

Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACION

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

**“DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRES ESPECIES MACRÓFITAS PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS”**

**TESIS PARA OPTAR
TÍTULO PROFESIONAL INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR

MELLADO DELGADO, GABRIELA

ASESOR

DR. JHON WALTER GÓMEZ LORA

JURADO

DR. EDWIN JAIME GALARZA ZAPATA

DR. ZAMORA TALAVERANO NOÉ SABINO

Mg. BENIGNO PAULO GÓMEZ ESCRIBA

Ing. GLADYS ROJAS LEÓN

LIMA - PERU

2019

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación, lo dedico a mi querida madre Sofia Delgado Villafuerte por su apoyo incondicional, por el gran amor tan grande que me brinda desde siempre, por su compañía en cada paso que doy, inculcándome a ser responsable y mejor persona. A mi padre, Jesús Sánchez Villafuerte quien gracias a su esfuerzo me apoyo e hizo también posible que este alcanzando mis objetivos. A mi abuelito, Braulio Mellado Escalante, quien desde el cielo me brinda las fuerzas necesarias para continuar en este camino; en vida siempre fue quien me protegía y me cuidaba de todo lo malo y cada meta cumplida era una inmensa satisfacción para él. A mi abuelita, Maruja Sánchez Villafuerte quien me apoya y brinda su atención en todo momento, preocupándose por mi bienestar cada día.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco inmensamente a Dios por otorgarme la vida, pues yo sé que Él siempre está conmigo protegiéndome.

A mi madre Sofía Delgado Villafuerte, quien siempre está conmigo apoyándome y no fue la excepción esta vez ya que fue quién me apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

A mi familia, por su apoyo y consejos en cada paso que doy.

A mi asesor, Dr. Walter Gómez Lora, quien me brindó su apoyo y tiempo en el desarrollo de la investigación.

Al profesor Ing. Omar Vásquez, quien me dio las facilidades para el uso del laboratorio de Aguas de la FIGAE y me brindó los conocimientos para el desarrollo práctico y metodológico de la presente investigación.

A todas las personas que forman parte de mi vida quienes me apoyaron y apoyan desinteresadamente para cumplir mis objetivos.

RESUMEN

En la presente investigación, se da a conocer a los humedales artificiales de flujo subsuperficial como una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Para ello, se determinó las eficiencias de tres especies macrofitas: *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) sembrados en tres sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales; las muestras de agua residual se obtuvieron de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Maria Reiche del distrito de Miraflores y fueron tomadas a la salida de la unidad de Pre - Tratamiento. Se instaló un reservorio para el almacenamiento y distribución del agua residual hacia los sistemas de humedales. La especie *Typha domingensis* (totora) fue sembrada en el primer sistema (H₁); la especie *Phragmites australis* (carricillo), en el segundo sistema (H₂); y la especie *Schoenoplectus americanus* (junco), en el tercer sistema (H₃). El tiempo de retención en cada sistema fue de 48 horas. Se determinó la calidad del agua residual antes del ingreso a los humedales y a la salida en cada sistema. La eficiencia de remoción de la Demanda Bioquímica Oxígeno (DBO) fue de 86.7 %, 83.4 % y 87 % para *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) respectivamente; para la DQO se obtuvo, 70.37%, 72.85 % y 70.12 % en cada uno; para el caso de los Fosfatos, 43.89 %, 35.91 % y 47.96 %; para los Aceites y grasas, 97.10 %, 95.91 % y 96.90 %. Otros parámetros analizados (parámetros básicos, Amonio, SST,) mostraron valores aceptables a la salida de los sistemas.

Palabras claves: aguas residuales domésticas, humedal artificial, tratamiento, *Typha domingensis*, *Phragmites australis*, *Schoenoplectus americanus*

ABSTRACT

In the present investigation, artificial wetlands of subsurface flow are presented as an alternative for the treatment of domestic wastewater. For this, the efficiencies of three macrophyte species were determined: *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) and *Schoenoplectus americanus* (junco) planted in three systems of artificial wetlands of subsurface flow for the treatment of wastewater; the samples of residual water were obtained from the Domestic Wastewater Treatment Plant of Miraflores and were taken at the exit of the Pre-treatment unit. A reservoir was installed for the storage and distribution of wastewater to the wetland systems. The species *Typha domingensis* (totora) was planted in the first system (H₁); the species *Phragmites australis* (carricillo), in the second system (H₂); and the species *Schoenoplectus americanus* (junco), in the third system (H₃). The retention time in each system was 48 hours. The quality of the wastewater was determined before entering the wetlands and at the exit in each system. The removal efficiency of the Biochemical Oxygen Demand (BOD) was 86.7%, 83.4% and 87% for *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) and *Schoenoplectus americanus* (junco) respectively; for COD, 70.37%, 72.85% and 70.12% in each were obtained; for the case of Phosphates, 43.89%, 35.91% and 47.96%; for Oils and fats, 97.10%, 95.91% and 96.90%. Other parameters analyzed (basic parameters, Ammonium, Total Suspended Solids,) showed acceptable values at the output of the systems.

Key words: domestic wastewater, artificial wetland, treatment *Typha domingensis*,

Phragmites australis, *Schoenoplectus americanus*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO I: ASPÉCTOS METODOLÓGICOS	18
1.1 Antecedentes	18
1.1.1 Antecedentes Nacionales	18
1.1.2 Antecedentes Internacionales	23
1.2 Planteamiento del Problema.....	27
1.2.1 Descripción del Problema.....	27
1.2.2 Formulación del Problema.....	30
1.3 Objetivos	30
1.3.1 Objetivo General.....	30
1.3.2 Objetivos Específicos	31
1.4 Hipótesis.....	31
1.4.1 Hipótesis Principal.....	31
1.4.2 Hipótesis Secundarias	31
1.5 Variables	32
1.6 Justificación e Importancia	33
1.6.1 Justificación	33
1.6.2 Importancia	34
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	36
2.1 Bases Teóricas.....	36
2.1.1 Definición de aguas residuales.....	36
2.1.2 Clasificación de las aguas residuales	36
2.1.3 Generación y tratamiento de aguas residuales por las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento a nivel nacional.....	37
2.1.4 Principales problemas asociados a las aguas residuales	39
2.1.5 Tratamiento de las aguas residuales domésticas	39

2.1.6	Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.....	42
2.1.7	Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales artificiales.....	49
2.1.8	Clasificación de humedales artificiales.....	52
2.1.9	Humedales de flujo superficial	54
2.1.10	Humedales artificiales de flujo subsuperficial.....	56
2.1.11	Parámetros para la caracterización de las aguas residuales	62
2.2	Definición de Términos Básicos	68
2.3	Marco Legal	71
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS		77
3.1	Materiales.....	77
3.1.1	Materiales.....	77
3.1.1	Equipos	80
3.2	Métodos.....	82
3.2.1	Diseño de la investigación.....	82
3.2.2	Tipo de investigación.....	82
3.2.3	Nivel de investigación	83
3.3	Metodología	83
3.3.1	Caracterización del agua residual doméstica antes del ingreso a los humedales artificiales	83
3.3.2	Desarrollo morfológico de las especies acuáticas utilizadas	100
3.3.3	Caracterización del agua residual doméstica después del tratamiento	101
CAPÍTULO IV: CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....		102
4.1	Determinación de los parámetros de diseño del sistema de humedal artificial	102
4.2	Construcción de los sistemas de humedales de flujo subsuperficial.....	106
4.3	Instalación del medio filtrante, siembra y desarrollo de las macrófitas acuáticas	111
CAPÍTULOS V: RESULTADOS.....		116

5.1	Determinación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas antes del tratamiento.....	116
5.2	Desarrollo morfológico de la <i>Typha domingensis</i> , <i>Phragmites australis</i> y <i>Scirpus americanus</i> durante y después del tratamiento	118
5.3	Determinación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas después del tratamiento por humedales artificiales	127
5.3.1	Conductividad eléctrica	127
5.3.2	TDS	137
5.3.3	Temperatura	147
5.3.4	Potencial de Hidrógeno (pH)	157
5.3.5	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	167
5.3.6	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	180
5.3.7	Amonio (NH ₄ ⁺)	193
5.3.8	Fosfato	206
5.3.9	Aceites y grasas	219
5.3.10	Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	232
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS		245
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		249
7.1	CONCLUSIONES	249
7.2	RECOMENDACIONES	252
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		255
ANEXOS.....		261

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Variable Independiente.....	32
Tabla 2 Variable Dependiente	33
Tabla 3 Especies básicas recomendables para humedales artificiales.....	47
Tabla 4 Equipos utilizados en la medición de los parámetros básicos.....	80
Tabla 5 Equipos utilizados en la medición de los parámetros físicos y químicos.....	81
Tabla 6 Características del medio para sistemas de flujo subsuperficial	103
Tabla 7 Parámetros básicos registrados antes del tratamiento	117
Tabla 8 Parámetros físicos y químicos registrados antes del tratamiento	117
Tabla 9 Mediciones de altura de la especie <i>Typha domingensis</i> en el periodo de investigación.....	120
Tabla 10 Mediciones de altura de la especie <i>Phragmites australis</i> en el periodo de investigación.....	121
Tabla 11 Mediciones de altura de la especie <i>Schoenoplectus americanus</i> en el periodo de investigación	122
Tabla 12 Alturas promedio de las especies macrófitas	123
Tabla 13 Altura aérea promedio inicial y final de las especies macrófitas	124
Tabla 14 Mediciones de las raíces de la especie <i>Typha domingensis</i> (totora).....	124
Tabla 15 Mediciones de las raíces de la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo)	125
Tabla 16 Mediciones de las raíces de la especie <i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)	125
Tabla 17 Mediciones de crecimiento de brotes de la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo).....	126
Tabla 13 Cantidad y promedio inicial y final de hojas de la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo).....	127
Tabla 14 Valores de conductividad eléctrica en los sistemas de humedales.....	128
Tabla 15 Conductividad promedio antes y después del tratamiento	129
Tabla 16 Conductividad eléctrica obtenida en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₁	130

Tabla 17 Conductividad eléctrica promedio al ingreso y salida del sistema H ₁	131
Tabla 18 Conductividad eléctrica obtenida en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₂	132
Tabla 19 Conductividad eléctrica promedio al ingreso y salida del sistema H ₂	134
Tabla 20 Conductividad eléctrica obtenida en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₃	135
Tabla 21 Conductividad eléctrica promedio al ingreso y salida del sistema H ₃	136
Tabla 22 Valores de TDS obtenidos en los sistemas de humedales.....	137
Tabla 23 TDS promedio antes y después del tratamiento	139
Tabla 24 Valores de TDS obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₁	140
Tabla 25 TDS promedio al ingreso y salida del sistema H ₁	141
Tabla 26 Valores de TDS obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₂	142
Tabla 27 TDS promedio al ingreso y salida del sistema H ₂	144
Tabla 28 Valores de TDS obtenidos en las mediciones al ingreso y a la salida del sistema H ₃	145
Tabla 29 TDS promedio al ingreso y salida del sistema H ₃	146
Tabla 30 Valores de temperatura en los sistemas de humedales	147
Tabla 31 Temperatura promedio antes y después del tratamiento	148
Tabla 32 Valores de temperatura obtenidas en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₁	149
Tabla 33 Temperatura promedio al ingreso y salida del sistema H ₁	151
Tabla 34 Temperaturas obtenidas en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₂	152
Tabla 35 Temperatura promedio al ingreso y salida del sistema H ₂	154
Tabla 36 Temperaturas obtenidas en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₃	155
Tabla 37 Temperatura promedio al ingreso y salida del sistema H ₃	156
Tabla 38 Valores de pH obtenidos en los sistemas de humedales	157

Tabla 39 pH promedio antes y después del tratamiento.....	158
Tabla 40 Valores de pH obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₁	159
Tabla 41 pH promedio al ingreso y salida del sistema H ₁	161
Tabla 42 Valores de pH obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₂	162
Tabla 43 pH promedio al ingreso y salida del sistema H ₂	163
Tabla 44 Valores de pH obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H ₃	164
Tabla 45 pH promedio al ingreso y salida del sistema H ₃	166
Tabla 46 Valores de DBO en los sistemas de humedales	167
Tabla 47 DBO ₅ promedio antes y después del tratamiento.....	169
Tabla 48 Porcentaje de remoción de la DBO	170
Tabla 49 Valores de DBO obtenidos a la salida del sistema H ₁	172
Tabla 50 Valor promedio de DBO de las muestras en el sistema H ₁	173
Tabla 51 Porcentaje de remoción de la DBO en el sistema H ₁	174
Tabla 52 Valores de DBO obtenidos a la salida del sistema H ₂	175
Tabla 53 Valor promedio de DBO de las muestras en el sistema H ₂	176
Tabla 54 Porcentaje de remoción de la DBO en el sistema H ₂	177
Tabla 55 Valores de DBO obtenidos a la salida del sistema H ₃	178
Tabla 56 Valor promedio de DBO de las muestras en el sistema H ₃	179
Tabla 57 Porcentaje de remoción de la DBO en el sistema H ₃	180
Tabla 58 Valores de DQO en los sistemas de humedales	181
Tabla 59 DQO promedio antes y después del tratamiento	182
Tabla 60 Porcentaje de remoción de la DQO.....	183
Tabla 61 Valores de DQO obtenidos a la salida del sistema H ₁	185
Tabla 62 Valor promedio de DQO de las muestras en el sistema H ₁	186
Tabla 63 Porcentaje de remoción de la DQO en el sistema H ₁	186
Tabla 64 Valores de DQO obtenidos a la salida del sistema H ₂	188
Tabla 65 Valor promedio de DQO de las muestras en el sistema H ₂	189

Tabla 66 Porcentaje de remoción de la DQO en el sistema H ₂	189
Tabla 67 Valores de DQO obtenidos a la salida del sistema H ₃	190
Tabla 68 Valor promedio de DBO de las muestras en el sistema H ₃	192
Tabla 69 Porcentaje de remoción de la DQO en el sistema H ₃	192
Tabla 70 Valores de Amonio en los sistemas de humedales.....	193
Tabla 71 Valores promedio de Amonio antes y después del tratamiento	195
Tabla 72 Porcentaje de remoción de Amonio	196
Tabla 73 Valores de Amonio obtenidos a la salida del sistema H ₁	198
Tabla 74 Valor promedio de Amonio de las muestras en el sistema H ₁	199
Tabla 75 Porcentaje de remoción de Amonio en el sistema H ₁	200
Tabla 76 Valores de Amonio obtenidos a la salida del sistema H ₂	201
Tabla 77 Valor promedio de Amonio de las muestras en el sistema H ₂	202
Tabla 78 Porcentaje de remoción de Amonio en el sistema H ₂	203
Tabla 79 Valores de Amonio obtenidos a la salida del sistema H ₃	204
Tabla 80 Valor promedio de Amonio de las muestras en el sistema H ₃	205
Tabla 81 Porcentaje de remoción de Amonio en el sistema H ₃	206
Tabla 82 Valores de Fosfato en los sistemas de humedales.....	207
Tabla 83 Valores promedio de Fosfato antes y después del tratamiento	208
Tabla 84 Porcentaje de remoción de Fosfato	210
Tabla 85 Valores de Fosfato obtenidos a la salida del sistema H ₁	211
Tabla 86 Porcentaje de remoción de Fosfato en el sistema H ₁	213
Tabla 87 Valores de Fosfato obtenidos a la salida del sistema H ₂	214
Tabla 88 Promedio final y porcentaje de remoción de Fosfato en el sistema H ₂	216
Tabla 89 Valores de Fosfato obtenidos a la salida del sistema H ₃	217
Tabla 90 Promedio final y porcentaje de remoción de Fosfato en el sistema H ₃	218
Tabla 91 Valores de Fosfato en los sistemas de humedales.....	219
Tabla 92 Valores promedio de Aceites y grasas antes y después del tratamiento ...	221
Tabla 93 Porcentaje de remoción de Aceites y grasas	222
Tabla 94 Valores de Aceites y grasas obtenidos a la salida del sistema H ₁	223
Tabla 95 Valor promedio de Aceites y grasas de las muestras en el sistema H ₁	224

Tabla 96 Porcentaje de remoción de Aceites y grasas en el sistema H ₁	225
Tabla 97 Valores de Aceites y grasas obtenidos a la salida del sistema H ₂	226
Tabla 98 Valor promedio de Aceites y grasas de las muestras en el sistema H ₂	227
Tabla 99 Porcentaje de remoción de Aceites y grasas en el sistema H ₂	228
Tabla 100 Valores de Aceites y grasas obtenidos a la salida del sistema H ₃	229
Tabla 101 Valor promedio de Aceites y grasas de las muestras en el sistema H ₃	230
Tabla 102 Porcentaje de remoción de Aceites y grasas en el sistema H ₃	231
Tabla 103 Valores de SST en los sistemas de humedales	232
Tabla 104 Valores promedio de SST antes y después del tratamiento	233
Tabla 105 Porcentaje de remoción de Aceites y grasas	235
Tabla 106 Valores de SST obtenidos a la salida del sistema H ₁	236
Tabla 107 Valor promedio de Amonio de las muestras en el sistema H ₁	237
Tabla 108 Porcentaje de remoción de SST en el sistema H ₁	238
Tabla 109 Valores de SST obtenidos a la salida del sistema H ₂	239
Tabla 110 Valor promedio de SST de las muestras en el sistema H ₂	240
Tabla 111 Porcentaje de remoción de Aceites y grasas en el sistema H ₂	241
Tabla 112 Valores de Aceites y grasas obtenidos a la salida del sistema H ₃	242
Tabla 113 Valor promedio de SST de las muestras en el sistema H ₃	243
Tabla 114 Porcentaje de remoción de SST en el sistema H ₃	244

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Generación de agua residual por región (l/hab/día)	38
Figura 2 Volumen de agua residual descargada al alcantarillado	38
Figura 3 Estructura de un humedal artificial horizontal	43
Figura 4 Diagrama del metabolismo del nitrógeno	51
Figura 5 Tipos de humedales artificiales	54
Figura 6 Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal	57
Figura 7 Humedal subsuperficial de flujo horizontal	58
Figura 8 Humedal subsuperficial de flujo vertical	59
Figura 9 Preparación del reservorio de almacenamiento del agua residual	106

