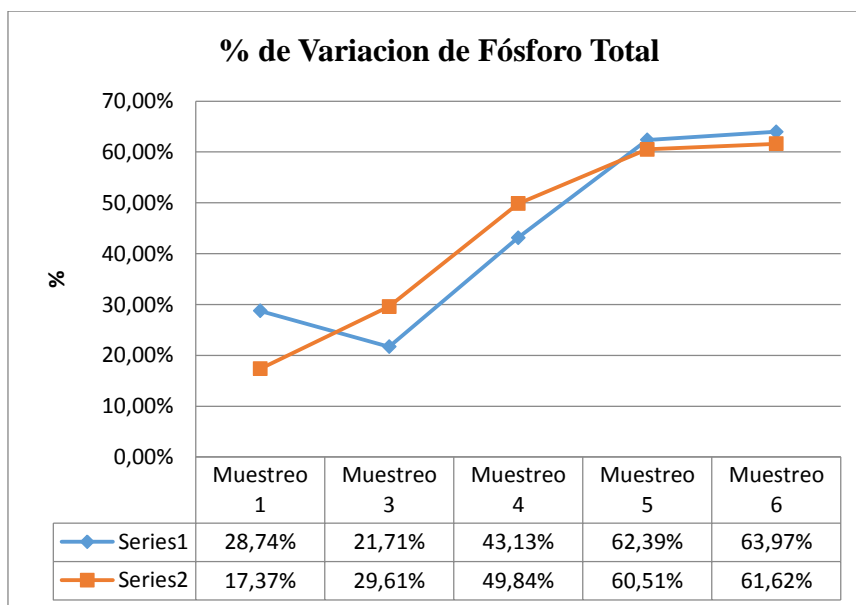


**Gráfico 23. Concentración de Fósforo Total.**



Elaboración: Autoras

**Gráfico 24. Porcentaje de variación de Fósforo Total.**



Elaboración: Autoras

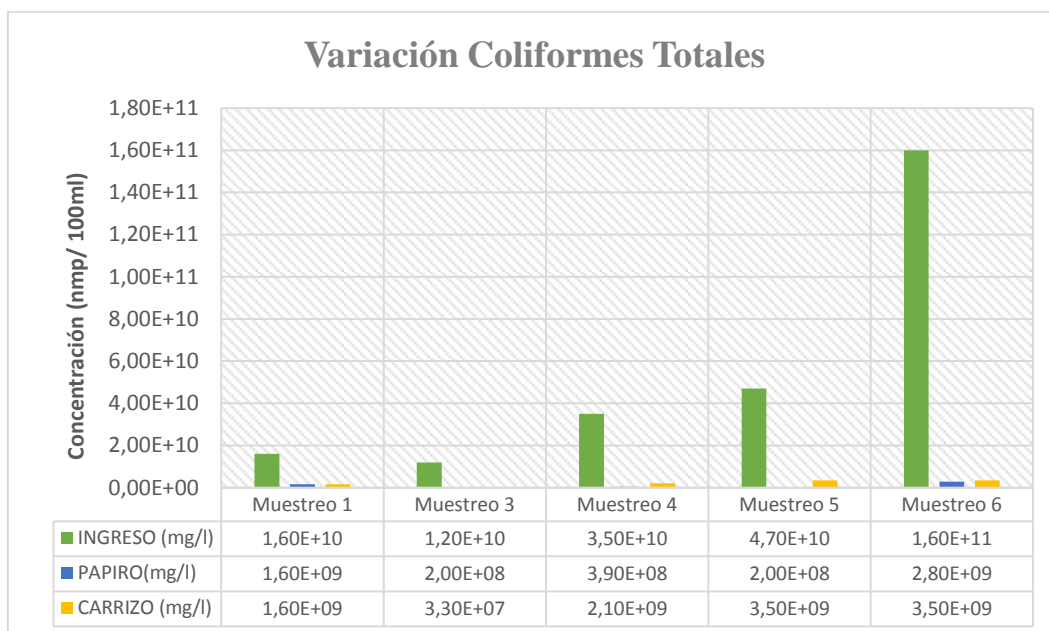
De acuerdo a la revisión bibliográfica, el porcentaje de remoción de fósforo en humedales artificiales, se encuentra entre 30-50%. Los datos obtenidos evidencian que la reducción del fósforo es muy efectiva, en este caso a partir del muestreo 4, superando el 30% de remoción y alcanza hasta el 63.97% en el muestreo 6 en el humedal con papiro. En los muestreos 1 y 3 se presentan valores bajo el 30% de remoción en los dos humedales, llegando a tan solo a 17.37% en el humedal con carrizo.

### 5.2.1.13 Análisis Coliformes Totales

En el gráfico 25, se ilustra la concentración de coliformes totales de entrada con respecto a la concentración de salida de cada humedal. Se observa los seis muestreos la reducción de coliformes totales desde uno hasta tres logaritmos.