Figura 10 Preparación del sistema de ingreso del agua residual doméstica.....	107
Figura 11 Sistema de ingreso del agua residual doméstica en el reservorio	108
Figura 12 Preparación del sistema de ingreso del agua residual doméstica en los sistemas piloto	109
Figura 13 Preparación del sistema de salida del agua residual de los sistemas piloto	110
Figura 14 Sistemas piloto de humedal de agua residual.....	111
Figura 15 Lavado del medio filtrante	112
Figura 16 Instalación del medio filtrante en los sistemas piloto	112
Figura 17 Lavado de las tres especies macrofitas empleadas (totora , carricillo y junco)	113
Figura 18 Medición de las raíces de las especies macrófitas antes de sembrarlas	114
Figura 19 Instalación de las especie macrófitas en el medio filtrante	115
Figura 20 Conductividad eléctrica promedio obtenida en los sistemas piloto	129
Figura 21 Conductividad eléctrica al ingreso y salida del tratamiento con la especie Typha domingensis (totora).....	131
Figura 22 Conductividad eléctrica al ingreso y salida del tratamiento con la especie Phragmites australis (carricillo).....	133
Figura 23 Conductividad eléctrica al ingreso y salida del tratamiento con la especie Schoenoplectus americanus (junco)	136
Figura 24 Valores de TDS promedio obtenidos en los sistemas piloto.....	139
Figura 25 Valores de TDS al ingreso y a la salida del tratamiento con la Typha domingensis (totora).....	141
Figura 26 Valores de TDS al ingreso y salida del tratamiento con la Phragmites australis (carricillo).....	143
Figura 27 Valores de TDS al ingreso y salida del tratamiento con la Schoenoplectus americanus (junco)	146
Figura 28 Valores de Temperatura promedio obtenidos en los sistemas piloto	149
Figura 29 Teperaturas al ingreso y salida del tratamiento con la especie Typha domingensis (totora).....	150

Figura 30 Temperaturas al ingreso y salida del tratamiento con la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo).....	153
Figura 31 Temperaturas al ingreso y salida del tratamiento con la <i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)	155
Figura 32 Valores de pH promedio obtenidos en los sistemas piloto	159
Figura 33 Valores de pH al ingreso y salida del tratamiento con la especie <i>Typha domingensis</i> (totora).....	160
Figura 34 Valores de pH al ingreso y salida del tratamiento con la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo).....	163
Figura 35 Valores de pH al ingreso y salida del tratamiento con la especie <i>Typha domingensis</i> (totora).....	165
Figura 36 DBO de las muestras a la salida de cada sistema.....	168
Figura 37 Valores de la DBO ₅ promedio en los sistemas piloto	169
Figura 38 Remoción de DBO en los sistemas de humedales	171
Figura 39 Valores de DBO a la salida del tratamiento con la especie <i>Typha domingensis</i> (totora)	173
Figura 40 Valores de DBO a la salida del tratamiento con la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo).....	176
Figura 41 Valores de DBO a la salida del tratamiento con la especie <i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)	179
Figura 42 DQO de las muestras a la salida de cada sistema piloto	182
Figura 43 DQO promedio en los sistemas piloto	183
Figura 44 Remoción de DQO en los sistemas de humedales	184
Figura 45 DQO a la salida del sistema con la especie <i>Typha domingensis</i> (totora) .	185
Figura 46 DQO a la salida del sistema con la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo)	188
Figura 47 DQO a la salida del sistema con la especie <i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)	191
Figura 48 Amonio en las muestras a la salida de cada sistema piloto.....	194
Figura 49 Amonio promedio en los sistemas piloto.....	196

Figura 50 Amonio promedio en los sistemas de humedales	197
Figura 51 Amonio a la salida del sistema con la especie <i>Typha domingensis</i> (totora)	199
Figura 52 Amonio a la salida del sistema con la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo)	202
Figura 53 Amonio a la salida del sistema con la especie <i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)	205
Figura 54 Fosfato de las muestras a la salida de cada sistema piloto	208
Figura 55 Fosfato promedio en los sistemas piloto	209
Figura 56 Fosfato promedio en el sistema con la especie <i>Typha domingensis</i>	210
Figura 57 Fosfato a la salida del sistema con la especie <i>Typha domingensis</i> (totora)	212
Figura 58 Fosfato a la salida del sistema con la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo)	215
Figura 59 Fosfato a la salida del sistema con la especie <i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)	217
Figura 60 Aceites y grasas de las muestras a la salida de cada sistema piloto	220
Figura 61 Aceites y grasas promedio en los sistemas piloto	221
Figura 62 Remoción de Aceites y grasas en los sistemas de humedales.....	222
Figura 63 Aceites y grasas a la salida del sistema con la especie <i>Typha domingensis</i> (totora)	224
Figura 64 Aceites y grasas a la salida del sistema con la especie <i>Phragmites australis</i> (carricillo).....	227
Figura 65 Aceites y grasas a la salida del sistema con la especie <i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)	230
Figura 66 SST de las muestras a la salida de cada sistema piloto	233
Figura 67 SST promedio en los sistemas piloto	234
Figura 68 Remoción de SST en los sistemas de humedales.....	235
Figura 69 SST a la salida del sistema con la especie <i>Typha domingensis</i> (totora) ...	237
Figura 70 SST a la salida del sistema con la especie <i>Typha domingensis</i> (totora) ...	240

Figura 71 SST a la salida del sistema con la especie <i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)	243
Figura 72 Potenciómetro marca PEN TYPE PH METER	261
Figura 73 Conductímetro HACH S/N Sension 7	261
Figura 74 Colorímetro DR/890 Colorimeter HACH	261
Figura 75 Multiparámetro HACH	261
Figura 76 Balanza analítica BAMERSAC AS220/C/2	262
Figura 77 Reactor digital HACH DRB200	262
Figura 78 Esterilizador al seco J. Ovens	262
Figura 79 Espectrofotómetro HACH DR/2010	263
Figura 80 Bomba de vacío GE Commercial Motors	263
Figura 81 Determinación de la conductividad eléctrica de las muestras de agua residual	264
Figura 82 Determinación de TDS de las muestras de agua residual	264
Figura 83 Determinación de pH en las muestras de agua residual	264
Figura 84 Preparación de reactivos para la DBO	266
Figura 85 Preparación del agua de dilución	266
Figura 86 Adición de los reactivos R1 y R2 a la muestra	267
Figura 87 Adición de ácido sulfúrico a la muestra	268
Figura 88 Proceso de titulación de la muestra	268
Figura 89 Adición de reactivos para determinación de la DQO	270
Figura 90 Digestión de la muestra y lectura de la DQO	271
Figura 91 Preparación de Solución emético	272
Figura 92 Preparación de Molibdato de amonio	272
Figura 93 Preparación de Ácido ascórbico	273
Figura 94 Preparación de Ácido ascórbico	273
Figura 95 Lectura de Fosfato en la muestra de agua residual antes del tratamiento	274
Figura 96 Lectura de Fosfato en las muestras después del tratamiento en los sistemas piloto	275
Figura 97 Preparación de solución fenol y nitroprusiato	276

Figura 98 Preparación de solución oxidante	277
Figura 99 Lectura de Amonio en la muestra de agua residual antes del tratamiento	277
Figura 100 Lectura de Amonio en las muestras después del tratamiento en los sistemas piloto.....	278
Figura 101 Preparación de la muestra y armado de pera de decantación.....	279
Figura 102 Adición de Hexano, HCl y separación de fases	279
Figura 103 Extracción de los aceites y grasas presentes en la muestra.....	280
Figura 104 Aceites y grasas obtenidos de la muestra secados en la estufa	281
Figura 105 Pesaje del papel filtro seco y armado del sistema de bomba al vacío.....	282
Figura 106 Paso de la muestra de agua por el sistema de bomba al vacío	282
Figura 107 Pesaje de los SST obtenidos de la muestra de agua antes del ingreso a los sistemas piloto	283
Figura 108 Pesaje del papel filtro sin y con muestra de SST después del tratamiento	284
Figura 109 Medición de las raíces de la especie Phragmites australis antes del tratamiento e instalación en el sistema	285
Figura 110 Medición de las raíces de la especie Phragmites australis (carricillo) después del tratamiento	286
Figura 111 Mediciones de crecimiento de la especie Phragmites australis (carricillo) y desarrollo morfológico	287
Figura 112 Medición de las raíces de la especie Typha domingensis (totora) antes del tratamiento.....	289
Figura 113 Mediciones de crecimiento de la especie Typha domingensis (totora) y desarrollo morfológico	289
Figura 114 Medición de las raíces de la especie Typha domingensis (totora) después del tratamiento	290
Figura 115 Medición de las raíces de la especie Schoenoplectus americanus (junco) antes del tratamiento y desarrollo morfológico	291
Figura 116 <i>Instalación de los sistemas de humedales artificiales</i>	292
Figura 117 Vista general de los sistemas de humedales artificiales.....	293

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Peso de Aceites y grasas expresado en gramos	98
Ecuación 2 Peso de Aceites y grasas expresado en miligramos.....	99
Ecuación 3 Peso de Aceites y grasas expresado en mg/L	99
Ecuación 4 Determinación del Caudal (Q).....	102
Ecuación 5 Determinación del Área superficial.....	102
Ecuación 6 Constante de primer orden dependiente de la T°	103
Ecuación 7 Determinación de Oxígeno Disuelto	167

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las plantas de tratamiento de aguas residuales se componen principalmente por sistemas convencionales, requiriendo el uso de sustancias químicas como parte del tratamiento. Además, la implementación de estos sistemas para llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales, conllevan a un costo mayor, muchas veces no pudiendo ser solventado en algunas zonas rurales. Es esta una de las razones por la cual las aguas residuales son descargas a los cuerpos de agua, llámese mares, ríos, lagos, lagunas entre otros, sin haber recibido un tratamiento previo; o en muchos casos, son reutilizadas para riego de cultivos de tallos corto y largo, o para riego de parques y jardines.

En ese sentido, se requerirían de tecnologías eficientes, ecológicas y económicas que permitan realizar el tratamiento de las aguas residuales. Una de estas tecnologías limpias, son los humedales artificiales, empleando especies macrofitas (plantas adaptadas al medio acuoso) ya sea flotantes, enraizadas a un medio o sumergidas. Estos sistemas disminuyen las concentraciones de cargas orgánicas y contaminantes de las aguas residuales, a través de la degradación microbiológica de la materia orgánica.

Es por ello que en el presente trabajo de investigación se determinará la eficiencia de tres macrófitas acuáticas *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) para el tratamiento de aguas residuales domésticas en humedales artificiales de flujo subsuperficial.

CAPÍTULO I: ASPÉCTOS METODOLÓGICOS

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes Nacionales

CITRAR – Universidad Nacional de Ingeniería, implementó una planta de tratamiento con humedales artificiales instalada dentro de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) con fines de investigación. Dicha planta, inició su funcionamiento en el año 2003, tratando las aguas residuales provenientes de un asentamiento humano aledaño. El caudal ingresa pasando por un pre-tratamiento (rejillas y desarenador) y adicionalmente cuentan con un tratamiento primario (tanque de sedimentación). **Torbisco Sáenz (2017)** en su tesis denominada “Eficiencia de un humedal de flujo vertical sembrada con *Chrysopogon zizanioides* para el tratamiento del efluente de un reactor UASB”, determinó la eficiencia de un humedal de flujo vertical con plantas y sin plantas para la remoción de los parámetros DBO, DQO y SST para los tiempos de alimentación y descanso de 24, 12, 6 y 4 horas. Mostró la aplicación de humedales artificiales de flujo vertical en el tratamiento del efluente proveniente del Reactor Anaerobio de Manto de Lodos y flujo ascendente de la Planta de Tratamiento de CITRAR – UNI. Los humedales verticales presentaron tres capas de sustratos de distintos tamaños o granulometría, acomodados uno encima de otro; en la parte superficial se colocó 50 cm de altura de arena gruesa; en la parte intermedia, 15 cm de grava de 3-10 mm (cofitillo); y en la parte inferior, 15 cm de grava de 20-40 mm.

El sistema demostró que la mejor eficiencia se desarrolló en el humedal artificial de flujo vertical con vegetación, en el periodo de intermitencia de 06 horas. En estas

condiciones, se alcanzó un porcentaje de remoción de 96.23%, 90.63% y 87.18% en los parámetros DBO, DQO y SST respectivamente.

Cecilio Cabrera (2016) en su tesis “Remoción de materia orgánica influenciada por la macrófita *Scirpus californicus*, en humedales artificiales subsuperficiales”, determinó la remoción de materia orgánica influenciada por las macrófitas *Scirpus californicus*, en un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal. La investigación fue desarrollada en el Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR) de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI. Se implementaron dos unidades experimentales; la primera unidad fue un humedal artificial de flujo subsuperficial plantada con la macrófita *Scirpus Californicus*; y la segunda, un sistema control (cama de sólidos) similar a la anterior, pero sin vegetación. La investigación se desarrolló en dos etapas; en la primera se utilizó grava de 5 cm de diámetro como medio granular del humedal, y en la segunda se utilizó grava de 2.5 cm de diámetro.

En la primera etapa, la medición de los parámetros de evaluación se realizó durante cinco meses. El efluente a tratar provino del reactor UASB de CITRAR, obteniendo en promedio 86.5 mg/L y 199.3 mg/L de DBO5 y DQO respectivamente, y se determinaron las eficiencias para 9, 12 y 16 horas de tiempo de retención hidráulico. Como resultado, en la primera etapa la remoción adicional del humedal influenciado por la macrófita en términos de DBO5 fue del 21.5% y 14.8% para 9 y 12 horas de tiempo de retención. Para el tiempo de 16 horas, el humedal sin vegetación obtuvo un 17.2% adicional en remoción de DBO5. En términos de DQO, la remoción adicional en el humedal con la presencia de la macrófita fue de 9%, 13.5% y 16.4% para los tiempos de retención de 9, 12 y 16 horas

respectivamente.

En la segunda etapa, de obtuvo del efluente a tratar proveviente a tratar 61.18 mg/L y 205.25 mg/L de DBO5 y DQO respectivamente para los tiempo de retención de 10, 12 y 14 horas. La remoción adicional de DBO5 en el humedal con la macrofitas fue de 10.5%, 12.6% y 15.8% para 10, 12 y 14 horas de tiempo de retención. La remoción adicional de DQO fue del 5.6%, 19.3% y 9% para 10, 12 y 14 horas respectivamente.

Arteaga Tello y Galindo Cabello (2016) en su tesis denominada “Estudio experimental para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto para la remoción de DBO en aguas residuales domésticas”, desarrollaron el estudio experimental para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto para la remoción de DBO en aguas residuales domésticas. Se emplearon parámetros de diseño y se compararon distintas configuraciones de dimensionamiento de humedales a fin de determinar el criterio de diseño necesario para obtener la mayor remoción de DBO5. Establecieron tres humedales artificiales a escala piloto de distintas configuraciones: humedal A, humedal B y humedal C; se compararon 03 parámetros de diseño: carga superficial de DBO5 (C_s), tiempo de retención hidráulico (TRH) y la profundidad del medio filtrante (h). Para el humedal A se tuvo: C_s de 7.8 g DBO5/m².día, profundidad de 0.20 m y TRH de 0.63 días; para el humedal B: C_s de 3.7 g DBO5/m².día, profundidad de 0.23 m y TRH de 1.23 días; y para el humedal C: C_s de 7.8 g DBO5/m².día, profundidad de 0.40 m y TRH de 1.26 días.

Los resultados obtenidos muestran la DBO5 en los efluentes de los humedales; humedal A la DBO5 promedio fue 36.91 mg/l, humedal B la DBO5 promedio fue 21.25

mg/l y humedal C la DBO5 promedio fue 32.38 mg/l.

Chacon Ventura (2015) en su tesis denominada “Implementación de wetlands para mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria procesadora agropecuaria Esmeralda S.A.”, determinó las ventajas del tratamiento secundario de aguas residuales de matadero mediante humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal con aireación y sin aireación en su lecho filtrante en su depuración, con respecto a un sistema de tratamiento de lodos activados. La investigación fue realizada en los ambientes de la empresa ESMERALDA CORP. S.A.C. y el estudio consistió en realizar el tratamiento de las aguas residuales del efluente proveniente del camal a la salida del DAF (componente del sistema de tratamiento). Se construyeron dos unidades de wetlands de flujo horizontal en serie y a escala piloto; a uno de ellos se le acondicionó aireación de un difusor de burbuja fina en el fondo del lecho. Se evaluaron los siguientes parámetros: OD, PH, temperatura con una frecuencia diaria, y con frecuencia semanal, DBO₅, DQO, nitrógeno total y fósforo total. El periodo de estudio se desarrolló durante los meses de setiembre 2013-junio 2014. Se trabajó con un caudal constante de 0.12 m³/d al ingreso del humedal con aireación y con un caudal constante de 0.15 m³/d al ingreso del humedal sin aireación.

A la salida de los humedales se obtuvo una eficiencia de remoción mínima y máxima de DBO₅ de 77.25% y 98.33%, en comparación al sistema de lodos activados cuya eficiencia mínima y máxima fue de 96.86% y 99.61% respectivamente. La eficiencia de remoción mínima y máxima de DQO fue de 74.76% y 95.53%, en comparación al sistema de lodos activados cuya eficiencia mínima y máxima fue de 97.49% y 98.89%

respectivamente. Se obtuvo 20 mg/l y 98 mg/l de nitrógeno total como valor mínimo y máximo, con una eficiencia de remoción de 74.13% y 88.53%.

Escudero Cornejo (2011) en su tesis denominada “Tratamiento de efluentes de la granja porcina del Instituto Redentores Mater y Juan Pablo II de Ventanilla a través de humedales artificiales para su reutilización como agua de clase III”, diseñó un modelo piloto de humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de los efluentes de la granja porcina del Instituto Redentores Mater localizado en el distrito de Ventanilla, para su reutilización como agua de clase III. Para obtener los parámetros necesarios para el diseño del humedal, tomó muestras del efluente en forma periódica para caracterizarlos. Para el paso del efluente al humedal piloto, se diseñó un pre tratamiento que consistía de: separador de sólidos, tanque de aireación, y un sedimentador. Se calcularon las dimensiones necesaria para el diseño del humedal (largo, ancho, área superficial, área transversal), el caudal a tratar y el tiempo de retención. Las pruebas de tratamiento en el humedal piloto se realizó teniendo en cuenta los siguiente parámetros de control: caudal de 86 L/día, tiempo de retención de 6.5 días, piedra chancada de ¼ de pulgada de diámetro como sustrato y sembrando papiros como vegetación.

Como resultado del tratamiento en el humedal obtuvieron los siguientes resultados: pH de 6.5 -7, 14 mg/L de DBO₅ alcanzando el 90.71 % (entre el rango: entrada 340 mg/L y salida 14 mg/L), 36 mg/L de DQO, 0.8 mg/L de aceites y grasas, y 6 mg/L de sólidos suspendidos totales alcanzando el 90.9 % (entre el rango: entrada 293 mg/L y salida 6 mg/L).

1.1.2 Antecedentes Internacionales

Solis Silvan, López Ocaña, Bautista Margulis, Hernández Barajas y Romellon Cerino (2016) en su artículo titulado “Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita”, implementaron humedales artificiales de flujo libre operando con *Typha domingensis* (espadaño) y *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), y humedales de flujo subsuperficial empleando *Paspalum paniculatum* (camalote) y *Cyperus articulatus L.* (chintul) para remover contaminantes del agua residual. Se implementaron también lagunas sin vegetación y lagunas con grava como controles.

Los resultados obtenidos mostraron que el humedal que presentó la mayor eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual fue el de flujo libre utilizando *T. domingensis* (eficiencias de remoción de turbiedad, color, DQO, DBO₅, NT, PT y SST de 97,1; 83,4; 97,8; 97,5; 97,2; 91,1 y 97,7% respectivamente), seguido por el humedal de flujo subsuperficial empleando *P. paniculatum* con remociones de 94,8; 71,5; 94,7; 94,8; 92,7; 52,2 y 93,0% respectivamente. Los humedales de flujo libre empleando *E. crassipes* y de flujo subsuperficial que utilizó *C. articulatus L* presentaron las menores eficiencias de remoción de contaminantes.

Jaramillo Gallego, Agudelo Cadavid y Peñuela Mesa (2016) en su artículo titulado “Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal”, implementaron humedales artificiales de flujo libre operando con *Typha domingensis* (espadaño) y *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), y humedales de flujo subsuperficial empleando *Paspalum paniculatum*

(camalote) y *Cyperus articulatus L.* (chintul) para remover contaminantes del agua residual. Se implementaron también lagunas sin vegetación y lagunas con grava como controles. El análisis que se empleó para evaluar diferencias significativas entre los cuatro tratamientos y los controles fue el análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis.

Los resultados obtenidos mostraron que el humedal que presentó la mayor eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual fue el de flujo libre utilizando *T. domingensis* (eficiencias de remoción de turbiedad, color, DQO, DBO₅, NT, PT y SST de 97,1; 83,4; 97,8; 97,5; 97,2; 91,1 y 97,7% respectivamente), seguido por el humedal de flujo subsuperficial empleando *P. paniculatum* con remociones de 94,8; 71,5; 94,7; 94,8; 92,7; 52,2 y 93,0% respectivamente. Los humedales de flujo libre empleando *E. crassipes* y de flujo subsuperficial que utilizó *C. articulatus L* presentaron las menores eficiencias de remoción de contaminantes.

Bedoya Pérez, Ardilla Arias y Reyes Calle (2014) en su artículo titulado “Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia”, implementaron un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales generadas por la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Realizaron una evaluación comparativa de la eficiencia de remoción de diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, sólidos suspendidos totales, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, fósforo, coliformes y algunos metales como níquel y zinc en dos humedales independientes. Cada humedal fue caracterizado por una macrófita diferente (*Typha latifolia* y *Cyperus papyrus*).

Los resultados obtenidos mostraron que con ambas macrófitas se logró un efluente con niveles inferiores de todos los parámetros analizados con respecto a los valores obtenidos en la caracterización inicial del agua residual original. Sin embargo, la especie *Typha latifolia* mostró un mejor rendimiento que la especie *Cyperus papyrus* en términos de la calidad de agua obtenida en el efluente al finalizar el tratamiento. Los mayores niveles de remoción de DQO (70.4 %), DBO₅ (96.7 %) y SST (81.4 %) presentes en el agua residual de la IUCMA, se obtuvieron en el humedal que contenía la especie *Typha latifolia*. Para el caso del nitrógeno total y amoniacal, ninguna de las macrófitas usadas logró obtener un efluente que cumpliera con los niveles máximos de remoción establecidos por la norma colombiana para vertimiento de aguas residuales hacia aguas superficiales o hacia sistemas de alcantarillado.

Montiel Morales (2014) en su tesis denominada “Humedal Artificial”, diseño un sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas en el edificio de oficinas de la Facultad de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad Autónoma de México, mediante la tecnología de humedales artificiales. Realizaron los cálculos de las dimensiones necesarias (ancho, largo, área superficial, área transversal y el tiempo de retención hidráulico) para la construcción del humedal artificial de tipo subsuperficial de flujo vertical. La vegetación a usar fueron tules y carrizos por mejor adaptabilidad al diseño del humedal. Como sustrato se utilizó arena y grava de ½ pulgada, donde se concentraran los microorganismos encargados del tratamiento del efluente.

Vinueza Estévez (2014) en su tesis “Diseño de un sistema de pantanos artificiales para

el tratamiento de aguas negras y grises del campo base y área de mantenimiento El Coca de la empresa TRIBOILGAS”, realizó el diseño de un sistema de pantanos artificiales para el tratamiento de las aguas residuales negras y grises provenientes de las instalaciones del campamento base y del área de mantenimiento Francisco De Orellana de la empresa “Triboilgas” (empresa prestadora de servicios petroleros ubicada en la provincia de Orellana) a fin de tratar los efluentes producto de las actividades humanas y reutilizarlos como agua para riego y para el lavado de vehículos. Plantearon el diseño de un tratamiento preliminar mediante una trampa de grasa a fin de optimizar la eficiencia del tratamiento en el humedal.

Como resultado del tratamiento para el reuso del efluente, la configuración del humedal presenta 2 celdas con un área de tratamiento de 108 m² por cada una; se tuvo como objetivo obtener un efluente con 30 mg/L DBO (valor inicial fue de 269 mg/l), remoción de sólidos suspendidos del 80 % (150 mg/L), remoción de coliformes fecales del 80 % en los primeros metros del humedal, removiendo al final el 99.9 %.

Rojas, Vera y Vidal (2013) en su artículo denominado “Influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas durante la operación de puesta en marcha de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial”, evaluaron la influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus*, en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas (proveniente de una comunidad rural en Chile) durante la operación de puesta en marcha de humedales de flujo horizontal subsuperficial. Se implementaron cuatro

unidades de HSS y se consideraron las estaciones de invierno y primavera. Dos unidades fueron plantadas con *Phragmites australis* y las otras dos, con *Schoenoplectus californicus*. Los resultados obtenidos se obtuvieron durante la puesta en marcha (193 días de operación), evaluándose la eficiencia de depuración de materia orgánica (Demanda Biológica de Oxígeno, DBO₅, y Demanda Química de Oxígeno, DQO) y nutrientes (N-NH₄⁺, N-NO⁻³ y NT) y fósforo (P-PO₄⁻³ y PT).

Las unidades de HSS plantadas con *Phragmites australis* mostraron mejor adaptación temprana que las unidades de HSS plantadas con *Schoenoplectus californicus*. Sin embargo, las eficiencias de eliminación fueron similares en todas las unidades. Estacionalmente, se pudo evidenciar una diferencia de eliminación para DQO (invierno: 18 a 30%, primavera: 45 a 55%) y NT (invierno: 25 a 65%, primavera: 25 a 35%).

1.2 Planteamiento del Problema

1.2.1 Descripción del Problema

En el mundo, el agua es un recurso estratégico, finito, vulnerable y sobre todo esencial para sostener la vida y el desarrollo. Pero en la actualidad, existe una gran presión sobre este recurso tan esencial.

Diversos aspectos como la mala distribución temporal y espacial de la población; así como también, la contaminación y degradación del recurso hídrico, están determinando su actual situación, la cual se resume en un gran desequilibrio. Desde la década de los 90's, la contaminación de las aguas ha incrementado en casi todos los ríos de América Latina, África y Asia. Una de las principales causas es el aumento de los vertidos de aguas residuales no tratadas en las corrientes de agua dulce (ríos y lagos) (ONU-Agua, 2016).

La demanda de agua potable se ha incrementado proporcionalmente con el crecimiento demográfico, lo que a su vez ha ocasionado un incremento en la generación de aguas residuales tanto domésticas como industriales.

Según la UNESCO, se estima que la producción global de aguas residuales es de aproximadamente 1500 km³; además, asumiendo que un litro de aguas residuales contamina 8 litros de agua dulce, la carga mundial de contaminación puede ascender a 12000 km³.

Más del 80 % de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo se descarga sin tratamiento, contaminando ríos, lagos y zonas costeras (ONU-Agua, 2016). El vertido de aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas en el medio ambiente provoca la contaminación de las aguas superficiales, el suelo y las aguas subterráneas. Una vez vertidas en las masas de agua, las aguas residuales se diluyen y son transportadas aguas abajo, o se infiltran en los acuíferos, donde pueden afectar la calidad (y, por lo tanto, la disponibilidad) de los suministros de agua dulce (ONU-Agua, 2017).

En el año 2010, se calcula que la contaminación orgánica grave (con concentraciones mensuales de DBO superiores a 8 mg/l afectó entre el 6% y el 10% de los ríos de América Latina, entre el 7% y el 15% a los ríos de África y entre el 11% y el 17% a los ríos de Asia (ONU-Agua, 2016).

En el Perú, la producción de aguas residuales es de 960.5 MMC/año (30 m³/s) y solo el 20.62% son tratadas (198 MMC/año); el resto es vertido directamente a ríos lagos y zonas marino costeras (Autoridad Nacional del Agua, s.f.). Principalmente en las zonas rurales, la ausencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales constituye la causa fundamental de la contaminación de los principales ríos, los cuales representan

importantes fuentes de vida para la población, flora y fauna.

Si esta problemática continúa, se espera que la contaminación siga incrementándose, generando serios daños al ambiente, a la flora, a la fauna y a la población. Según la tendencia mostrada por la *Dirección de Gestión de Calidad de los recursos hídricos del ANA*, el Perú cuenta con una población de 29 millones de habitantes, la cual se incrementará a 45 millones para el 2050, ocasionando a su vez mayor producción de aguas residuales domésticas. Gran parte de estas aguas serán vertidas al cuerpo receptor sin tratamiento previo, con una producción mayor de contaminantes. La producción de aguas residuales es del orden de 960.5 MMC/año (30 m³/s) aproximadamente; solo el 20.62 % son tratadas (198 MMC/año) y 761 MMC/año son vertidos directamente a ríos, lagos y zonas marino costeras (Autoridad Nacional del Agua, s.f.).

Frente a este panorama, surge la necesidad de buscar nuevas alternativas de tratamiento de las aguas residuales que sean de bajo costo y de requerimientos sencillos tanto de operación como mantenimiento; es decir, que sean acordes a la realidad y sobre todo para los sectores periurbanos y rurales, donde se concentran la mayoría de los puntos de descarga de aguas residuales.

Por tal motivo, el propósito de este trabajo de investigación es evaluar la capacidad depuradora de tres macrofitas acuáticas *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) en humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

1.2.2 Formulación del Problema

1.2.2.1 Problema Principal

- ¿Cuál será la eficiencia de las especies macrófitas *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* en el tratamiento de las aguas residuales domésticas por humedales artificiales de flujo subsuperficial?

1.2.2.2 Problemas Secundarios

- ¿Cómo se encontrarán los niveles de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas antes del tratamiento por humedales artificiales de flujo subsuperficial?
- ¿Cómo será el desarrollo morfológico de las especies *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* durante el tratamiento de las aguas residuales domésticas?
- ¿Cuál será la calidad del efluente después del tratamiento con las especies *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* en los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Determinar la eficiencia entre las especies macrófitas *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* para el tratamiento de las aguas residuales domésticas por humedales artificiales de flujo subsuperficial.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar los niveles de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas antes del tratamiento por humedales artificiales de flujo subsuperficial.
- Detallar el desarrollo morfológico de las especies macrófitas *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* durante el tratamiento de las aguas residuales domésticas.
- Determinar las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes después del tratamiento con las especies *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* en los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis Principal

- La especies macrófitas *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* son altamente eficientes para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial.

1.4.2 Hipótesis Secundarias

- Los niveles de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas utilizadas exceden los límites máximos permisibles antes del tratamiento por

humedales artificiales de flujo subsuperficial.

- Las especies macrófitas *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* presentan un desarrollo morfológico óptimo durante el tratamiento de las aguas residuales domésticas en humedales artificiales.
- Los niveles de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas se encuentran dentro de los límites máximos permisibles después del tratamiento con las especies *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* en los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial.

1.5 Variables

Tabla 1
Variable Independiente

Variable Independiente	Indicadores	Unidad	
Macrófita Acuática	Brotes	Longitud periódica	cm
	Raíz	Longitud final e inicial de la raíz	cm
	Hoja	Longitud de las hojas	cm
		Crecimiento de brotes	cm/semana
	Características Generales	Longitud de la planta (periódicamente)	cm
		Altura mínima alcanzada	cm

Variable Independiente	Indicadores	Unidad
	Altura máxima alcanzada	cm

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2
Variable Dependiente

Variable Dependiente	Indicadores	Unidad
Agua residual doméstica	Temperatura	°C
	pH	
	Conductividad Eléctrica	μs/cm
	TDS	mg/L
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L
	Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L
	Amonio (NH ₄ ⁺)	mg/L
	Fosfato (PO ₄ ⁻³)	mg/L
	Aceites y grasas	mg/L

Fuente: Elaboración propia

1.6 Justificación e Importancia

1.6.1 Justificación

La presente investigación permitirá dar a conocer una alternativa para el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas, a través de especies acuáticas (macrófitas)

en un sistema denominado humedal artificial. Esta tecnología natural de depuración es eficaz en la remoción de la materia orgánica; además, es menos costosa en cuanto a operación y mantenimiento en comparación con los sistemas convencionales de tratamiento. Por otro lado, no hay consumo de energía eléctrica y no se hace uso de insumos y/o reactivos químicos para el tratamiento, contando con un sistema inocuo.

1.6.2 Importancia

El presente trabajo de investigación muestra la aplicación de los humedales artificiales de flujo subsuperficial como una alternativa eficiente y económica para el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas. Esta tecnología brinda ventajas, como requerir un área menor de instalación y bajos costos de construcción, operación y mantenimiento.

Debido a la presencia de plantas acuáticas, medio filtrante (sustrato) y microorganismos, los humedales artificiales con vegetación permiten que se lleve a cabo la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales, teniendo como resultado la disminución en las concentraciones de los parámetros físicos y químicos. Además, mediante la presente investigación se podrá dar a conocer una alternativa de tratamiento biológico para las aguas residuales provenientes de diferentes zonas que no cuenten con sistemas de tratamiento convencionales, y así mejorar la calidad de vida de la población. Por otro lado, contar con este tipo de tratamiento a través de humedales artificiales, contribuirá con la disminución de la contaminación en los cuerpos de agua (ríos, lagos, lagunas, mares, entre otros) donde en su mayoría las aguas residuales son vertidas directamente, afectando la salud de la población a través de enfermedades

transmitidas por el agua; además, el sector agricultura emplea para riego las aguas procedentes de fuentes naturales las cuales muchas veces no presentan concentraciones óptimas para su uso.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

1.1 Bases Teóricas

1.1.1 Definición de aguas residuales

Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2014).

1.1.2 Clasificación de las aguas residuales

1.1.2.1 Aguas residuales industriales

Según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) en su libro Fiscalización Ambiental en aguas residuales (2014), las aguas residuales industriales son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras.

1.1.2.2 Aguas residuales domésticas

Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2014). La cantidad de agua residual domestica generada es directamente proporcional a la población.

1.1.2.3 Aguas residuales municipales

Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2014).

1.1.3 Generación y tratamiento de aguas residuales por las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento a nivel nacional

El Perú genera aproximadamente 2,59 millones de m³ por día (equivalente a 162 L/habitante/día) de aguas residuales descargadas a la red de alcantarillado de las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS) (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS], 2015), de los cuales solo el 32% de estas recibe tratamiento.

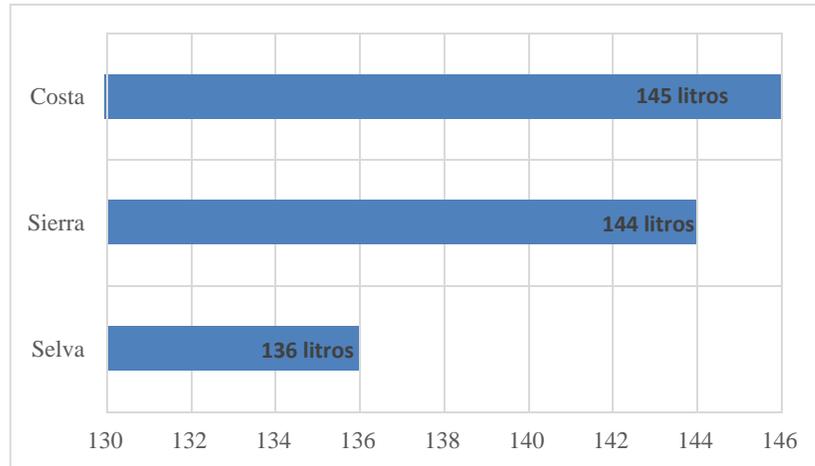
En la actualidad, de las 253 localidades del ámbito de las EPS, 89 no cuentan con tratamiento de aguas residuales, por lo que el agua residual cruda de estas localidades se vierte directamente a los ríos, mares, pampas o drenes (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS], 2015).

Estas 89 localidades vertieron en el año 2013 un total de 298.000 metros cúbicos por día al ambiente sin ningún tratamiento. Esto representa el 12% de todo el agua residual que es vertida al alcantarillado (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS], 2015).

En las regiones del Perú se generan aproximadamente: 136 litros de agua residual doméstica/hab/día en la selva, 144 litros de agua residual doméstica /hab/día en la sierra y 145 litros de agua residual doméstica /hab/día en la costa (Organismo de Evaluación y

Fiscalización Ambiental [OEFA], 2014) (ver Figura 1).

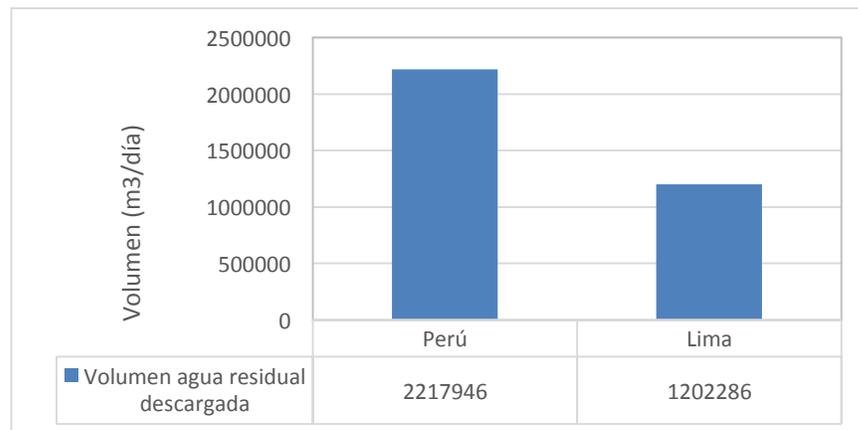
Figura 1
Generación de agua residual por región (l/hab/día)



Fuente: Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales – OEFA, 2014

El departamento de Lima genera aproximadamente 1202286 m³ por día de aguas residuales descargadas a la red de alcantarillado de las EPS Saneamiento, de las cuales solo el 20,5% de estas reciben tratamiento (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2014) (ver Figura 2).