Se evidencia la mayor remoción en el muestreo 3 en el humedal con carrizo, se reduce de  $1.20\text{E}+10$  mg/l a  $3.30\text{E}+07$  mg/l. En el muestreo 1 en los humedales, se presenta la reducción de un solo logaritmo. En el muestreo 6, existe la mayor concentración de coliformes totales, se reduce en dos logaritmos los valores de salida de cada humedal.

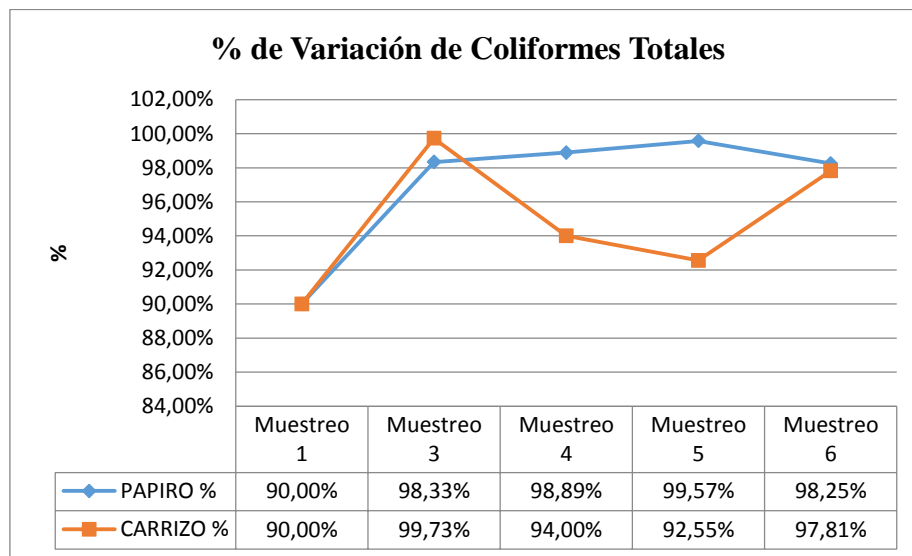
**Gráfico 25. Concentración de Coliformes Totales.**



Elaboración: Autoras

En el gráfico 26, se muestra la comparación de los porcentajes de remoción de cada especie para coliformes totales. Los porcentajes de remoción del humedal con papiro se encuentran entre 90% (valor más bajo) y 99.57% (valor más alto). Los porcentajes de remoción del humedal con carrizo se encuentran entre 90% (valor más bajo) y 99.73 % (valor más alto). De las dos especies el que posee mayor remoción de coliformes totales es el papiro, se evidencia en los porcentajes de cada muestro, excepto en el muestreo 3 el carrizo representa el valor más alto de remoción.

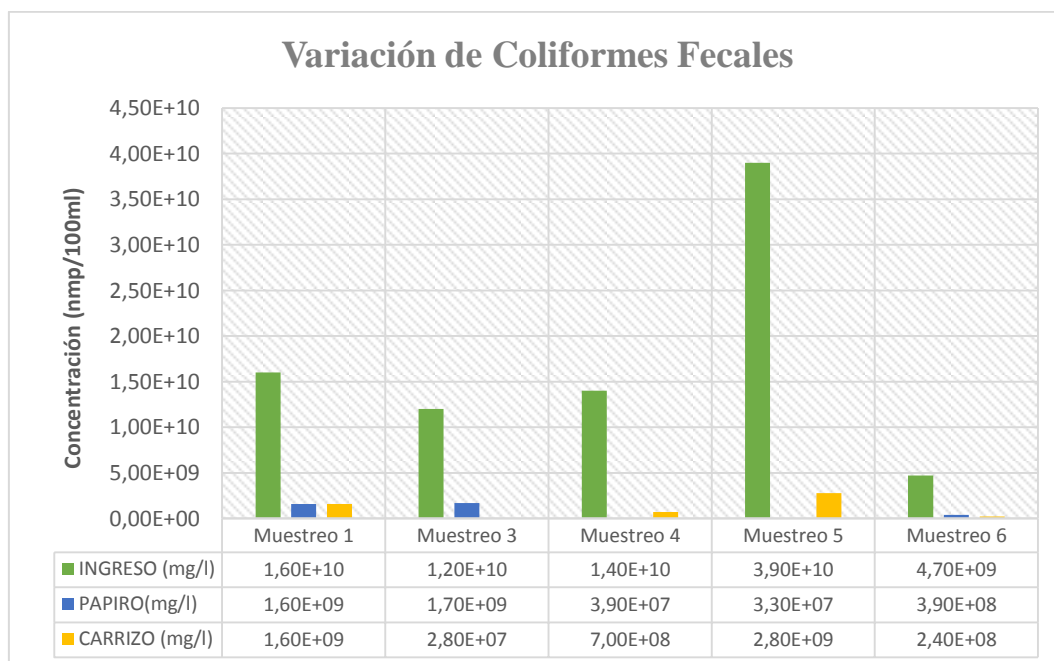
**Gráfico 26. Porcentajes de variación de Coliformes Totales.**