Figura 2
Volumen de agua residual descargada al alcantarillado



Fuente: Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales – OEFA, 2014

1.1.4 Principales problemas asociados a las aguas residuales

Uno de los principales problemas asociados a las aguas residuales es el déficit de cobertura por Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS Saneamiento) a nivel nacional, brindándose cobertura solo al 69,65 % de la población urbana (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2014). La población no cubierta vierte sus aguas residuales sin tratamiento al mar, ríos, lagos, quebradas o, las emplean para el riesgo de cultivos, conllevando a la contaminación de los cuerpos de agua; así como también, a la propagación de enfermedades en la población.

Por otro lado, la sobrecarga de aguas residuales en las plantas de tratamiento cuya infraestructura en muchos casos no es suficiente, origina que los efluentes tratados exceda los límites máximos permisibles (LMP), y por ende no se cumpla con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA). Esto genera problemas ambientales como la contaminación de los cuerpos de agua y la generación de malos olores que causan conflictos con la población.

Tanto la disposición de aguas residuales sin tratamientos y las aguas residuales tratadas inadecuadamente, contaminan los cuerpos de agua natural. A su vez, por infiltración en el subsuelo se contaminan las aguas subterráneas, pudiéndose convertir en focos infecciosos para la salud de la población, así como para la flora y fauna del lugar.

1.1.5 Tratamiento de las aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domesticas deben pasar por un proceso de tratamiento antes de ser vertidas, a fin de proteger la salud pública y el ambiente. Es importante conocer la composición de estas aguas antes de iniciar con el tratamiento; a esto se le denomina como

caracterización del agua. Por medio de esta, se podrá conocer la composición física, química y biológica (Mendez Melgarejo & Feliciano Muñoz, 2010).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas son un conjunto integrado de operaciones y procesos físicos, químicos, y biológicos, que se utilizan con la finalidad de depurar las aguas residuales hasta un nivel tal que permita alcanzar la calidad que se requiere para su disposición final, o su aprovechamiento mediante el reuso.

La complejidad del sistema de tratamiento está en función de los objetivos que se establezca para el efluente resultante de dicho tratamiento (Ministerio del Ambiente, 2009).

1.1.5.1 Niveles de tratamiento de aguas residuales

Los niveles de tratamiento de las aguas residuales han sido clasificados como: preliminar o Pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado. A continuación se describe las consideraciones que caracteriza cada nivel:

a. Pre-tratamiento o tratamiento preliminar

El objetivo de este proceso es la retención de sólidos gruesos, plásticos, material flotante, grasas y material rápidamente sedimentable como gravas y arenas. Para ello, se emplea usualmente canales con rejas gruesas y finas, y desarenadores. Este proceso es importante para evitar problemas en los procesos posteriores debido al paso de arena, residuos sólidos, plásticos, entre otros (Ministerio del Ambiente, 2009).

b. Tratamiento primario

Este sistema permite remover material en suspensión (sólidos orgánicos e inorgánicos

sedimentados), excepto sustancias disueltas presentes en el agua. Se logra la remoción entre el 60 a 70% de los sólidos suspendidos totales; así como también, reducir hasta un 30% de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) (Ministerio del Ambiente, 2009). Algunos sistemas empleados como tratamiento primario son los tanques de sedimentación, tanques sépticos, tanques de flotación, entre otros.

c. Tratamiento secundario

En este tratamiento se incluyen procesos biológicos, donde los microorganismos degradaran la materia orgánica a través de reacciones bioquímicas, logrando eficientes resultados en la remoción de la DBO (entre el 50% y el 95%). Entre los sistemas más empleados se tiene: biofiltros o filtración biológica, lodos activados y lagunas de estabilización (Ministerio del Ambiente, 2009). Dentro de este tipo de tratamiento se encuentran los sistemas de humedales o wetlands.

d. Tratamiento terciario

Este tratamiento dependerá de la disposición final que se pretenda dar a las aguas residuales tratadas. Aquí se busca la remoción fundamentalmente de nutrientes como el nitrógeno y fósforo, y evitar que la descarga del agua residual ocasione eutrofización, ya que ello desencadena el consumo de oxígeno disuelto con posteriores impactos a la vida acuática del cuerpo receptor (Ministerio del Ambiente, 2009). El efluente tratado hasta este sistema terciario puede ser utilizado para riego de áreas agrícolas, crianza de peces y otras actividades productivas.

Los procesos más usados en este tratamiento son la precipitación química de nutrientes, filtración, destilación, flotación, osmosis inversa, entre otros.

1.1.6 Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales

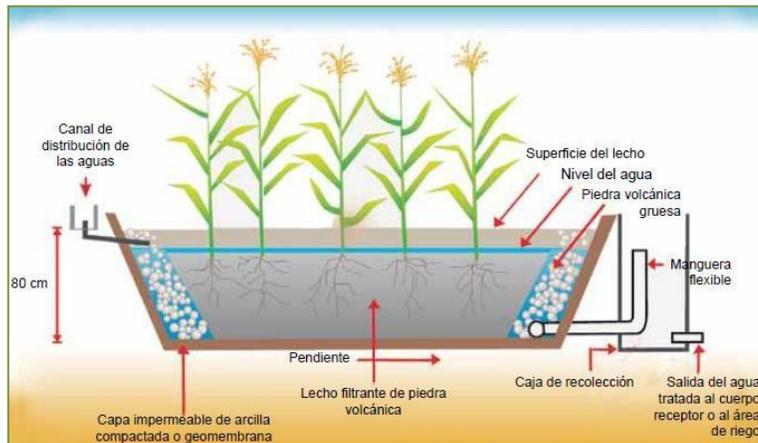
1.1.6.1 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son filtros biológicos (biofiltros) de grava o piedra volcánica, sembrados con plantas de pantano, a través de los cuales circulan las aguas residuales pretratadas, mediante un flujo horizontal o vertical. Las bacterias responsables de la degradación de la materia orgánica utilizan la superficie del lecho filtrante para fijarse y formar una película bacteriana que les permite actuar mejor en el proceso de degradación (Ministerio del Ambiente, 2009). La vegetación también cumple un rol importante, ya que proporciona superficies para la formación de las películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz.

Cabe resaltar que se han propuesto diversos diseños de humedales artificiales a lo largo de su desarrollo tecnológico, ya sea en cuanto a la dirección del movimiento del agua a través del humedal: horizontal, vertical, flujo superficial y flujo subsuperficial; en cuanto al sustrato: sistemas que llevan por debajo del manto de agua la capa del sustrato, sistemas donde la profundidad del agua no sobrepasa la altura del lecho filtrante (sustrato), y otros sistemas donde únicamente tienen agua (Fernández González, sf.).

Los humedales artificiales son sistemas considerados como tratamiento secundario para las aguas residuales (ver Figura 3).

Figura 3
Estructura de un humedal artificial horizontal



Fuente: Ministerio del Ambiente. Manual para Municipios Ecoeficientes.
Tratamiento y reuso de aguas residuales, 2009

Otra definición menciona, que los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. Este sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresivamente (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). La fitodepuración, en este caso se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean naturales o artificiales. El termino macrófita, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos. Constituyen “fotosistemas”, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales,

colabora en el tratamiento de las aguas (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Los humedales artificiales también pueden ser conocidos con los siguientes nombres: humedales construidos, pantanos artificiales, biofiltros y wetland (terminología en inglés) (Hoffmann, Platzer, Winker, & Von Muench, 2011).

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de los microorganismos, el aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de las plantas y funciones como material filtrante.

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales:

- Aguas domésticas y urbanas.
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías, mataderos, entre otros.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.

1.1.6.2 La vegetación en los humedales

- ***Plantas acuáticas apropiadas para el tratamiento de aguas residuales***

La vegetación a implantar en los humedales artificiales es un factor fundamental para obtener rendimientos óptimos en la depuración de aguas residuales. El tratamiento se basa en gran parte en las actuaciones de la vegetación, y es por ello por lo que la selección de las especies vegetales más apropiadas a cada caso cobra la mayor importancia (Seoáñez Calvo & Gutiérrez De Ojesto, Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales,

1999).

Seoáñez y Gutiérrez (1999) indican que se deben tener en cuenta, entre otros, los siguientes factores condicionantes:

- Tipo de humedal.
- Temperatura.
- Superficie del humedal.
- Profundidad de la instalación.
- Composición de los vertidos al humedal.
- Evolución de los rizomas.
- Tipo de sustrato.

Entre las especies acuáticas recomendadas para el tratamiento de las aguas residuales en humedales artificiales, se encuentran las plantas emergentes, sumergidas y flotantes (ver Tabla 3). Sin embargo, las especies utilizadas para fitodepuración en los humedales artificiales son en su mayoría plantas anfibias o plantas acuáticas emergentes; es decir, especies que se han adaptado a tener parte del vegetal en el agua y otra parte en el aire.

En los humedales artificiales, el sistema de tratamiento de las aguas más utilizado se basa en macrófitas enraizadas emergentes, empleando principalmente especies tales como: las eneas (*Typha spp.*), carricillo (*Phragmites australis*). Por otro lado, cabe mencionar que en los sistemas estrictamente acuáticos.

- ***Plantas macrófitas enraizadas emergentes o plantas anfibias***

Como se detalló anteriormente, las plantas acuáticas emergente o anfibias son aquellas que presentan parte del vegetal en el agua (raíces adaptadas en el agua) y otra parte aérea

(parte en el aire). Estas plantas también se denominan helófitos, hidrófitos emergentes o especies palustres; es decir macrófitas enraizadas emergentes. Algunas de las especies macrófitas enraizadas emergentes son: *Carex sp*, *Phragmites communis*, *Juncus sp*, *Scirpus lacustris*, entre otros.

- ***Plantas acuáticas de hojas flotantes, enraizadas en el fondo***

Las hojas de estas plantas suelen tener un limbo ancho que flota en el agua, pudiendo alcanzar grandes dimensiones. Algunas de las especies acuáticas de hojas flotantes enraizadas en el fondo son: *Potamogeton natans*, *Nymphaea alba*, *Nuphar luteum*, entre otros.

- ***Plantas acuáticas sumergidas, enraizadas en el fondo***

El desarrollo de estas especies están condicionadas por factores, los cuales son: profundidad, temperatura y calidad del agua. Algunas de las especies acuáticas sumergidas, enraizadas en el fondo son: *Eloдея canadensis*, *Potamogeton sp*, *Ranunculus circinatus*, *Trapa natans*, entre otros.

- ***Plantas acuáticas sumergidas libres***

Cuentan con órganos especializados, permitiéndoles ubicarse totalmente en un medio acuático. Algunas de las especies acuáticas sumergidas libres, enraizadas en el fondo son: *Stratioides aloides*, *Utricularia minor*, *Utricularia gibba*, entre otros.

- ***Plantas acuáticas libres flotantes***

Dichas especies, no enraízan en el fondo; es decir, toda la planta es flotante. Algunas de las especies acuáticas libres flotantes, enraizadas en el fondo son: *Lemna trisulca*, *Trapa natans*, *Lemna gibba*, entre otros.

A continuación en la Tabla 3, se presentan las especies vegetales recomendables para los humedales artificiales.

Tabla 3
Especies básicas recomendables para humedales artificiales

Plantas emergentes	Plantas sumergidas	Plantas flotantes
<i>Scirpus validus</i>		
<i>Scirpus lacustris lacustris</i>	<i>Ceratophyllum demersum</i>	
<i>Scirpus lacustris tabernae</i>	<i>Miriophyllum spicatum</i>	
<i>Montani</i>	<i>Miriophyllum verticillatum</i>	
<i>Scirpus pungens</i>	<i>Miriophyllum</i>	<i>Lemna trisulca</i>
<i>Phragmites australis</i>	<i>Alterniflorum</i>	<i>Lemna gibba</i>
<i>Typha latifolia</i>	<i>Zannichellia palustris</i>	<i>Lemna minor</i>
<i>Typha domingensis</i>	<i>Elodea canadensis</i>	<i>Potamogeton natans</i>
<i>Lythrum salicaria</i>	<i>Potamogeton lucens</i>	<i>Potamogeton</i>
<i>Sparganium erectum</i>	<i>Potamogeton crispus</i>	<i>Gramineus</i>
<i>Phalaris arundinacea</i>	<i>Potamogeton pectinatus</i>	<i>Polygonum amphibium</i>
<i>Iris pseudacorus</i>	<i>Trapa natans</i>	<i>Nuphar lutea</i>
<i>Carex riparia</i>	<i>Ceratophyllum submersum</i>	
<i>Carex vesicaria</i>	<i>Hottonia palustris</i>	
<i>Carex paniculata lusitánica</i>		
<i>Lycopus europaeus</i>		

Fuente: Seoáñez Calvo y Gutiérrez De Ojesto (1999). *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales*

1.1.6.3 Técnicas de implantación

Seoáñez y Gutiérrez (1999) indican que para realizar la implantación de la vegetación que se decida en un humedal se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Distribución de la vegetación en forma horizontal por toda la superficie del humedal, con la espesura predeterminada, en forma vertical dependiendo los estratos y en forma heterogénea, favoreciendo la mayor ocupación de espacios.
- Establecimiento adecuado a fin de que el agua residual pueda circular de manera apropiada según el diseño del humedal.
- Control de la espesura de sistemas radicales para que el agua no llegue a verse estancada.

Seoáñez y Gutiérrez (1999) mencionan las siguientes técnicas de implantación de la vegetación en un humedal artificial:

Siembra

Es el método de implantación aconsejable en las siguientes circunstancias:

- Si se utilizan especies de crecimiento rápido.
- Si las semillas presentan buena germinación.
- Si las semillas son fáciles de obtener.
- Si no existe fauna que la consuma.
- Mayormente se utiliza para grandes hectáreas.

Depósito

Utilizada cuando se desea implantar especies tanto sumergidas como flotantes; las especies son transportadas desde las zonas húmedas de origen y colocarlas en el

humedal artificial.

Plantación

Es la forma más frecuente de implantación. Este método se realiza cuando se desea ganar tiempo, ya que se implantan especies que presentan desarrollo avanzado. En principio, se debe plantar cuando haya mayor crecimiento radical. Algunas especies se implantan a partir de los rizomas (*Typha sp*, *Phragmites sp*, *Iris sp*, entre otras especies).

1.1.7 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales artificiales

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual.

1.1.7.1 Remoción de sólidos suspendidos

A pesar de que gran parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos a través de un tratamiento previo antes del ingreso al humedal artificial, quedarán partículas remanentes las cuales serán removidas en el interior de este sistema mediante procesos de filtración y sedimentación. Las raíces de las macrófitas y el sustrato favorecerán la reducción de la velocidad del agua, contribuyendo con la remoción de los sólidos suspendidos (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).



1.1.7.2 Remoción de la materia orgánica

Brix en Kolb (1998) menciona que la remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción

también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Según lo señalado por Gray en Kolb (1998), los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza. De acuerdo a su fuente de nutrientes, están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos, en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Según Cooper (1996), ambos grupos usan luz o una reacción química de oxidación-reducción como fuente de energía para todas las síntesis y son llamados fotótrofos y quimiótrofos, respectivamente (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). Dos clases diferentes de biodegradación microbial, la aeróbica o la anaeróbica, tienen lugar en los humedales construidos, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto.

En la degradación aeróbica, dos grupos de microorganismos participan en este proceso de degradación: aeróbicos quimioheterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio; y aeróbicos quimioautótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. El último proceso es llamado nitrificación. Sin embargo, debido a la tasa de metabolismo más alta, los heterótrofos son principalmente responsables para la remoción del material orgánico; por lo tanto, la presencia de oxígeno disuelto es un factor limitante (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

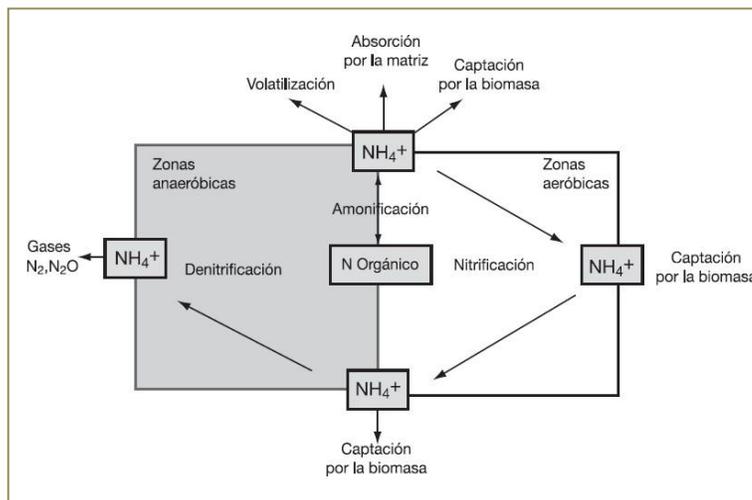
Orgánicos \longrightarrow alcohol, ácidos + nuevas células \longrightarrow CH₄, H₂S, NH₃, H₂, nuevas células

Según lo indicado por Cooper (1996) este es un proceso de cuatro pasos, realizado por heterótrofos anaeróbicos. Es menos eficiente comparado a la degradación aeróbica, pero predominará si el oxígeno no está disponible (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

1.1.7.3 Remoción de nitrógeno

Cuando ingresa el agua residual al humedal, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio. Hay dos mecanismos principales de remoción de nitrógeno: la nitrificación y la denitrificación. Los pasos principales pueden ser: amonificación, nitrificación y denitrificación. La amonificación se da en las zonas aeróbicas y en zonas anaeróbicas, por la mineralización del nitrógeno contenido en los orgánicos (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Figura 4
Diagrama del metabolismo del nitrógeno



Fuente: Cooper et al., 1996

La nitrificación requiere la presencia de oxígeno disuelto (condiciones aeróbicas),

amonio o nitrito como fuente de energía y dióxido de carbono como fuente de carbono (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). Primero, ocurre la oxidación de amonio a nitrito en presencia de oxígeno, y las bacterias encargadas de catalizar esta reacción son las Nitrosomas. El nitrito en presencia de oxígeno se transformará en nitrato por la acción del género bacterial denominado Nitrobacter.