Elaboración: Autoras

#### 5.2.1.14 Análisis de Coliformes Fecales

**Gráfico 27. Concentración de Coliformes Fecales.**

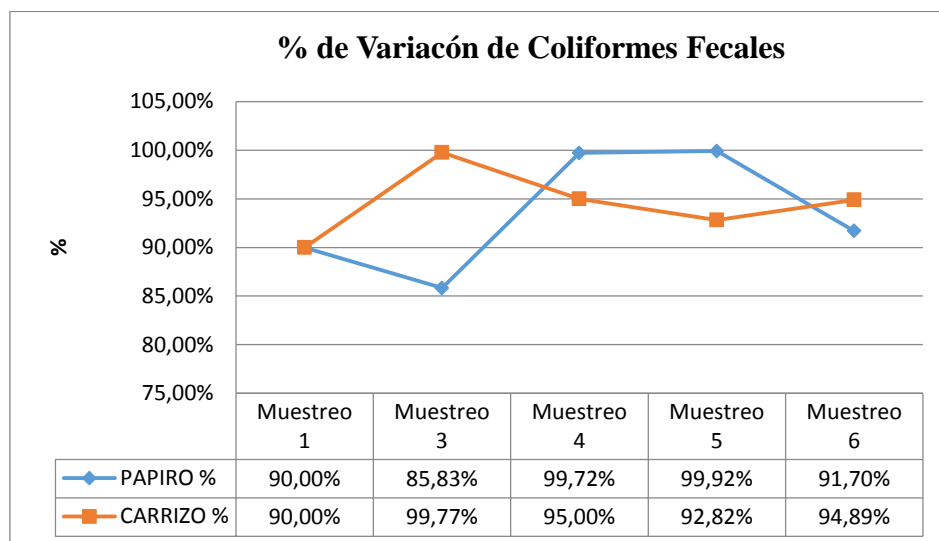


Elaboración: Autoras

En el gráfico 27, se observa la reducción de la concentración de coliformes fecales, de uno a tres logaritmos. Los niveles más altos de coliformes fecales en el afluente se presentaron en el muestreo 5 con un valor de 3.9E+10 mg/l y se reducen en tres logaritmos (3.30E+07 mg/l) en humedal con papiro. En el muestreo 1 con las dos especies y en el muestreo 3 el humedal con papiro,

son los que representan la menor cantidad de remoción, se reduce solo un logaritmo. El declive de la población de coliformes se debe a la filtración, sedimentación, adsorción, absorción de la vegetación.

**Gráfico 28. Porcentajes de variación de Coliformes Fecales.**



Elaboración: Autoras

En el gráfico 28, se muestra la comparación de los porcentajes de remoción en cada humedal para coliformes fecales. En el muestreo 3 en el humedal con papiro, se observa el menor porcentaje de remoción con un valor de 85.83%, seguidos en el muestreo 1 con un valor del 90% en los dos humedales. En los demás muestreos con ambas especies, se aprecia una remoción mayor al 90%, alcanzando en el muestreo 5 el porcentaje más elevado de 99.92% en humedal con papiro. Los porcentajes de remoción en los dos humedales no se diferencian significativamente, excepto en el muestreo 3.

En el TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Tabla 12, Límites de descarga de un cuerpo de agua dulce, establece para coliformes fecales un valor de remoción mayor al 99%; por lo tanto el humedal con papiro supera este valor en los muestreos 4 y 5, mientras que con el carrizo en el muestreo 3 y para todos los demás muestreos los valores están próximos al criterio de referencia.

### 5.2.2 Comparación con la Normativa Ambiental TULSMA

En la presente Tabla 5, evaluamos los resultados obtenidos en todos los muestreos, pero tomando el valor de la media aritmética de cada uno de los



parámetros para compararlo con la legislación ambiental TULSMA, Libro VI, Anexo 1: Tabla 6, criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola, con el posible uso que se le podría dar a las aguas provenientes del presente estudio para el riego de sembríos cercanos a la zona de implantación del proyecto; y la Tabla 12, límites de descarga a cuerpos de agua dulce.

Tabla 8. Promedio de los resultados y comparación con el TULSMA.

Parámetros	Unidades	MEDIA ARITMÉTICA			LÍMITE PERMISIBLE DE DESCARGA		OBSERVACIONES
		INGRESO	PAPIRO	CARRIZO	Agua Dulce	Uso Agrícola	
pH	pH	6.95	6.31	6.21	5-9		Cumple
Alcalinidad	(mg/l, CaCO <sub>3</sub> )	175.84	68.80	62.60			No existe
Conductividad	µS/cm	643.25	633.67	608.50		400000000	Cumple
Sólidos Totales	mg/l	450.00	535.33	429.83	1600		Cumple
Sólidos Totales Disueltos	mg/l	361.17	475.33	396.83		3000	Cumple
Sólidos Suspendidos	mg/l	88.83	60.00	33.00	100		Cumple
DBO <sub>5</sub>	mg/l	95.75	18.49	23.57	100		Cumple
DQO	mg/l	222.45	67.02	78.35	250		Cumple
Nitratos	mg/l	0.81	7.16	8.35	10		Cumple
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	29.53	8.95	8.65			No existe
Fósforo Total	mg/l	7.42	3.71	3.76	10		Cumple
Coliformes Totales	NMP/100ml	5.4E+10	1.038E+09	2.147E+09		1000	No Cumple*
Coliformes Fecales	NMP/100ml	1.71E+10	7.52E+08	1.074E+09	Remoción > 99,9%		No Cumple*

Elaboración: Autoras

\*En el caso de los coliformes totales y fecales al realizar un promedio general se observa que no cumple con la normativa, sin embargo en los gráficos 26 y 28 se evidencia porcentajes de remoción mayores al 90%.