Por último, la denitrificación se da en condiciones anóxicas; es decir, no hay presencia de oxígeno disuelto. Las bacterias más comunes que realizan este proceso en presencia de carbono como fuente de energía son las *Pseudomonas sp.*, *Achromobacter sp.* y *Aerobacter sp.* Se da la conversión de nitrato a nitrito, y la producción de óxido nítrico y gas nitrógeno.

1.1.7.4 Remoción de fósforo

El fosforo puede estar presente en la alcantarilla en tres distintas formas: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El último es un constituyente menor de la alcantarilla, y como los polifosfatos, requieren una posterior descomposición a una forma de ortofosfato más asimilable. Cerca del 25% de fósforo total fijado en la alcantarilla, está presente como ortofosfatos; tales como: PO_4^{5-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4 , H_3PO_4 , los cuales están disponibles para el metabolismo biológico inmediato. Por lo tanto, en términos de utilización, en las planta de tratamiento lo que importa es la concentraciones de fosfato organico antes que la concentración d fosforo total (Gray, 1989) (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

1.1.8 Clasificación de humedales artificiales

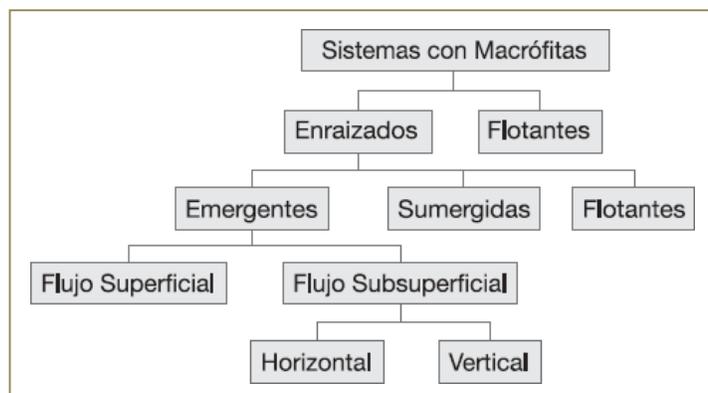
Los humedales artificiales pueden ser clasificados según el tipo de macrófitas que

empleen en su funcionamiento: macrófitas fijas al sustrato (enraizadas) o macrófitas flotantes libres (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

En su publicación, Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade (2010) clasifican a los humedales artificiales, considerando la forma de vida de las macrófitas en:

- ***Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes:*** El Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*) son las especies más utilizadas para este tratamiento.
- ***Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas:*** Comprenden algunos helechos, numerosos musgos, angiospermas, entre otros. Se encuentran en la zona fótica (donde llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares solo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente.
- ***Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes:*** Generalmente son plantas perennes. Este tipo de humedal puede ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee: humedales de flujo superficial, si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas y humedales de flujo subsuperficial, si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal (ver Figura 5).

Figura 5
Tipos de humedales artificiales



Fuente: Delgadillo, Camacho, Perez y Andrade (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*.

1.1.9 Humedales de flujo superficial

En estos sistemas el flujo de agua es de tipo horizontal superficial, donde la lámina de agua se encuentra a la vista. Las especies acuáticas están enraizadas en el sustrato que se haya dispuesto en el fondo. En este sistema también se pueden incorporar especies acuáticas flotantes y especies vegetales sumergidas (Fernández González, sf.).

Los sistemas de flujo superficial (conocidos en inglés como surface flow constructed wetlands o free wáter surface constructed wetlands) son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmosfera. Presentan una profundidad aproximada de 0.6 m (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (por su nombre oficial en inglés, *United States Environmental Protection*) (United States Environmental Protection Agency, 2000) se definen como humedales artificiales de flujo libre superficial,

aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmosfera. La mayoría de los humedales naturales son sistemas superficiales entre los que se incluyen a los fangales (principalmente con vegetación de musgos), zonas pantanosas (principalmente con vegetación arbórea) y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y macrófitas emergentes).

Como se mencionó, el agua fluye sobre la superficie del suelo (sustrato) con la vegetación emergente, habiendo un punto de entrada para el afluente y un punto de descarga para el efluente. Se cuenta normalmente con un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación y/o filtración hacia el agua freática.

La vegetación emergente comúnmente utilizada en este tipo de sistemas incluye las espadañas y aneas (*Typha spp.*), los juncos (*Scirpus spp.*) y los carrizos (*Pragmites spp.*) (United States Environmental Protection Agency, 2000).

El flujo laminar y la adecuada velocidad de distribución del afluente, proporcionan una remoción efectiva del material particulado. Este material conocido como sólidos suspendidos totales (SST), contiene componentes con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno total y fósforo total, pudiendo también contener trazas de metales y compuestos orgánicos. La oxidación o reducción de esas partículas libera formas solubles de DBO, nitrógeno total y fósforo total al ambiente del humedal en donde están disponibles para la absorción por el suelo y la remoción por parte de las poblaciones microbianas y vegetales (United States Environmental Protection Agency, 2000). En el humedal el oxígeno se encontrara en la superficie del agua, en microzonas de la superficie de las plantas vivas, raíces y rizomas, permitiendo que se produzca actividad aeróbica en el sistema. Pero debido a las zonas anóxicas o anaerobias dentro del humedal se limita la

remoción biológica por nitrificación del amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{-N}$). Con ello, se puede concluir que los humedales artificiales de flujo superficial son efectivos en cuanto a la remoción de la DBO, la demanda química de oxígeno (DQO), SST, metales y algunos contaminantes orgánicos.

1.1.10 Humedales artificiales de flujo subsuperficial

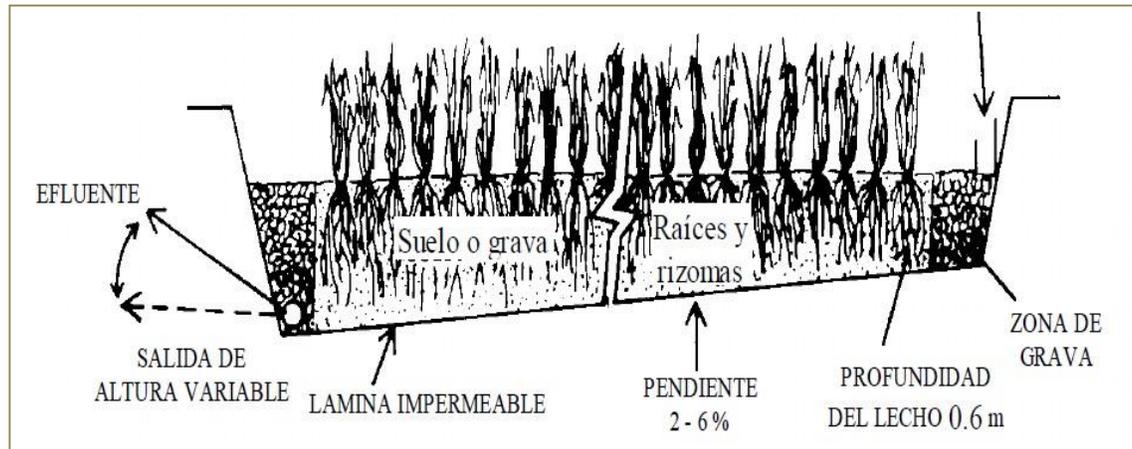
Los sistemas de flujo subsuperficial (conocidos en inglés como *subsurface flow constructed wetlands*), se caracterizan porque la circulación del agua se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0.6m. La vegetación es plantada en ese medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Estos sistemas pueden ser de dos tipos en función de la forma de aplicación de agua al sistema: humedales de flujo subsuperficial horizontal y humedales de flujo subsuperficial vertical (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

En este tipo de humedal el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie del lecho filtrante (grava, arena), evitando la presencia de insectos; y además, la vegetación (plantas macrófitas) se encuentra parcialmente sumergida en el agua. Se debe tener en cuenta que los microorganismos que degradan la materia orgánica se encuentran principalmente en la zona alrededor de las raíces de las especies acuáticas, y el medio filtrante por donde circula el agua residual sirve para el crecimiento de la película microbiana. Esta última se encargará de la degradación de la materia orgánica.

Durante el paso del agua residual en este sistema habrá un contacto con las zonas aerobias, anóxicas y anaerobias. La zona aerobia se encuentra alrededor de las raíces y rizomas de las plantas (González Díaz & Deas Valdés, 2011). En la Figura 6 se muestra

un esquema típico de un sistema de humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

Figura 6
Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal



Fuente: Gonzales Díaz y Deas Valdés (2011). Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal.

a. Humedal subsuperficial de flujo horizontal

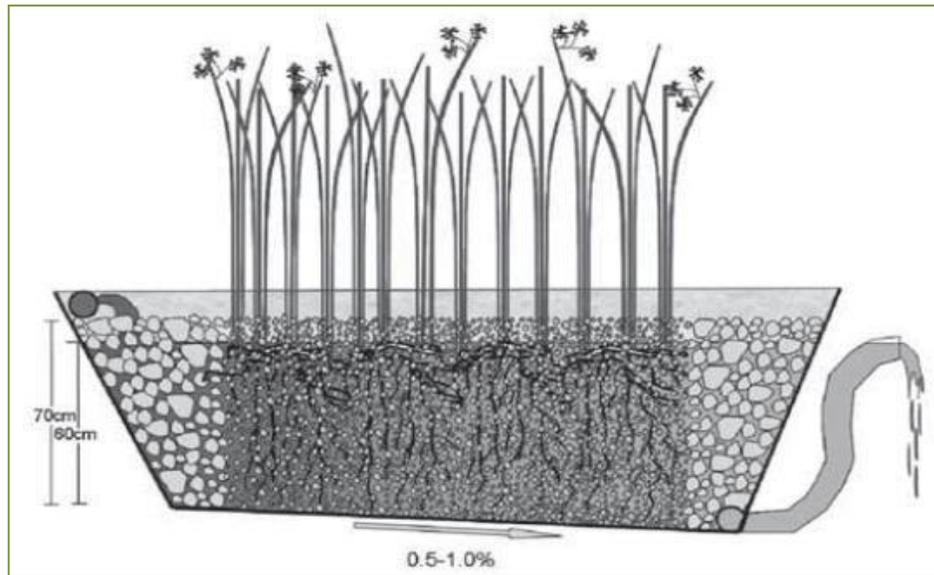
Kolb (1998) sostiene que el diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

El agua que ingresa por la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El afluente se trata mientras que fluye lateralmente a través del medio filtrante. La profundidad del lecho varía entre 0.45 m a 1m, teniendo una pendiente de 0.5% a 1%. (ver Figura 7).

El agua residual que ingresa al sistema se debe mantener en un nivel inferior a la

superficie (5-10 cm).

Figura 7
Humedal subsuperficial de flujo horizontal



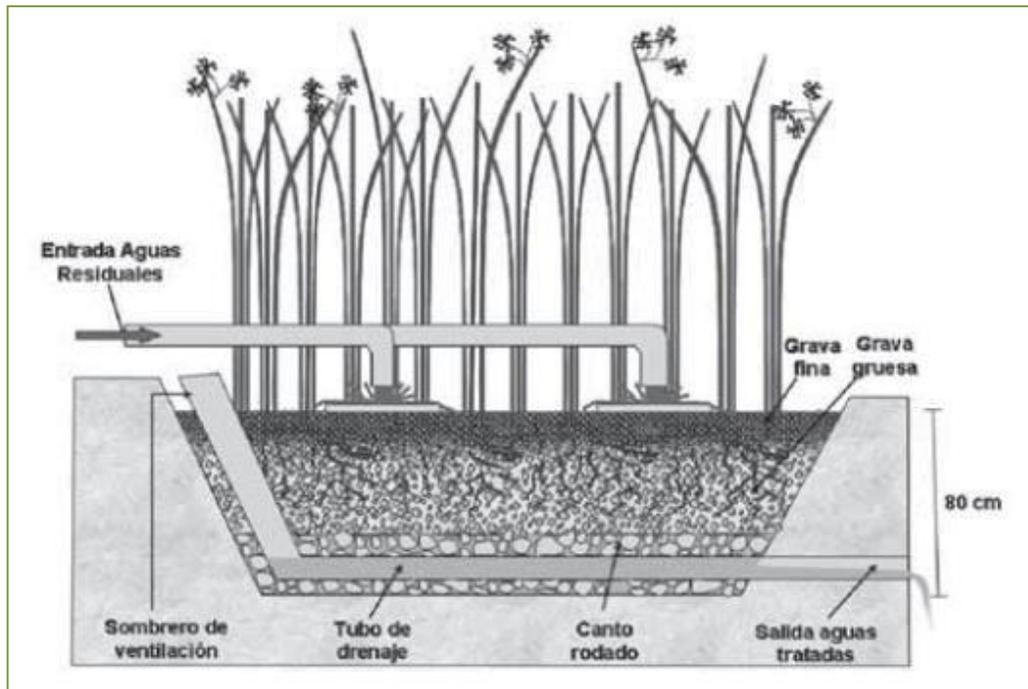
Fuente: Delgadillo, Camacho, Perez y Andrade (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.

b. Humedal subsuperficial de flujo vertical

Este tipo de sistema recibe las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua, tal como se aprecia en la Figura 8.

Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arena, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. Además, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se puede colocar un sistema de aeración, a través de tuberías con salidas al exterior. Por otro lado, el sustrato está constituido por varias capas, donde las más finas se encuentran en la parte superior, aumentando el diámetro de del sustrato hacia abajo (ver Figura 8).

Figura 8
Humedal subsuperficial de flujo vertical



Fuente: Delgadillo, Camacho, Perez y Andrade (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.

1.1.10.1 Partes de los humedales de flujo subsuperficial

Los humedales artificiales de este sistema están constituidos principalmente por cuatro elementos: agua residual, sustrato, vegetación y microorganismos.

Agua residual

Estas aguas provienen del abastecimiento y han sido modificadas por diversos usos (domésticos, industriales, entre otros). Según el uso que se les haya dado, estas aguas son el resultado de la combinación de líquidos y sólidos provenientes de diferentes tipos de actividades; tales como, comerciales, domésticas, agrícolas e industriales.

Sustrato (medio filtrante)

El sustrato o medio filtrante puede estar formado por arena, grava, sedimentos y restos de vegetación (se acumulan en el humedal a causa del crecimiento biológico).

El medio debe ser lo suficientemente permeable para permitir el paso del agua a través del mismo. Para ello, el medio a utilizar debe ser de tipo granular, principalmente grava.

Según Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade (2010), el sustrato es importante debido a las siguientes razones:

- Soportar a los organismos vivos en el humedal.
- Permeabilidad adecuada a fin de permitir el movimiento de afluente en el humedal.
- Las reacciones químicas y biológicas (principalmente microbiana) se dan en el sustrato.
- Medio de soporte para las raíces de la vegetación (macrófitas) del humedal y microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica.

Vegetación

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos foto autótrofos; es decir, que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Según Arias (2004), la vegetación presente en el humedal artificial tiene la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan este elemento disponible para producir diversas reacciones de degradación de la

materia orgánica (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). Además, el tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a espacios para la fijación de microorganismos.

Microorganismos

Según Arias (2004), los microorganismos serán los encargados de realizar el tratamiento biológico en los humedales. Los microorganismos aerobios predominarán en la zona superficial, ya que se encuentra el oxígeno liberado por las plantas y el oxígeno de la atmosfera. En el medio filtrante (sustrato), se encontrarán los microorganismos anaerobios. Estos microorganismos contribuirán con la degradación de la materia orgánica, eliminación de nutrientes y la desinfección (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Principalmente se encontrarán: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La actividad de los microorganismos es transformar gran parte de las sustancias orgánica e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles (Lara B., 1999).

1.1.10.2 Ventajas de los humedales artificiales subsuperficiales

- Las ventajas que se tiene con los sistemas de humedales artificiales de flujo superficial:
- Proporcionan un tratamiento efectivo minimizando la necesidad del uso de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores capacitados.
- Son menos costosos en la construcción, operación y mantenimiento que los procesos mecánicos convencionales de tratamiento.

- Estos sistemas proporcionan el “espacio verde” e incluyen la incorporación de vida silvestre.
- No se producen biosólidos ni lodos residuales, los cuales requerirían tratamiento adicional para su disposición.
- La remoción de DBO, SST, DQO, metales y algunos compuestos orgánicos de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser también efectiva con un tiempo de retención significativamente mayor.
- La operación de este sistema como tratamiento secundario (tratamiento biológico) para aguas residuales es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos.

1.1.11 Parámetros para la caracterización de las aguas residuales

1.1.11.1 Parámetros físicos para la caracterización de aguas residuales

Los parámetros físicos nos dan una idea de cómo se encuentra la calidad del agua residual a analizar y de los problemas que podemos encontrar en un sistema de tratamiento del agua residual.

Temperatura

Como consecuencia del uso doméstico e industrial, el agua residual presenta una mayor temperatura. Es importante tomar en cuenta dicho parámetro, ya que varios procesos, principalmente dependen de la temperatura. Además, es importante en la actividad

microbiana, para el cual el rango de temperatura óptimo está entre 25°C y 35°C. Por lo tanto, la actividad microbiana se inhibe cuando la temperatura es menor a 5 °C; en cambio, cuando la temperatura se aproxima a los 50 °C, los procesos de digestión aerobia y la nitrificación de las bacterias se detienen (Ron & Tchobanoglous, 2000).

Conductividad eléctrica

Es la capacidad que presenta el agua para conducir la electricidad. Esta última es transportada a través de iones en solución; por ello, el incremento de la conductividad eléctrica, se debe al aumento de la concentración de iones presentes. Este parámetro es empleado como sustituto de la concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT) a través de la siguiente relación:

$$\text{SDT (mg/L)} = \text{CE} * (550-700)$$

La conductividad se expresa en micromhos por centímetro (umho/cm) o como decisiemens por metro (dS/m). La medición y determinación in situ se realiza a través del instrumento denominado conductivímetro, el cual está formado de un electrodo y un medidor digital. El electrodo es introducido en el agua y mediante lectura directa se determina la conductividad.

Sólidos totales

Los sólidos totales son la materia resultante como residuo, después de haber sometido a la muestra de agua a una temperatura de entre 103°C y 105°C hasta que la misma se evapore (Da Cámara, Hernández, & Paz, 2003).

Mendonca (2000), clasifica a los sólidos totales en solidos suspendidos y solidos filtrantes. Los sólidos que quedan retenidos en un filtro con un tamaño de poro de 1.2 micras, representan los denominados sólidos suspendidos, y el resto constituye los sólidos filtrables o disueltos.

Sólidos en suspensión

Las diversas actividades; tales como, domestica, industrial, agrícola, entre otras, además de fenómenos o situaciones naturales, aportan solidos de manera considerable a las aguas residuales (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). Una de las consecuencias de los sólidos en suspensión es la interferencia con la penetración de la luz solar (turbiedad).