Se observa que para los parámetros pH, conductividad, sólidos totales disueltos y suspendidos, DBO<sub>5</sub>, DQO, nitratos y fósforo total si cumple con la normativa; por lo contrario con los parámetros coliformes fecales y totales no cumple con la normativa, y por ultimo para parámetros como alcalinidad y





nitrógeno amoniacal no existe valores límites establecidos en la normativa, tanto para descarga a fuentes de agua dulce como para uso agrícola.



## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente investigación se implementó humedales a escala piloto, en donde se construyó dos unidades experimentales, una para papiro y otra para carrizo; las mismas que se implantaron en los predios junto a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “El Guabo”. Su diseño cumple con la mayoría de los criterios establecidos para la construcción de humedales artificiales de flujo vertical. Es decir, cumple con la profundidad (50 a 80 cm), impermeabilización (uso de geomebrana), plantación (3 plantas por m<sup>2</sup>). En el caso del sustrato, se utilizó diferentes tamaños de material granulométrico, de las cuales una de las capas contenía impurezas, lo que pudo aportar materia orgánica en el medio filtrante; y en el caso de la pendiente, posee un valor superior al establecido en la literatura (1-2%), lo que disminuyó el tiempo de retención hidráulica.

El estudio realizado muestra que el carrizo presenta valores de remoción en los siguientes parámetros: alcalinidad, conductividad, sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos; mientras que el papiro presenta mayor remoción en los parámetros de DBO<sub>5</sub>, DQO, nitrógeno amoniacal, fósforo, coliformes totales y fecales. En el caso del nitrato, existe un mayor incremento en su concentración a la salida del humedal con papiro. En las dos unidades experimentales la variación de pH y temperatura no son representativas y se mantienen dentro de los límites permisibles establecidas en la normativa ambiental.

Durante el periodo de experimentación la concentración de sólidos se ha incrementado, esto es representativo en el muestreo 4 (27 de mayo), debido a que dichas fechas se presentó una fuerte temporada de lluvia lo que provocó el deslizamiento de masas de tierra que ingresaron a los dos humedales, lo que llevó a realizar la limpieza del medio filtrante. Como resultado de esta actividad el carrizo se recuperó su acción depuradora. Al existir una relación directa entre la concentración de sólidos y la conductividad, por lo que el incremento de sólidos influyó en el aumento de valores de conductividad.



Con relación a la  $DBO_5$  y DQO el papiro representa mayor remoción en comparación con el carrizo. En primer lugar esto se debe por la estructura de los tallos, el papiro posee una estructura porosa mientras que el carrizo los tallos mayores no poseen parénquima. En segundo lugar por el tipo de raíz, en el papiro no se desarrollan raíces profundas y forman una especie de redes lo cual nos dificultó el lavado de filtro, pero esto ha garantizado una mayor cobertura de área radicular, a su vez permite una mayor oxigenación del sistema; en el caso carrizo las raíces se desarrollan de forma vertical, al no ocupar mayor área horizontal aumenta la conductividad hidráulica en comparación al papiro, lo que hace que la depuración sea en capas más profundas por lo tanto no garantiza remoción de contaminantes debido al tamaño del material granular.

Al ser un sistema aerobio y de flujo vertical cumple con el proceso de nitrificación, en donde el papiro es más eficiente, debido a que alcanza mayor nitrificación que el carrizo.

El sistema presentó problemas de encharcamiento, siendo más visible en el humedal con papiro. En primer lugar el encharcamiento podría ser a causa a la forma de extenderse de las raíces, del papiro en forma horizontal y poco profunda; aunque este problema también se presentó en el humedal con carrizo, pero en pocas ocasiones. A esto se adiciona el problema de construcción en cuanto a la pendiente, que poseía un valor superior al recomendado.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda la construcción del humedal con papiro debido a que alcanza rendimientos altos en el proceso de depuración de la mayoría de contaminantes presentes en aguas residuales urbanas o domésticas. Otra de las ventajas de esta especie, es que puede soportar temperaturas entre 20 y 33°C, es decir, que puede adaptarse a zonas cálidas; adicionalmente por su capacidad de proliferación, lo realiza en un tiempo menor en comparación al carrizo. También por su facilidad para realizar la poda, y un aporte importante por su valor paisajístico.



## Recomendaciones

- En la construcción se debe respetar los parámetros de diseño, en especial la pendiente, ya que este determinará el tiempo de retención hidráulica en el sistema.
- Para la instalación del filtro se recomienda que el material sea previamente bien lavado libre de impurezas, para prevenir el incremento de sedimentos y materia orgánica en los resultados finales.
- El agua de ingreso a los sistemas no debería contener alta concentración de sólidos orgánicos e inorgánicos, que ocasionen la colmatación del filtro y produzca encharcamiento en la superficie y provocando un tratamiento anaerobio de las aguas residuales.
- Se recomienda para futuros estudios se realicen análisis de tejidos de especies utilizadas en el tratamiento para verificar la acumulación de contaminantes en las mismas.
- Se recomienda realizar un estudio sobre la cantidad de oxígeno transferido a zona radicular para cada tipo de planta a utilizarse, con el objetivo de determinar el oxígeno disponible en la superficie de las raíces para remoción del nitrógeno.



## BIBLIOGRAFÍA

- Alianza por el agua. (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*.  
Obtenido de <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>
- Álvarez, J., & Bécares, E. (2008). El papel de la vegetación en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Instituto de Medio Ambiente (IMA), Universidad de León, Calle de La Serna, 56(24007), 24–28.
- Arias, C. A., & Brix, H. (2011). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencias e Ingeniería Neogranadina*, (13), 17–24.
- Berland, J. M., Boutin, C., Molle, P., & Cooper, P. (2001). *Guía para procesos extensivos de depuración de aguas residuales adaptadas a pequeñas y medianas colectividades*. Obtenido de [http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/info/pdf/waterguide\\_es.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/info/pdf/waterguide_es.pdf)
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water science and technology*, 35(5), 11–17.
- Cano, A. L. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). En *Ecología, manejo y conservación de los humedales* (pp. 99–112). Instituto de Estudios Almerienses. Recuperado a partir de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2244838.pdf>
- Carpio Vallejo, D. E. (2013). *Análisis de eficiencia de fitorremediación de dos plantas nativas del Oriente Ecuatoriano para tratamiento de aguas grises y negras en humedales artificiales el el campamento Amo 1, bloque 16*.
- Castellón Zelaya , M. (Septiembre de 2012). *Desarenadores Convencionales* . Obtenido de <http://es.slideshare.net/mariocastellon/desarenadores-convencionales-en-microcentrales-hidroelctricas>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade , M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. . Cochabamba, Bolivia.
- García, J., Morató, J and Bayona, J.M. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. *QUIMICA UNIVERSAL* - Vol.8: 84-87. ISSN: 1697-8854. 2005.
- García Palacios , J. A. (Enero de 2010). *Feti del uso de las plantas y configuración de los sistemas en la remoción de organismos patógenos mediante el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales en condiciones tropicales*. Recuperado el 16 de 12 de 2014
- García Rubio , D. A., & Leal Correa, D. C. (2006). Desarrollo de un humedal artificial piloto con especies no convencionales para mitigar la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del centro de visitantes del Parque Nacional Natural Amayacu-Amazonas. Bogotá D.C., Colombia.
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Recuperado a partir de <http://upcommons.upc.edu/e-prints/handle/2117/2474>
- Hernández Muñoz, A., Hernández Lehmann, A., & Galán Martínez , P. (1996). *Manual de depuración de Uralita. Sistemas para depuracion de aguas residuales en núcleos de hasta 20000 habitantes*. Madrid : PARANINFO S.A.





- Hidalgo, J., Montano, J. J., & Estrada, M. S. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14(1), 17–25.
- IGME. (1995). Nuevas tecnologías para el saneamiento, depuración y reutilización de las aguas residuales en la provincia de Alicante. Recuperado 15 de febrero de 2015, a partir de <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro33/lib33.htm>
- Llagas Chafloque, W. A., & Guadalupe Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr*, 9(17), 85–96.
- Marín Ocampo , A., & Osés Pérez, M. (2013). *Operación y mantenimiento de plantas de aguas residuales con el proceso de lodos activados. Tomo I*. Obtenido de [http://www.ceajalisco.gob.mx/publicaciones/pdf/plantas\\_tratam\\_tomo1.pdf](http://www.ceajalisco.gob.mx/publicaciones/pdf/plantas_tratam_tomo1.pdf)
- Olivos Lara, O. E. (2010). *Tratamiento de aguas. Capítulo V: Tratamiento primario*. Obtenido de <http://www.uap.edu.pe/intranet/fac/material/24/20102BT240224E10240108011/20102BT240224E1024010801120689.pdf> )
- ONU-HABITAT. (2008). *Manual de humedales artificiales*. . Katmandú, Nepal.
- Orozco, A. (2005). Bioingeniería de Aguas Residuales. acodal.
- Osnaya Ruiz, M. (febrero de 2012). *Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juárez*.
- Ovotny, V. and H. Olem. 1994. Water Quality: Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution. New York: Van Nostrand Reinhold. 1,054 pp.
- Peña Varón, M. R., Van Ginneken, M., & Madera P, C. A. (2011). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 5(1), 27-35.
- Pérez Pardo , C. (Julio de 2012). *Diseño y cálculo del tratamiento secundario mediante aireación prolongada de una EDARU*. Obtenido de [http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16081/PFC\\_Carlos\\_Perez\\_Pardo.pdf?sequence=1](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16081/PFC_Carlos_Perez_Pardo.pdf?sequence=1)
- Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Santa Isabel. (2015).
- Rodriguez-Monroy, J., & Durán de Bazúa, C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnol. Ciencia Ed*, 21, 25–33.
- Rojas , R. (Septiembre de 2002). *Sistemas de tratamiento de aguas residuales* . Obtenido de [http://dateca.unad.edu.co/contenidos/301332/CORE\\_2013/Actividad\\_8.pdf](http://dateca.unad.edu.co/contenidos/301332/CORE_2013/Actividad_8.pdf)
- Rolim Mendoza, S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización: Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío*. Santa Fe de Bogotá, D.C., Colombia: McGraw Hill.
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167.
- Romero Rojas , J. A. (2008). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.