Es la porción de solidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105 °C hasta peso constante (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

Solidos filtrables

Según Da Cámara, Hernández, y Paz (2003), los sólidos filtrables son la fracción de materia sólida que pasa por un filtro de membrana de vidrio con un tamaño de poro de 1.2 micras.

1.1.11.2 Parámetros químicos para la caracterización de aguas residuales

Las propiedades químicas del agua presentan gran importancia por su interacción con las propiedades del suelo. Para ello, Se desarrollarán los parámetros químicos y su importancia en la caracterización de las aguas residuales.

Potencial de Hidrogeno (pH)

Se denomina pH o potencial de hidrogeno a la concentración de iones de hidrogeno H^+ o protones en soluciones.

$$pH = -\log [H^+]$$

La escala de pH va de 1 a 14. El pH de una solución es neutro si es igual a 7 y las sustancias que presentan un pH menor a 7 son acidas, mientras que las que posean un pH mayor a 7 son alcalinas o básicas (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

En las aguas residuales urbanas, el pH se encuentra entre 6.5 y 8.5. Mientras que los valores estén comprendidos entre 5 y 9, la vida de especies acuáticas es favorecida (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

1.1.11.3 Parámetros nutrientes

Nitrógeno

Es un elemento que se encuentra presente en las aguas superficiales y en las aguas residuales. En estas últimas, este elemento es un poco escaso, encontrándose principalmente como amonio, nitratos, entre otros. Mendonca (2000), precisa que los principales problemas de contaminación por la presencia de nitrógenos en las aguas serían: la disminución del oxígeno disuelto en los cuerpos receptores a causa de la oxidación amoniacal y el efecto tóxico del amonio en peces. Además, se sostiene que en los análisis de aguas, el contenido total de nitrógeno está conformado por nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico.

Nitrógeno amoniacal

Es el nitrógeno combinado en forma de amoníaco (NH_3) o amonio (NH_4^+) (Miyashiro Kiyari, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014). Para Ron y Tchobanoglous (2000), en las aguas residuales, el nitrógeno amoniacal se encuentra en forma de ión amonio como en forma de amoníaco. Cabe señalar, que a partir del amonio se dan los procesos de nitrificación y desnitrificación (remoción del amonio).

Fósforo

El fósforo lo encontramos en aguas naturales y en aguas residuales como fosfatos, en su mayoría como ortofosfato. Las diferentes formas de fosfatos (ácido fosfórico, fosfato primario, fosfato secundario y ortofosfato) provienen de fuentes tales como: productos de limpieza (detergentes, desinfectantes, etc.), fertilizantes, entre otros.

Por otro lado, el fósforo como nutriente es importante para el desarrollo de algunos organismos; por ello, la presencia de fosfatos en cuerpos de agua puede estimular el crecimiento de organismos fotosintéticos; sin embargo, en grandes cantidades, pueden causar la eutrofización de las aguas.

1.1.11.4 Parámetros indicadores de contaminación orgánica

La materia orgánica se compone de carbono, hidrógeno y oxígeno, además se puede componer de nitrógeno, azufre, fósforo, boro y halógenos. La procedencia de la materia orgánica en las aguas residuales proviene de los residuos de alimentos, residuos fecales, residuos vegetales, entre otros.

Por otro lado, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de

Oxígeno (DQO) son dos de los principales métodos para poder medir la cantidad de materia orgánica en el agua (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno es un indicador de carga orgánica presente en las aguas residuales. Este parámetro indica la cantidad de oxígeno disuelto consumido o utilizado por los microorganismos para la degradación de la materia orgánica (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014). Por ello, cuanto menor sea la DBO en una muestra de agua, se puede concluir que la presencia de materia orgánica ha disminuido, ya que las bacterias presentes han utilizado el oxígeno disuelto para su descomposición; es decir, el agua presentaría menor cantidad de materia orgánica. El método más utilizado para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno es a través de la prueba de Oxígeno Disuelto de los cinco días; es decir, qué cantidad de oxígeno disuelto ha sido consumido por los microorganismos en cinco días y a una temperatura de 20 °C.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Este parámetro también es considerado como un indicador de la presencia de carga orgánica, el cual nos muestra la cantidad de oxígeno que es consumido en la oxidación de la materia orgánica. Este parámetro mide la cantidad de contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales, los cuales son oxidados (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

1.2 Definición de Términos Básicos

Potencial de Hidrógeno (pH): Se llama pH o potencial de hidrógeno a la concentración de iones de hidrógeno H^+ o protones en soluciones (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

Conductividad Eléctrica: La conductividad eléctrica de un medio se define como la capacidad que tiene este (que por lo general contiene las sales inorgánicas en solución o electrolitos) para conducir la corriente eléctrica (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

Turbiedad: La turbidez es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. La turbidez en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, con un rango de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): Indicador de carga orgánica. Es la cantidad de oxígeno disuelto consumido en cinco días por las bacterias que realizan la degradación biológica de la materia orgánica (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Indicador de carga orgánica. Es la cantidad de oxígeno (medido en mg/L) que es consumido en la oxidación de materia orgánica, bajo condiciones de prueba. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, &

Orihuela de Campos, 2014).

Sólidos Suspendidos Totales (SST): Sólidos suspendidos totales son los residuos no filtrables de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

Fosfatos (P-PO₄): Son las sales o los ésteres del ácido fosfórico. Tienen en común un átomo de fósforo rodeado por cuatro átomos de oxígeno en forma tetraédrica (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

Nitrógeno Amoniacal: Nitrógeno combinado en forma de amoníaco (NH₃) o amonio (NH₄⁺). El amoníaco y el amonio son gases que se producen de forma natural por fermentación microbianas de productos nitrogenados (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

Aceites y grasas: El aceite y la grasa constituyen un grupo de sustancias con características físicas similares que se miden cuantitativamente en base a su solubilidad común en el triclorotrifluoretano. Si están presentes en cantidades excesivas, pueden interferir con los procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos, y producir una menor eficiencia en el tratamiento de aguas residuales (Miyashiro Kiyon, Méndez Quincho, & Orihuela de Campos, 2014).

Aguas residuales: Aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas y que por sus características de calidad requieren de un tratamiento previo (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017).

Vertimiento de aguas residuales: Es la descarga de aguas residuales previamente tratadas, en un cuerpo natural continental o marítima. Se excluye a la proveniente de naves y artefactos navales (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017).

Reuso de agua residual: Utilización de aguas residuales tratadas resultantes de las actividades antropogénicas (Ministerio de Agricultura y Riego, 2010).

Agua residual doméstica: Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2014).

Límite Máximo Permisible (LMP): Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2010).

Humedal Artificial: Sistema de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Otros sinónimos de humedales artificiales incluyen: humedales construidos, pantano artificiales, pantanos construidos, biofiltros, y otros sinónimos locales, aunque también se utiliza el nombre en inglés: “wetland” y el nombre más completo que es “constructed wetland” (Hoffmann, Platzer, Winker, & Von Muench, 2011).

Plantas acuáticas: La vegetación acuática supone la existencia de plantas adaptadas a unas condiciones específicas del medio, que en este caso es básicamente agua, con la que están en contacto desde íntimo y sumergidas permanentemente, hasta simplemente

con sus raíces en terreno limitadamente húmedo en verano, según sean el tipo de vegetación y el tipo de humedal (Seoáñez Calvo & Gutiérrez De Ojesto, Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales, 1999).

Macrófita: Constituyen formas macroscópicas de vegetación acuática (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Plantas anfibias: son individuos que se han adaptado a tener parte del vegetal en el agua y parte en el aire. A veces las plantas anfibias se denominan también especies palustres, helófitos o hidrófitos emergentes (Seoáñez Calvo & Gutiérrez De Ojesto, Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales, 1999).

Degradación: Es la transformación de sustancias complejas en otras sustancias más sencillas (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Typha spp.: Planta acuática helófito o macrófita emergente, perteneciente a la familia de las Typhaceae. Son plantas acuáticas con sistema radicular arraigado en el fango o fondo del humedal y estructura vegetal que emerge por encima de la lámina de agua (Fernández de la Mora, sf.).

Typha domingensis: Especie acuática perteneciente al género *Typha*. Conocido con el nombre común de totora.

Phragmites australis: Planta acuática helófito perteneciente a la familia de las gramíneas, perteneciente a la familia Poaceae (Fernández de la Mora, sf.). Conocido con el nombre común de carrizo.

1.3 Marco Legal

Desde el año 1969 el Perú presentaba la Ley General de Aguas aprobada por Decreto Legislativo N° 17752, el cual tenía como objetivo principal la protección de la calidad de

las aguas superficiales. Sin embargo, a partir de 1990 con el Código de Medio Ambiente y de los Recursos Naturales aprobado por Decreto Legislativo N° 613, se da el inicio de un gran interés acerca de la protección del ambiente. Posteriormente, se aprueba la Ley General del Ambiente (Ley N° 28611) y el año 2008 con la creación del Ministerio del Ambiente se dio la promulgación y aprobación de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua por Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, el cual fue actualizado por el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, y a su vez este último actualizado por el D. S. N° 004-2017-MINAM. Además, se aprobaron los Límites Máximos Permisibles (LMP) para las diferentes industrias y el sector saneamiento.

En el año 2009 se dio la promulgación de la Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338) y su reglamento (D.S. N° 001-2010-AG), la cual designó a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) como el ente rector del sistema de los recursos hídricos.

Como se hizo mención, en el Perú se han establecido normas que permiten establecer criterios de regulación de la calidad del agua a tratar y de los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas. Por otro lado, el dimensionamiento de los humedales artificiales no se encuentra comprendido en la normativa nacional; sin embargo, al formar parte de los procesos de tratamiento, se debe tener en cuenta que la calidad de los efluentes se encuentra regulado al tipo de cuerpo receptor vertido o al tipo de uso posterior del agua tratada.

Teniendo en cuenta lo mencionado, a continuación se detalla el marco normativo nacional e internacional de la calidad de aguas residuales tratadas.

Ley N° 28611 – Ley General del Ambiente

Artículo 121°.- Del vertimiento de aguas residuales

“El estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a los establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes.”

122.3 “Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con lo establecido en las normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador, a través de terceros debidamente autoizados o a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia.”

Ley N° 29338.- Ley de Recursos Hídricos

Artículo 79°.- Vertimiento de agua residual

“La autoridad nacional autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del

Agua (ECA-Agua) y Límites Máximos Permisibles (LMP). Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización.”

Reglamento de la Ley N° 29338 – Ley de Recursos Hídricos, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG

En el *Artículo 133°* se señalan las condiciones para autorizar el vertimiento de aguas residuales tratadas.

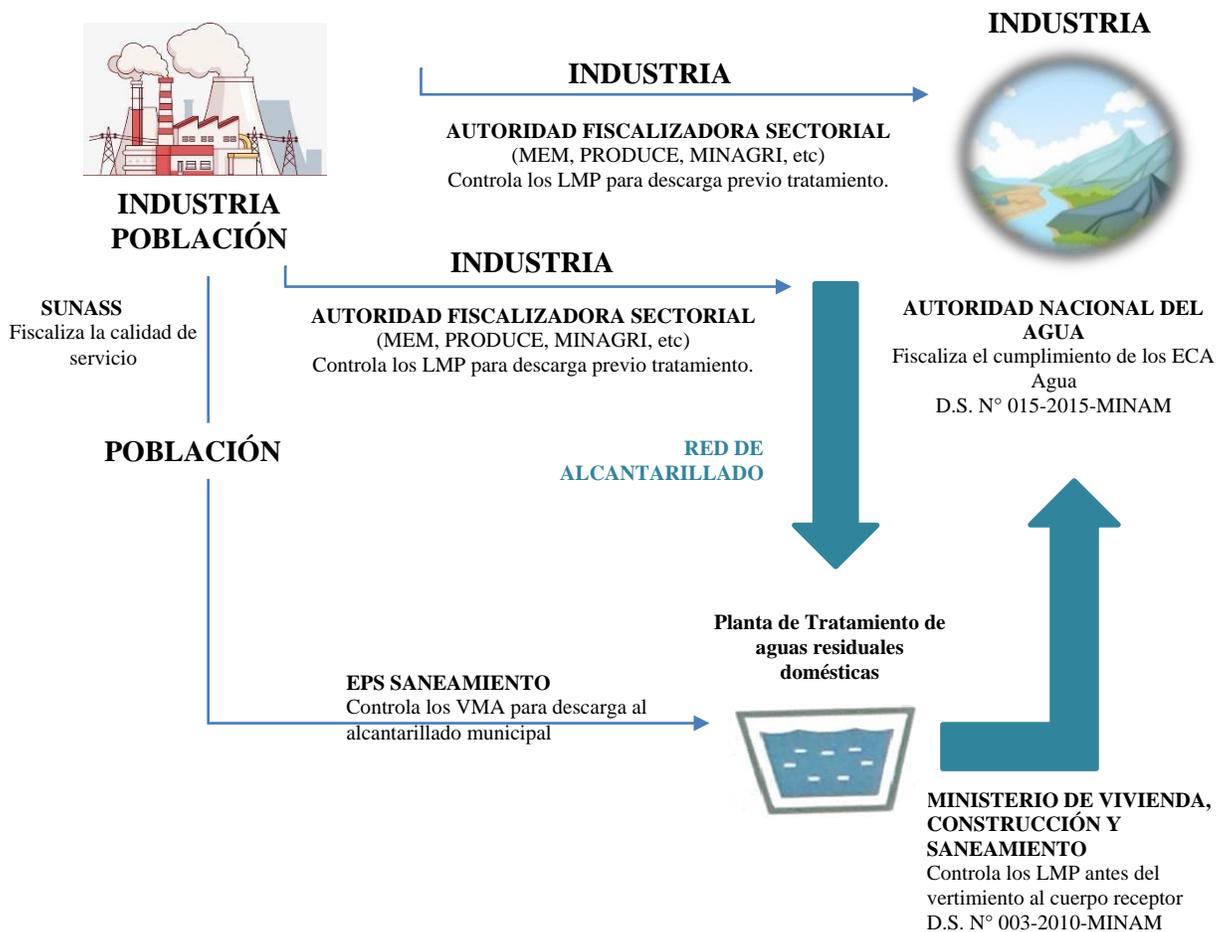
133.1 La Autoridad Nacional del Agua podrá autorizar el vertimiento de aguas residuales únicamente cuando:

- a. Las aguas residuales sean sometidas a un tratamiento previo, que permitan el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles – LMP.
- b. No se transgredan los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua en el cuerpo receptor, según las disposiciones que dicte el Ministerio del Ambiente para su implementación.
- c. Las condiciones del cuerpo receptor permitan los procesos naturales de purificación.
- d. No se cause perjuicio a otro uso en cantidad o calidad del agua.
- e. No se afecte la conservación del ambiente acuático.
- f. Se encuentre con el instrumento ambiental aprobado por la autoridad ambiental sectorial competente.
- g. Su lanzamiento submarino o subacuático, con tratamiento previo, no cause perjuicio al ecosistema y otras actividades lacustres, fluviales o marino costeras según corresponda.

Como se ha indicado los efluentes del tratamiento de las aguas residuales deben

cumplir la calidad según las normas antes de ser vertidos (cumplimiento de los LMP) y en interacción con el cuerpo receptor (ECA-Agua). Además, en el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos la Autoridad Nacional del Agua es responsable de autorizar el reuso de las aguas residuales tratadas.

En el siguiente esquema se muestra el proceso de las aguas residuales industriales y domésticas:



Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales – Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM

Los límites máximos permisibles de los efluentes de PTAR permiten controlar que las

concentraciones de los parámetros establecidos en el anexo del D.S. N° 003-2010-MINAM no excedan los valores indicados en las descargas domésticas.

Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua Agua– D.S. N° 004-2017-MINAM

Los ECA del agua permiten determinar el uso que puede darse a un cuerpo de agua (cuerpo receptor) de acuerdo a las condiciones de calidad que pueda presentar, sin representar un riesgo significativo para la salud de la población ni para el ambiente. El 31 de julio de 2008 se aprobó por Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua con la finalidad de establecer niveles de concentración de parámetros físico, químicos y biológicos presentes en los cuerpos de agua. El 19 de diciembre del 2015, se modificó el ECA para agua aprobado por Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, y a su vez este último actualizado por el D. S. N° 004-2017-MINAM el 07 de junio del 2017.

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Materiales

3.1.1 Materiales

- **Construcción de los humedales artificiales**

Para la construcción e implementación de los sistemas pilotos de humedales artificiales de flujo subsuperficial se emplearon los siguientes materiales:

- ***Cama de sólidos (sustrato)***: formado por grava de 3-10 mm de diámetro, piedra chancada de 3-4 cm de diámetro y arena gruesa.
- ***Vegetación (plantas acuáticas a utilizar)***: *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco).
- ***Sistema piloto de humedal artificial de flujo subsuperficial***: Determinando los parámetros de diseño, se construirán 03 sistemas piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial. Para ello, los materiales a utilizar serán:

Vidrio transparente de 4 mm de espesor (0.45 m x 0.5m x 0.25m)

- 01 pliego de caucho.
- 09 contratueras de 1".
- 03 codos de PVC de ¾".
- 06 adaptadores de manguera de PVC de ¾" a ½".
- 09 bushing de PVC de 1" x ¾".
- 06 llaves de paso de plástico de ¾".
- 06 uniones de PVC con reducción de ¾ a ½".
- 06 niples con rosca de ¾".

- 03 metros de manguera transparente de 5/8".
- Silicona líquida de vidrio.

- **Determinación de la calidad del agua residual doméstica**

Para determinar la calidad del agua residual doméstica se realizaron análisis en el laboratorio con la finalidad de determinar los parámetros físico-químicos. Para ello, se utilizaron los siguientes materiales y reactivos:

Materiales:

- Frascos Winlker de 300 ml.
- Pipetas de 1, 2, 5 y 10 ml.
- Vaso precipitado de 50 ml.
- Probetas de 50 y 100 ml.
- Bureta de 50 ml.
- Fiola de 50 y 100 ml.
- Matraz Erlenmeyer.
- Embudo de separación.
- Papel filtro.
- Fibras de vidrio de papel.
- Tubos de ensayo de 25, 50, 100 y 250 ml.
- Desecador.
- Lunas de reloj.
- Pera de decantación.
- Pinza de madera.