Romero Rojas , J. A. (2012). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela de Ingenieros.

Romero Rojas , J. A. (2013). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

SALT, D.E.; KRÄMER, U.; SMITH, R.D. y RASKIN, I. 2000. The role of root exudates in nickel hyperaccumulation and tolerance in accumulator and nonaccumulator species of *Thlaspi*. In: TERRY, N.; BAÑUELOS, G. (Ed.). *Phytoremediation of contaminated soil and water*. Boca Raton: Lewis Publishers, p.189-200.

Valencia Montoya, Guillermo. (2009). *Tratamientos primarios* [Documento de Trabajo]. Recuperado 20 de noviembre de 2015, a partir de <http://bvs.per.paho.org/bvsacd/scan2/010439/010439-05.pdf>

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, 380(1), 48–65

## CAPITULO VII

### ANEXOS

#### Anexo 1. Resultado de los análisis del muestreo 1, correspondiente al 29 de Abril de 2015.

##### LABORATORIO DE SANITARIA

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO-QUIMICO Y BACTERIOLÓGICO DE AGUA	
Muestra procedencia:	Planta de Tratamiento de Agua Residual de Santa Isabel - Azuay
Tipo de fuente:	Agua Residual
Fecha de toma:	29 de Abril de 2015
Fecha de análisis:	29 de Abril de 2015
Análisis solicitado por:	GAD Municipalidad de Santa Isabel

PARAMETROS	Salida de la Laguna de Maduración	Humedal con papiro	Humedal con carrizo	UNIDAD	OBSERVACIONES
Hora					
<b>Parámetros Físicos</b>					
CONDUCTIVIDAD	680,0	545,0	521,0	microsiemens/ cm	
<b>Parámetros Químicos</b>					
PH	6,79	6,19	5,96		
ALCALINIDAD TOTAL	210,2	126,6	111,6	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
ALCALINIDAD FENOLFTALEINA	0,0	0,0	0,0	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
N. NITRATOS	0,605	2,105	7,615	mg/l	como Nitrógeno
N. AMONICAL	22,30	3,30	2,40	mg/l	como Nitrógeno
FOSFORO TOTAL	5,01	3,57	4,14	mg/l	como Fósforo
FOSFORO REACTIVO	5,5	2,8	2,8	mg/l	como Fósforo
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	102,5	31,97	51,9	mg/l	
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	205,04	90,89	79,04	mg/l	
SOLIDOS TOTALES	427,0	395,0	49,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES FIJOS	179,0	184,0	26,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES VOLATILES	248,0	211,0	23,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	372,0	337,0	27,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS FIJOS	169,0	143,0	16,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS VOLATILES	203,0	194,0	11,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	55,0	58,0	22,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS	10,0	41,0	10,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES	45,0	17,0	12,0	mg/l	
<b>Parámetros Bacteriológicos</b>					
COLIFORMES TOTALES	1,60E+10	1,60E+09	1,60E+09	NMP/100 ml	24H- 37°C.
E. COLI	1,60E+10	1,60E+09	1,60E+09	NMP/100 ml	24H- 37°C.

Responsable

  
Dra. Guillermina Pauta C.  
Químico-Analista

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
LABORATORIO DE  
ING. NITRÍA SANITARIA

**Anexo 2. Resultado de los análisis del Muestreo 2, correspondiente al 13 de Mayo de 2015.**

**LABORATORIO DE SANITARIA**

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO-QUIMICO Y BACTERIOLÓGICO DE AGUA	
Muestra procedencia:	Planta de Tratamiento de Agua Residual de Santa Isabel.- Azuay
Tipo de fuente:	Agua Residual
Fecha de toma:	13 de Mayo de 2015
Fecha de análisis:	13 de Mayo de 2015
Análisis solicitado por:	GAD Municipalidad de Santa Isabel

PARAMETROS	Salida de la Laguna de Maduración	Humedal con papiro	Humedal con carrizo	UNIDAD	OBSERVACIONES
Hora					
Parámetros Físicos					
CONDUCTIVIDAD	772,0	634,0	665,0	microsiemens/ cm	
Parámetros Químicos					
PH	6,94	6,32	6,45		
N.AMONIACAL	35,56	11,65	13,83	mg/l	como Nitrógeno
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	89,5	16,85	22,3	mg/l	
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	280,00	68,00	100,00	mg/l	
SOLIDOS TOTALES	457,0	549,0	472,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES FIJOS	254,0	388,0	343,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES VOLATILES	203,0	161,0	129,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	379,0	405,0	390,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS FIJOS	229,0	273,0	280,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS VOLATILES	150,0	132,0	110,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	78,0	144,0	82,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS	25,0	115,0	63,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES	53,0	29,0	19,0	mg/l	

Responsable



Dra. Guillermina Pauta C.  
Químico-Analista



### Anexo 3. Resultado de los análisis del Muestreo 3, correspondiente al 20 de Mayo de 2015.

#### LABORATORIO DE SANITARIA

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO-QUIMICO Y BACTERIOLÓGICO DE AGUA	
Muestra procedencia:	Planta de Tratamiento de Agua Residual de Santa Isabel.- Azuay
Tipo de fuente:	Agua Residual
Fecha de toma:	20 de Mayo de 2015
Fecha de análisis:	20 de Mayo de 2015
Análisis solicitado por:	GAD Municipalidad de Santa Isabel

PARAMETROS	Salida de la Laguna de Maduración	Humedal con papiro	Humedal con carrizo	UNIDAD	OBSERVACIONES
Hora					
<b>Parámetros Físicos</b>					
CONDUCTIVIDAD	537,0	472,0	590,0	microsiemens/ cm	
<b>Parámetros Químicos</b>					
PH	7,02	6,65	6,69		
ALCALINIDAD TOTAL	167,0	64,2	58,6	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
ALCALINIDAD FENOLFTALEINA	0,0	0,0	0,0	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
N. NITRATOS	1,442	10,420	10,080	mg/l	como Nitrógeno
N. AMONIACAL	19,66	2,24	5,88	mg/l	como Nitrógeno
FOSFORO TOTAL	4,56	3,57	3,21	mg/l	como Fósforo
FOSFORO REACTIVO	3,1	2,2	2,7	mg/l	como Fósforo
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	39,0	18,60	22,2	mg/l	
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	139,44	71,72	83,66	mg/l	
SOLIDOS TOTALES	354,0	521,0	509,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES FIJOS	219,0	311,0	208,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES VOLATILES	135,0	210,0	301,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	302,0	441,0	466,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS FIJOS	205,0	256,0	187,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS VOLATILES	97,0	185,0	279,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	52,0	80,0	43,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS	14,0	55,0	21,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES	38,0	25,0	22,0	mg/l	
<b>Parámetros Bacteriológicos</b>					
COLIFORMES TOTALES	1,20E+10	2,00E+08	3,30E+07	NMP/100 ml	24H- 37°C.
E. COLI	1,20E+10	1,70E+08	2,80E+07	NMP/100 ml	24H- 37°C.

Responsable

  
Dra. Guillermina Paula C.  
Químico-Analista



## Anexo 4. Resultado de los análisis del Muestreo 4, correspondiente al 20 de Mayo de 2015

### LABORATORIO DE SANITARIA

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO-QUIMICO Y BACTERIOLÓGICO DE AGUA	
Muestra procedencia:	Planta de Tratamiento de Agua Residual de Santa Isabel.- Azuay
Tipo de fuente:	Agua Residual
Fecha de toma:	27 de Mayo de 2015
Fecha de análisis:	27 de Mayo de 2015
Análisis solicitado por:	GAD Municipalidad de Santa Isabel

PARAMETROS	Salida de la Laguna de Maduración	Humedal con papiro	Humedal con carrizo	UNIDAD	OBSERVACIONES
Hora					
<b>Parámetros Físicos</b>					
CONDUCTIVIDAD	602,5	1072,0	841,0	microsiemens/ cm	
<b>Parámetros Químicos</b>					
PH	6,97	6,25	5,91		
ALCALINIDAD TOTAL	199,2	17,4	18,0	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
ALCALINIDAD FENOLFTALEINA	0,0	0,0	0,0	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
N. NITRATOS	1,369	9,384	9,208	mg/l	como Nitrógeno
N. AMONIAICAL	30,63	3,30	20,60	mg/l	como Nitrógeno
FOSFORO TOTAL	60,4	3,64	3,21	mg/l	como Fósforo
FOSFORO REACTIVO	4,27	2,73	2,33	mg/l	como Fósforo
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	84,0	16,00	15,6	mg/l	
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	215,13	71,71	79,68	mg/l	
SOLIDOS TOTALES	369,0	923,0	851,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES FIJOS	188,0	297,0	323,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES VOLATILES	181,0	626,0	528,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	306,0	872,0	818,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS FIJOS	172,0	261,0	308,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS VOLATILES	134,0	611,0	510,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	63,0	51,0	33,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS	16,0	36,0	15,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES	47,0	15,0	18,0	mg/l	
<b>Parámetros Bacteriológicos</b>					
COLIFORMES TOTALES	3,50E+10	3,90E+08	2,10E+09	NMP/100 ml	24H- 37°C.
E. COLI	1,40E+10	3,90E+07	7,00E+08	NMP/100 ml	24H- 37°C.