Reactivos e insumos químicos

- 200 ml Ácido sulfúrico (H_2SO_4)
- 200 ml Ácido clorhídrico (HCl)
- 850 ml de Hexano
- 20 gr de ácido ascórbico
- 20 gr de molibdato de amonio
- 10 gr de fosfato diácido de potasio
- 10 gr de fosfato ácido de potasio
- 10 gr de fosfato diácido de sodio
- 10 gr de cloruro de amonio.
- 20 gr de fenol en cristales.
- 10 gr de nitroprusiato sódico
- 30 gr de citrato de sodio
- 25 gr de sulfato de magnesio
- 05 gr de tiosulfato pentahidratado
- 40 gr de citrato de sodio
- 03 gr de cloruro de calcio
- 02 gr de cloruro férrico
- 03 gr de sulfato de plata
- 100 ml de solución de digestión DQO
- 05 gr Tartrato de antimonio y potasio
- 200 ml de alcohol de 95°

- 04 gr de hidróxido de sodio
- 100 ml de leguía comercial
- 20 gr de yoduro de potasio
- 70 gr de hidróxido de potasio
- Solución patrón fosfato
- Solución patrón DQO (500 y 1000 ppm)
- Agua destilada

1.1.1 Equipos

- **Equipos de laboratorio**

Tabla 4

Equipos utilizados en la medición de los parámetros básicos

Parámetro	Equipo
Temperatura	- Conductímetro HACH S/N Sension 7. - Mutiparámetro HACH Pat. 095375.
pH	- Potenciómetro PEN TYPE PH METER.
TDS	- Conductímetro HACH S/N Sension 7. - Mutiparámetro HACH Pat. 095375.
Conductividad Eléctrica	- Conductímetro HACH S/N Sension 7. - Mutiparámetro HACH Pat. 095375.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5
Equipos utilizados en la medición de los parámetros físicos y químicos

Parámetro	Equipo
Demanda Bioquímica de Oxígeno	- Incubadora
Demanda Química de Oxígeno	- Reactor digital HACH DRB200. - Colorímetro DR/890 Colorimeter. - Balanza analítica BAMERSAC AS220/C/2.
Sólidos Suspendidos Totales	- Bomba de vacío GE Commercial Motors MOD 5KH33DN16JK.
Aceites y grasas	- Esterilizador al seco J. Ovens
Amonio	- Espectrofotómetro UV-Visible Modelo: HACH DR/2010
Fosfato	- Espectrofotómetro UV-Visible Modelo: HACH DR/2010

Fuente: Elaboración propia

- **Equipos electrónicos y softwares para procesamiento de información**

Equipos electrónicos:

- **Impresora Canon Pixma MP230**

Empleada para las impresiones de material bibliográfico empleado e impresión del trabajo investigación.

- **Laptop marca ASUS, serie X55L**

Empleada para el procesamiento de la información.

Softwares:

- **Microsoft Excel versión 2013**

Software para el procesamiento de datos, cálculos y determinación de las gráficas de los parámetros básicos, físicos y químicos del agua residual doméstica.

- **Microsoft Word versión 2013**

Software para la elaboración del presente trabajo de investigación.

1.2 Métodos

1.2.1 Diseño de la investigación

Investigación es Experimental

Porque existe intervención del investigador a través de la manipulación de la variable de estudio. A su vez, la investigación es un estudio de tipo predominantemente cuantitativo ya que es secuencial y probatorio.

1.2.2 Tipo de investigación

Prospectiva

Según la planificación de la toma de datos, la investigación es de tipo prospectiva ya que los datos necesarios para el estudio son recogidos a propósito de la investigación, por lo que se posee control en las mediciones.

Longitudinal

La variable de estudio es medida en dos o más ocasiones; por ello, se realizan comparaciones (antes y después). Se llevarán a cabo mediciones del agua residuales antes

del ingreso a los humedales artificiales y a la salida de los sistemas, a fin de determinar las concentraciones de los parámetros físicos, químicos y biológicos.

1.2.3 Nivel de investigación

Explicativa.

Porque su interés se centra en explicar de qué manera la variable independiente influye en la variable dependiente. En ese sentido, se tratará de explicar, de qué manera las macrófitas acuáticas (*Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus*) son eficientes para el tratamiento de aguas residuales domésticas en sistemas de humedales artificiales.

1.3 Metodología

1.3.1 Caracterización del agua residual doméstica antes del ingreso a los humedales artificiales

Se empleó el agua residual doméstica proveniente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (PTAR) Maria Reiche ubicada en el distrito de Miraflores. Las muestras fueron tomadas después del proceso de Pretratamiento.

Se determinó la calidad del agua residual doméstica en función a sus parámetros físicos y químicos a fin de conocer las concentraciones iniciales. Se determinaron los parámetros básicos del agua residual doméstica antes de su ingreso al sistema de humedales artificiales, los cuales fueron: pH, temperatura, conductividad y TDS; para ello, se empleó un multiparámetro, conductímetro y potenciómetro.

Además, se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: Demanda

Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Aceites y grasas, Fosfatos y Amonio. Para ello, se emplearon Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Residuales del APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) y WPCF (Water Pollution Control Federation).

A continuación se detalla la metodología empleada para la determinación de los parámetros físicos y químicos en la calidad del agua residual.

Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno se empleó el método de la Prueba de DBO de 5 días. Para ello, en el laboratorio se prepararon los reactivos, agua de dilución y se realizó el Método Winkler a fin de obtener el Oxígeno Disuelto inicial (OD_0) y el Oxígeno Disuelto final (OD_5).

a. Preparación de reactivos

Reactivos para el agua de dilución

Los reactivos para la preparación del agua de dilución fueron los siguientes:

- Tampón fosfato

Se realizó el pesaje de los siguientes compuestos químicos:

- 0.85 gr de diácido de potasio (KH_2PO_4)
- 2.175 gr de ácido de potasio ($KHPO_4$)
- 3.34 gr de hidróxido de sodio ($NaOH$)
- 0.17 gr de cloruro de amonio (NH_4Cl)

Lo pesado se colocó en un vaso precipitado de 100 ml y se diluyó en 80 ml de

agua destilada. Se vació a una fiola y se enrazó con agua destilada hasta los 100 ml.

Se colocó en un frasco de 150 ml lo preparado y se rotuló con el nombre de tampón fosfato.

- Tampón sulfato de magnesio

Se realizó el pesaje del siguiente compuesto químico:

- 2.25 gr de sulfato de magnesio (NH_4Cl)

Lo pesado se colocó en un vaso precipitado de 100 ml y se diluyó en 80 ml de agua destilada. Se vació a una fiola y se enrazó con agua destilada hasta los 100 ml.

Se colocó en un frasco de 150 ml lo preparado y se rotuló con el nombre de tampón sulfato de magnesio.

- Cloruro de calcio

Se realizó el pesaje del siguiente compuesto químico:

- 2.75 gr de cloruro de calcio (CaCl_2)

Lo pesado se colocó en un vaso precipitado de 100 ml y se diluyó en 80 ml de agua destilada. Se vació a una fiola y se enrazó con agua destilada hasta los 100 ml.

Se colocó en un frasco de 150 ml lo preparado y se rotuló con el nombre de cloruro de calcio.

- Cloruro férrico

Se realizó el pesaje del siguiente compuesto químico:

- 0.025 gr de cloruro férrico (FeCl_3)

Lo pesado se colocó en un vaso precipitado de 100 ml y se diluyó en 80 ml de agua destilada. Se vació a una fiola y se enrazó con agua destilada hasta los 100 ml.

Se colocó en un frasco de 150 ml lo preparado y se rotuló con el nombre de cloruro férrico.

Reactivos para la titulación

Para la preparación del reactivo Tiosulfato de sodio se disolvió:

- 0.6205 gr de tiosulfato de sodio pentahidratado en 100 ml de agua destilada.

La preparación del reactivo fue colocada en un frasco de vidrio de color oscuro con la respectiva rotulación.

Para la preparación del almidón se disolvió:

- 1 gr de almidón en 100 ml de agua destilada.

Una vez disuelto, se procedió a hervir en una estufa a 200 °C. Por último, se dejó enfriar hasta alcanzar una temperatura ambiente.

Reactivos para la muestra

Para la preparación del Reactivo 1 (R_1) y Reactivo (R_2)

- Reactivo 1 (R_1)

Se pesó 18.2 gr de sulfato manganeso y se disolvió en 50 ml de agua destilada.

- Reactivo 2 (R₂)

La proporción para la preparación de este reactivo es de:

700 gr de Hidróxido de Sodio (KOH) con 150 gr de Yoduro de potasio (KI).

Ambos disueltos en 1000 ml de agua destilada.

Sin embargo, se preparó para 50 ml de agua destilada; por lo tanto, se pesaron 35 gr de KOH y 7.5 gr de KI.

Ambos reactivos fueron llenados en frascos y rotulados respectivamente con la denominación de R₁ y R₂.

b. Preparación del agua de dilución

En una fiola de 1000 ml, se llenó 500 ml de agua destilada. Se añadió 1 ml de cada uno de los reactivos preparados y se enrazó a 1000 ml con agua destilada.

Se tapó y agitó la fiola por un tiempo de 20 minutos con la finalidad de disolver el Oxígeno que pudiera estar presente.

c. Preparación de las muestras

Teniendo la muestra de agua residual doméstica, se procedió a determinar su calidad inicial.

Para ello, se extrajo 5 ml de la muestra de agua y se colocó en un frasco Winkler de 300 ml a fin de determinar la concentración de Oxígeno Disuelto inicial (OD₀).

La misma cantidad de muestra se extrajo y se colocó en otro frasco Winkler de 300 ml para el Oxígeno Disuelto final (OD₅); para ambos casos se tuvo una dilución

de 5:300. Se añadió el agua de dilución preparada hasta enrazar cada uno de los frascos.

El frasco Winkler que contenía la muestra con el agua de dilución para la determinación del Oxígeno Disuelto final (OD_5) fue dejado en la incubadora por cinco días a una temperatura de 20 °C.

Se añadió 1 ml del reactivo 1 y reactivo 2 en el frasco winkler para la determinación del Oxígeno Disuelto inicial (OD_0). Se agitó el frasco mezclando homogéneamente la muestra y se dejó reposar 20 minutos hasta observar la separación de fases. Luego, se añadió 1 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), agitando inmediatamente hasta lograr disolver las partículas en suspensión. La muestra adquirirá un color anaranjado oscuro. Una vez disueltas las partículas, se procedió a realizar la titulación para determinar la concentración de Oxígeno Disuelto inicial (OD_0) presente en la muestra.

Para la titulación de la muestra se utilizó el reactivo de Tiosulfato de sodio y el almidón preparado previamente. Para ello, se armó el soporte, el equipo de titulación y se alistaron los materiales para la titulación. Desde el frasco Winkler, con una probeta se extrajo 200 ml de la muestra, colocándola en un matraz de 500 ml. Se llenó con tiosulfato preparado la Bureta, anotando el volumen inicial antes de la titulación.

Se colocó el matraz que contenía la muestra en el equipo de titulación y se abrió lentamente la llave, titulando hasta obtener un color amarillo pálido. Se añadieron 04 gotas de almidón y se movió tornándose de color azul. Se continuó titulándose hasta que la muestra se torne cristalina.

Se anotó el volumen final de tiosulfato (posterior a la titulación). Teniendo el volumen inicial y final de tiosulfato, por diferencia se calculó el gasto en mililitros. Dicho gasto es el equivalente a la concentración de Oxígeno Disuelto inicial (OD_0) presente en la muestra.

Después de los cinco días, se realizó el mismo procedimiento para determinar la concentración de Oxígeno Disuelto final (OD_5) presente en la muestra que se encontraba en la incubadora. Además, se calculó el gasto de tiosulfato, el cual es el equivalente a la concentración de Oxígeno Disuelto final (OD_5) presente en la muestra.

Se calculó la concentración de Oxígeno Disuelto presente en la muestra por diferencia de concentraciones:

$$OD_0(ml) - OD_5(ml) = [OD](ml)$$

Donde:

$$1ml = 1mg/l$$

La concentración obtenida se expresó en miligramos por litro (mg/l), y se multiplicó por el valor de la dilución la cual es 5:300.

Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se empleó el método del Reflujo cerrado Método Colorimétrico. En primer lugar, fueron necesarios patrones de DQO, denominados Estándar 1 y Estándar 2 de 500 y 1000 ppm respectivamente.

Además, se preparó el Reactivo 1 teniendo en cuenta la siguiente relación de 5.5 gr de sulfato de plata en 550 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de 100 ml del reactivo de H_2SO_4

necesario para las diluciones. Se preparó el Reactivo 2 denominado Solución de digestión; para ello, se diluyeron 100 ml de agua destilada, 2.043 g de $K_2Cr_2O_7$ (previamente secado a $103^\circ C$ durante 2 horas), 33.4ml de H_2SO_4 y 6.66 g de $HgSO_4$. Se disolvió y se enfrió a temperatura ambiente y se diluyó hasta 200ml.

Se prepararon cuatro diluciones (muestra, blanco, estándar 1 y estándar 2) en viales para determinar la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de la muestra inicial:

Blanco (0mg/L):

Para la preparación de esta dilución se colocó en un vial:

- Solución de Digestión = 1.5 ml
- Agua destilada = 2.5 ml
- H_2SO_4 = 3.5 ml

Estándar 1 (500mg/L):

Para la preparación de esta dilución se colocó en un vial:

- Solución de Digestión = 1.5 ml
- Estándar 1 (500 ppm) = 2.5 ml
- H_2SO_4 = 3.5 ml

Estándar 2 (1000mg/L):

Para la preparación de esta dilución se colocó en un vial:

- Solución de Digestión = 1.5 ml
- Estándar 2 (1000 ppm) = 2.5 ml
- H_2SO_4 = 3.5 ml

Muestra:

Para la preparación de esta dilución se colocó en un vial:

- Solución de Digestión = 1.5 ml
- Muestra = 2.5 ml
- H_2SO_4 = 3.5 ml

Las disoluciones preparadas fueron agitadas y colocadas en el Reactor Digital a una temperatura de 150 °C y por un tiempo de dos horas.

Pasada las dos horas, se dejó enfriar a fin de que la temperatura descienda. Por último, con el Colorímetro se dio la lectura de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Primero, se colocó la dilución del Blanco; se presionó la opción “zero” para iniciar las mediciones. Luego, se dieron las lecturas de las diluciones de Estándar 1 y Estándar 2, expresadas en mg/L. Dichos estándares sirvieron para verificar la correcta medición con el equipo, ya que presentan una relación 1:2 (500 y 1000 ppm respectivamente). Por último, se dio lectura de la muestra, obteniendo un valor expresado en mg/L.

Determinación de Fosfato (PO_4^{3-})

Para la determinación de Fosfatos (PO_4^{3-}) se empleó el Método del ácido ascórbico.

a. Preparación de reactivos

Para la determinación de fosfato presente en la muestra inicial de agua residual, se prepararon los siguientes reactivos:

- H_2SO_4 5N
- Ácido ascórbico:

Se diluyó 1.76 gr de ácido ascórbico en 100 ml de agua destilada. Se enrazó en una fiola de 100 ml y se colocó en un frasco con su respectivo rótulo y con la denominación de ácido ascórbico.

- Solución emético:

Se diluyó 0.0274 gr de tartrato de antimonio y potasio en 100 ml de agua destilada. Se enrazó en una fiola de 100 ml y se colocó en un frasco con su respectivo rótulo y con la denominación de solución emético.

- Molibdato de amonio:

Se diluyó 4 gr de molibdato de amonio en 100 ml de agua destilada. Se enrazó en una fiola de 100 ml y se colocó en un frasco con su respectivo rótulo y con la denominación de ácido ascórbico.

- Solución Patrón de Fosfato de 100 ppm

-

b. Mezcla de reactivos

Preparados los reactivos, se realizó la mezcla de los mismos en una probeta de 25 ml; para ello, se extrajeron las siguientes cantidades:

- H_2SO_4 5N = 10 ml

- Molibdato de amonio = 3 ml

- Ácido ascórbico = 6 ml

- Solución emético = 1 ml

c. Preparación de las diluciones

Los estándares fueron preparados a partir de la solución hija. Para la preparación de dicha solución, en una fiola de 100 ml se mezcló 10 ml de Solución patrón fosfato con 100 ml de agua destilada.

Se prepararon cinco diluciones (muestra, blanco, estándar 1, estándar 2 y estándar 3) en probetas de 25 ml:

Blanco:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Agua destilada = 25 ml

Estándar 1:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Solución hija = 0.1 ml
- Agua destilada = 25 ml

Estándar 2:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Solución hija = 0.2 ml
- Agua destilada = 25 ml

Estándar 3:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Solución hija = 0.4 ml

- Agua destilada = 25 ml

Muestra de agua residual doméstica:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Muestra = 25 ml

Se añadió a cada probeta, 4 ml de la mezcla de reactivos ya preparada. Se agitó cada probeta para mezclar homogéneamente.

Se realizaron las lecturas con el Espectrofotómetro UV-Visible. Para la determinación del fosfato, se utilizó el programa N° 485 y el test amino acid (alt) descritos en el interior del equipo, con una longitud de onda de 530 nm. Primero, utilizando una cubeta de vidrio se colocó la dilución Blanco. Con el Blanco en el interior del equipo, se presionó la opción “zero” para poder iniciar las mediciones. Luego, se dieron las lecturas de las diluciones de Estándar 1, Estándar 2 y Estándar 3, expresadas en mg/L. Dichos estándares sirvieron para verificar la correcta medición con el equipo, ya que presentan una relación 1:2. Por último, se dio lectura a la Muestra, obteniendo un valor expresado en mg/L.

Determinación de Amonio

Para la determinación de Amonio se empleó el Método Colorimétrico (Azul de Indofenol).

a. Preparación de reactivos

Para la determinación de Amonio presente en la muestra inicial de agua residual, se prepararon las siguientes soluciones:

- Solución alcohol de fenol

Se diluyó 10 gr de fenol en cristales en 100 ml de alcohol al 97°C. Se enrazó en una fiola de 100 ml y se colocó en un frasco con su respectivo rótulo y con la denominación de Solución alcohol del fenol.

- Solución Nitroprusiato de Sodio:

Se diluyó 0.5 gr de nitroprusiato de sodio en 100 ml de agua destilada. Se enrazó en una fiola de 100 ml y se colocó en un frasco con su respectivo rótulo y con la denominación de Nitroprusiato de Sodio.

- Solución citrato sódico:

Se pesaron y diluyeron 20 gr de citrato de sodio y 1 gr de hidróxido de sodio en 100 ml de agua destilada. Se enrazó en una fiola de 100 ml y se colocó en un frasco con su respectivo rótulo y con la denominación de Citrato sódico.

- Solución oxidante:

Se combinó 25 ml de hipoclorito de sodio (Leguía comercial) con 100 ml de solución de citrato sódico. Se colocó en un frasco con su respectivo rótulo, con la denominación de Solución oxidante.