Responsable



Dra. Guillermina Pauta C.



## Anexo 5. Resultado de los análisis del Muestreo 5, correspondiente al 04 de Junio de 2015.

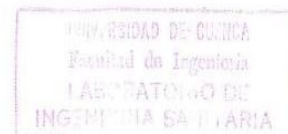
### LABORATORIO DE SANITARIA

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO-QUIMICO Y BACTERIOLOGICO DE AGUA	
Muestra procedencia:	Planta de Tratamiento de Agua Residual de Santa Isabel.- Azuay
Tipo de fuente:	Agua Residual
Fecha de toma:	04 de Junio de 2015
Fecha de análisis:	04 de Junio de 2015
Análisis solicitado por:	GAD Municipalidad de Santa Isabel

PARAMETROS	Agua Cruda	Salida de la Laguna de Maduración	Humedal con papiro	Humedal con carrizo	UNIDAD	OBSERVACIONES
Hora						
Parámetros Físicos						
CONDUCTIVIDAD	604	627,0	548,0	512,0	microsiemens/ cm	
Parámetros Químicos						
PH	7,2	6,93	5,86	5,98		
ALCALINIDAD TOTAL	154,4	176,8	23	62,4	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
ALCALINIDAD FENOLFTALEINA	0,0	0,0	0,0	0,0	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
N. NITRATOS	0,27	0,33	9,96	10,13	mg/l	como Nitrógeno
N. AMONIAL	33,1	38,90	20,80	11,90	mg/l	como Nitrógeno
FOSFORO TOTAL	6,54	10,13	3,81	4,00	mg/l	como Fósforo
FOSFORO REACTIVO	3,38	4,25	3,72	3,81	mg/l	como Fósforo
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	226,0	102,0	9,02	6,6	mg/l	
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	318,72	235,06	55,78	67,73	mg/l	
SOLIDOS TOTALES		629,0	486,0	353,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES FIJOS		322,0	217,0	209,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES VOLATILES		307,0	269,0	144,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES		480,0	478,0	349,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS FIJOS		243,0	215,0	208,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS VOLATILES		237,0	263,0	141,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES		149,0	8,0	4,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS		79,0	2,0	1,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES		70,0	6,0	3,0	mg/l	
Parámetros Bacteriológicos						
COLIFORMES TOTALES	1,6E+11	4,70E+10	2,00E+08	3,50E+09	NMP/100 ml	24H- 37°C.
E. COLI	3,50E+10	3,90E+10	3,30E+07	2,80E+09	NMP/100 ml	24H- 37°C.

Responsable

  
Dra. Guillermina Pautá C.  
Químico-Analista





## Anexo 6. Resultado de los análisis del Muestreo 6, correspondiente al 10 de Junio de 2015.

### LABORATORIO DE SANITARIA

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO-QUIMICO Y BACTERIOLÓGICO DE AGUA	
Muestra procedencia:	Planta de Tratamiento de Agua Residual de Santa Isabel.- Azuay
Tipo de fuente:	Agua Residual
Fecha de toma:	10 de Junio de 2015
Fecha de análisis:	10 de Junio de 2015
Análisis solicitado por:	GAD Municipalidad de Santa Isabel

PARAMETROS	Salida de la Laguna de Maduración	Humedal con papiro	Humedal con carrizo	UNIDAD	OBSERVACIONES
Hora					
<b>Parámetros Físicos</b>					
CONDUCTIVIDAD	641,0	531,0	522,0	microsiemens/ cm	
<b>Parámetros Químicos</b>					
PH	7,06	6,58	6,26		
ALCALINIDAD TOTAL	126,2	112,8	62,4	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
ALCALINIDAD FENOLFTALEINA	0,0	0,0	0,0	mg/l, CaCO <sub>3</sub>	
N. NITRATOS	0,31	3,94	4,72	mg/l	como Nitrógeno
N. AMONIAL	30,10	12,40	15,30	mg/l	como Nitrógeno
FOSFORO TOTAL	11,02	3,97	4,23	mg/l	como Fósforo
FOSFORO REACTIVO	4,58	3,83	3,96	mg/l	como Fósforo
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	157,5	18,5	22,8	mg/l	
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	260,0	44,0	60,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES	464,0	338,0	345,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES FIJOS	271,0	161,0	189,0	mg/l	
SOLIDOS TOTALES VOLATILES	193,0	177,0	156,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	328,0	319,0	331,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS FIJOS	202,0	159,0	188,0	mg/l	
SOLIDOS DISUELTOS VOLATILES	126,0	160,0	143,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	136,0	19,0	14,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS	69,0	2,0	1,0	mg/l	
SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES	67,0	17,0	13,0	mg/l	
<b>Parámetros Bacteriológicos</b>					
COLIFORMES TOTALES	1,60E+11	2,80E+09	3,50E+09	NMP/100 ml	24H- 37°C.
E. COLI	4,70E+09	3,90E+08	2,40E+08	NMP/100 ml	24H- 37°C.

Responsable

  
Dra. Guillermina Pauta C.  
Químico-Analista