- Solución Patrón de cloruro de amonio de 100 ppm:

Se diluyó 0.382 gr de cloruro de amonio en 100 ml de agua destilada. Se enrazó en una fiola de 100 ml y se colocó en un frasco con su respectivo rótulo y con la denominación de Solución de cloruro de amonio.

b. Preparación de las diluciones

Se prepararon estándares a partir de la Solución Hija. Primero, se preparó la Solución Hija, para ello en una fiola de 100 ml, se mezcló 10 ml de Solución patrón de cloruro de amonio con 100 ml de agua destilada.

Se prepararon cinco diluciones (muestra, blanco, estándar 1, estándar 2 y estándar 3) en probetas de 50 ml:

Blanco:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Agua destilada = 50 ml

Estándar 1:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Solución hija = 0.1 ml
- Agua destilada = 50 ml

Estándar 2:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Solución hija = 0.2 ml
- Agua destilada = 50 ml

Estándar 3:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Solución hija = 0.4 ml
- Agua destilada = 50 ml

Muestra de agua residual doméstica:

Para la preparación de esta dilución se colocó en una probeta:

- Muestra = 50 ml

Se añadieron 2 ml de Solución Alcohol de fenol, 2 ml de Solución Nitroprusiato de sodio y 5 ml de Solución oxidante a cada una de las diluciones preparadas. Por último, se realizó una dilución de 1:20; es decir, se extrajo con una pipeta 1 ml de dilución y se combinó con 20 ml de agua destilada, teniendo cinco nuevas diluciones en probetas de 25 ml.

Se realizaron las lecturas con el Espectrofotómetro UV-Visible. Para la determinación de amonio, se utilizó el programa N° 385 y el test Salic descritos en el interior del equipo, con una longitud de onda de 655 nm. Primero, utilizando una cubeta de vidrio se colocó la dilución Blanco. Con el Blanco en el interior del equipo, se presionó la opción “zero” para poder iniciar las mediciones. Luego, se dieron las lecturas de las diluciones de Estándar 1, Estándar 2 y Estándar 3, expresadas en mg/L. Dichos estándares sirvieron para verificar la correcta medición con el equipo, ya que presentan una relación 1:2. Por último, se dio lectura a la Muestra, obteniendo un valor expresado en mg/L.

Determinación de Aceites y Grasas

Para la determinación de Aceites y Grasas se empleó el Método de Partición Gravimétrica. Se colocó un vaso precipitado en la estufa por un tiempo de dos horas a una temperatura de 80 °C. Pasada las dos horas, se retiró el vaso de la estufa y se colocó en el

deseCADador por un tiempo de 10 minutos. Luego, se pesó el vaso en la balanza analítica.

Teniendo el peso de vaso precipitado seco, se colocó en el desecador.

Se armó el equipo de decantación, que consistió en el medio de soporte y la pera de decantación.

En una probeta se midió 500 ml de la muestra de agua residual y se colocó en la pera de decantación. Se añadió 5 ml de ácido clorhídrico (HCl) y 25 ml de hexano. Se agitó la pera de decantación por cinco minutos, dejando escapar el gas de HCl. Se dejó decantar por un tiempo de media hora.

Transcurrida la media hora y observándose una película viscosa, se abrió la llave para iniciar el proceso de decantación. El líquido fue extraído, hasta quedar solo la capa viscosa que contenía los aceites y grasas presentes en la muestra. Esta película fue extraída de la pera de decantación en el vaso precipitado seco y llevado a la estufa por un tiempo de dos horas a una temperatura de 80 °C. Transcurrido dicho tiempo y habiéndose secado la muestra, se llevó el vaso al desecador dejándolo por un tiempo de quince minutos. Por último, se pesó el vaso seco con la muestra.

Teniendo el peso en gramos del vaso seco sin muestra y el peso del vaso seco con muestra, se determinó por diferencia de pesos la cantidad de aceites y grasas presente expresada en gramos.

$$\text{Peso vaso seco (con muestra)} - \text{peso vaso seco (sin muestra)} = [AyG]$$

Ecuación 1: *Peso de Aceites y grasas expresado en gramos*

Teniendo la cantidad de aceites y grasas presentes en la muestra, se realizó la conversión a miligramos. Por último, el resultado final fue expresado en mg/L; para ello,

el dividió entre 0.5 Litros (volumen de muestra del agua residual utilizada).

$$[AyG]_g \times 1000_{mg} = [AyG]_{mg}$$

Ecuación 2: *Peso de Aceites y grasas expresado en miligramos*

$$\frac{[AyG]_{mg}}{0.5l} = [AyG]_{mg/L}$$

Ecuación 3: *Peso de Aceites y grasas expresado en mg/L*

Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Para la determinación de Sólidos Suspendidos Totales se empleó el Método de los Sólidos Totales en Suspensión secados a 103-105 °C.

Se colocó un papel filtro de vidrio sobre una luna de reloj en la estufa por un tiempo de dos horas a una temperatura de 80 °C. Pasada las dos horas, se retiró el filtro con la luna de reloj y se colocó en el desecador por un tiempo de 15 minutos. Luego, se pesó en la balanza analítica. Teniendo el peso del papel filtro seco, se colocó nuevamente en el desecador.

Se armó el sistema de filtración, que consistió en la bomba de vacío, vaso de filtración y el matraz erlenmeyer. En una probeta se midió 100 ml de la muestra de agua residual. Se retiró el papel filtro del desecador y se colocó en el sistema de filtración. Luego, se colocó la muestra de agua residual para iniciar con el proceso de filtración.

Teniendo la muestra de sólidos suspendidos en el papel filtro, con la ayuda de una pinza de madera se colocó en la luna de reloj para el secado en la estufa a una temperatura de 103°C y un tiempo de dos horas. Transcurrido dicho tiempo, se llevó la luna de reloj con el papel filtro al desecador por un tiempo de 15 minutos.

Por último, se pesó el papel filtro seco con la muestra de sólidos. Teniendo el peso en gramos del papel filtro seco sin muestra y el peso del papel filtro seco con la muestra, se determinó a través de diferencia de pesos, la cantidad en gramos de sólidos suspendidos totales.

$$\text{Peso filtro seco (con muestra)} - \text{Peso filtro seco (sin muestra)} = [SST]$$

Teniendo la cantidad de sólidos suspendidos totales presentes en la muestra de agua residual, se realizó la conversión de gramos a miligramos.

$$[SST]_g \times 1000_{mg} = [SST]_{mg}$$

Por último, el resultado final fue expresado en mg/L; para ello, se dividió entre 0.1 Litros (volumen de muestra del agua residual utilizada).

$$\frac{[SST]_{mg}}{0.1l} = [SST]_{mg/L}$$

1.3.2 Desarrollo morfológico de las especies acuáticas utilizadas

Se determinó el desarrollo morfológico de las especies acuáticas empleadas: *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) antes, durante y después del tratamiento.

Para ello, en cada uno de los sistemas piloto, se realizaron las siguientes mediciones: altura promedio inicial aérea (tallo, hojas, brotes), altura máxima alcanzada antes y después de tratamiento, altura mínima alcanzada antes y después del tratamiento, largo promedio de las raíces antes y después del tratamiento.

1.3.3 Caracterización del agua residual doméstica después del tratamiento

Se determinó la calidad del efluente en función a sus parámetros físicos y químicos a fin de conocer las concentraciones después del tratamiento de las aguas residuales domésticas en los sistemas piloto y determinar la eficiencia de las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) en el tratamiento.

El agua residual tuvo un tiempo de retención de 48 horas para cada uno de los sistemas piloto, teniéndose un total de diez ensayos. En cada uno de ellos, se determinaron los parámetros básicos: pH, temperatura, conductividad y TDS; para ello, se empleó un multiparámetro, conductímetro y potenciómetro.

Además, se determinaron los siguientes parámetros físicos y químicos: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Fosfatos, Amonio, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Aceites y grasas. Para ello, se emplearon los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Residuales del APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) y WPCF (Water Pollution Control Federation).

Para la determinación de los parámetros (DBO, DQO, Fosfatos, Amonio, Aceites y grasas y Sólidos Suspendidos Totales) del agua residual doméstica después del tratamiento, se emplearon las metodologías anteriormente detalladas para la determinación de la calidad inicial del agua residual.

CAPÍTULO IV: CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

1.4 Determinación de los parámetros de diseño del sistema de humedal artificial

Los parámetros de diseño de los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial se determinaron a través de las ecuaciones establecidas en el manual emitido por la EPA (por sus siglas en inglés Environmental Protection Agency), empleada para determinar criterios de diseño y construcción de los humedales artificiales.

$$As = \frac{Q \ln \frac{Co}{Ce}}{Kt(h)(n)}$$

Ecuación 4: *Determinación del Caudal (Q)*

$$l = \frac{As}{a}$$

Ecuación 5: *Determinación del Área superficial*

Donde:

Ce: Concentración de DBO en el efluente (mg/L)

Co: Concentración de DBO en el afluente (mg/L)

Q: Caudal de ingreso a los humedales (m³/d)

h: Profundidad promedio del sistema.

a: Ancho del humedal (m)

l: Longitud del humedal (m)

Kt: Constante de primer orden dependiente de la T° (d⁻¹)

n: Porosidad promedio del sistema en fracción decimal

K_{20} : Constante de primer orden a 20°C (d^{-1})

T: Temperatura

Se hizo uso de los datos que se muestran en la Tabla 6; K_{20} y “n” (porosidad) se determinará mediante la siguiente tabla:

Tabla 6
Características del medio para sistemas de flujo subsuperficial

Tipo de medio	Tamaño del grano (mm)	Porosidad (n)	K_{20}
Arena media	1	0.42	1.84
Arena gruesa	2	0.39	1.35
Gravilla arenosa	8	0.35	0.86

Fuente: Espinosa Ortiz (2014)

- Valores K_t y n para ecuaciones de la EPA:

$$K_t = K_{20} (1,1)^{(T-20)}$$

Ecuación 6: Constante de primer orden dependiente de la T°

$$n = 0.35$$

La relación recomendable de largo y ancho del sistema del humedal es de:

$$\frac{\text{largo}}{\text{ancho}} = \frac{2}{1}$$

Por ello, teniendo la relación y la accesibilidad al lugar donde se implantarán los humedales artificiales, se tendrán 03 sistemas piloto de 0.5 m de largo (l) y 0.25 m de ancho (a) cada uno. Además, se determinó la concentración de DBO en el afluente (C_0)

en mg/L del agua residual doméstica antes del ingreso a los humedales y la concentración de DBO en el efluente (C_e) en mg/L del agua residual doméstica que se desea obtener a la salida del tratamiento. La C_o fue de 330 mg/L y la C_e que se desea obtener después del tratamiento fue de 70 mg/L. La altura (h) recomendable para el sistema de tratamiento fue de 0.45m.

Reemplazando en las ecuaciones, se determinó el Área superficial (A_s) y el Caudal de ingreso a los humedales (Q):

$$l = \frac{A_s}{a}$$

$$A_s = 0.5 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$$

$$A_s = 0.125 \text{ m}^2$$

Se determinó el K_t (Constante de primer orden dependiente de la Temperatura). Donde la temperatura ambiente promedio (T) fue de 21°C y según la tabla N° 6 el K_{20} es igual a 0.86:

$$K_t = K_{20} (1,1)^{(T-20)}$$

$$K_t = 0.86 \times (1.1)^{(21-20)}$$

$$K_t = 0.95$$

Teniendo los valores del Área superficial (A_s), K_t , C_o , C_e , n y h , se determinó el Caudal (Q) de ingreso a cada sistema piloto:

$$A_s = \frac{Q \ln \frac{C_o}{C_e}}{K_t(h)(n)}$$

$$0.125 = \frac{Q \ln\left(\frac{330}{70}\right)}{0.95(0.45)(0.35)}$$

$$Q = 0.1206 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q = 0.5 \text{ litro/hr}$$

Las dimensiones determinadas para los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial fueron:

- Ancho (a): 0.25 m
- Largo (l): 0.5 m
- Altura (h): 0.45 m
- Pendiente (S): 1%
- Porosidad (n): 0.35
- Altura del medio filtrante (sustrato): 0.20 m
- Altura del agua residual en el sistema: 0.17 m
- Volumen de agua en cada sistema: $0.021 \text{ m}^3 = 21 \text{ litros}$
- Área superficial: 0.125 m^2
- Caudal de ingreso (Q): $0.01306 \text{ m}^3/\text{d} = 0.5 \text{ litro/hora}$
- Concentración de DBO en el afluente (C_o): 330 mg/L
- Concentración de DBO en el efluente (C_e): 70 mg/L

1.5 Construcción de los sistemas de humedales de flujo subsuperficial

Los tres sistemas piloto de humedales artificiales (H₁, H₂ y H₃) se construirán con las mismas características geométricas, teniendo en cuenta los parámetros de diseño (obtenidas mediante las ecuaciones empleadas en el manual emitido por la EPA). Dichos sistemas fueron construidos de material de vidrio transparente de 4 mm de espesor, con dimensiones de 0.5 m de largo, 0.45 m de altura y 0.25 m de ancho.

Además, se contó con un reservorio de plástico de 30 litros de capacidad para el almacenamiento y distribución del agua residual doméstica, desde donde se distribuirá la misma hacia los tres sistemas de manera homogénea. En la parte inferior de una de las caras del reservorio, se realizaron tres orificios consecutivos de 1 pulgada de diámetro (ver Figura 9).

Figura 9

Preparación del reservorio de almacenamiento del agua residual

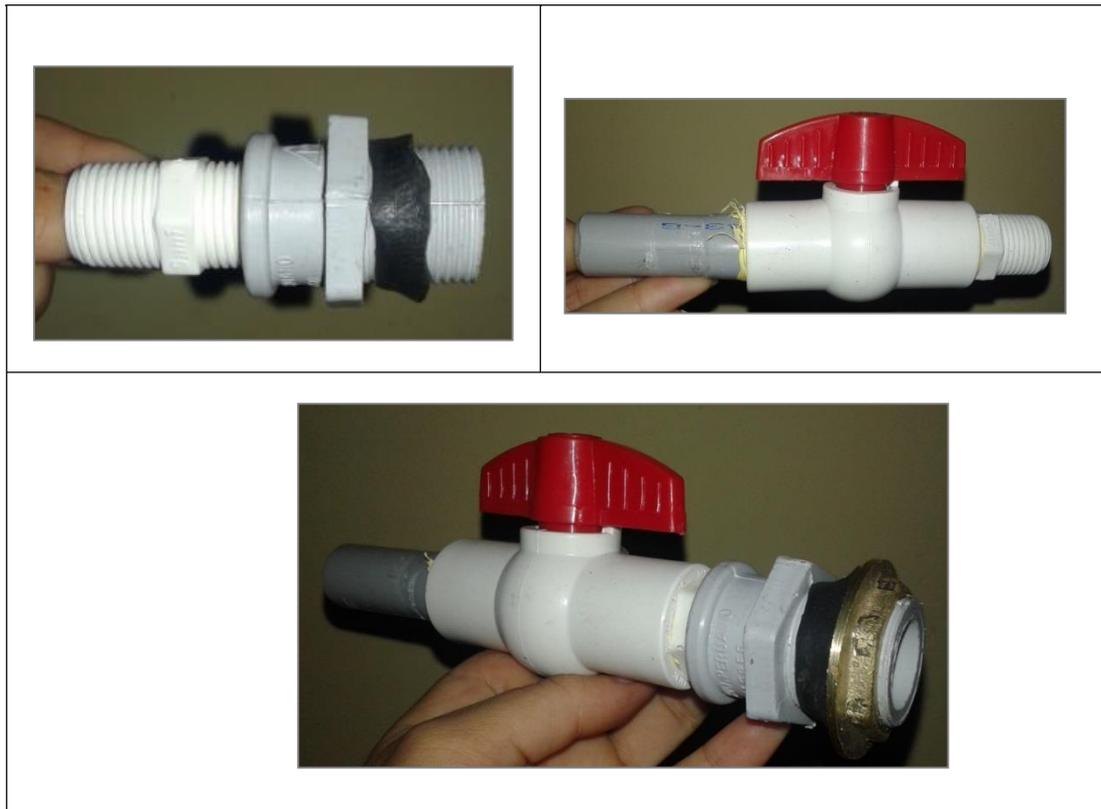


Fuente: Elaboración propia

En cada orificio se colocó un sistema para el paso del agua residual, para lo cual se utilizó un tubo bushing de 1" x 3/4". Este último, se unió con un niple de 3/4" para asegurarlo a una llave de paso de 3/4". Para evitar posibles pérdidas de agua, se aseguró por un extremo del tubo bushing, con una contratuerca de 1" y con caucho (ver Figura 10).

Figura 10

Preparación del sistema de ingreso del agua residual doméstica



Fuente: Elaboración propia

Por el otro extremo de la llave de paso, se colocó un adaptador de manguera de PVC de 3/4 con reducción a 1/2 pulgada seguida de un metro de manguera de plástico transparente de 5/8". Este sistema fue elaborado para los tres orificios, con la finalidad de permitir el paso del agua residual hacia los sistemas de humedales artificiales (ver figura 11).

Figura 11
Sistema de ingreso del agua residual doméstica en el reservorio



Fuente: Elaboración propia

En el extremo superior de una de las caras menores del sistema piloto de humedal artificial, se implementó un sistema de ingreso y salida de agua, a fin de distribuir con un flujo horizontal y de manera uniforme el agua residual; para ello se realizaron orificios en las caras menores del vidrio (en un extremo en la parte superior para el ingreso del agua al sistema; y en el otro extremo, en la parte inferior para la salida y toma de muestra). El sistema de ingreso del agua consistió en la unión de un tubo bushing de 1" x $\frac{3}{4}$ " y un adaptador de manguera con reducción de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ ". En una de los extremos del bushing se encajó un codo de 1". Para ajustar el codo al tubo bushing se empleó una contratuerca de 1" (ver Figura 12).

Figura 12

Preparación del sistema de ingreso del agua residual doméstica en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

Para la salida del agua residual de los humedales artificiales, se implementó un sistema que consistió en la unión de tubo bushing de PVC de 1" x 3/4" y un niple con rosca de 1/2". Esta última se conectó a una llave de paso de 3/4 para la toma de muestra del agua residual (ver Figura 13).

Figura 13
Preparación del sistema de salida del agua residual de los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

Figura 14
Sistemas piloto de humedal de agua residual



Fuente: Elaboración propia

1.6 Instalación del medio filtrante, siembra y desarrollo de las macrófitas acuáticas

Como sustrato o medio filtrante se emplearon arena gruesa, grava y piedra chancada, los mismos que fueron colocados en el interior de cada uno de los sistemas piloto. La altura de cama de sustrato fue de 20 cm, teniendo como base 6 cm de piedra chancada, seguido de 5 cm de grava, 5 cm de arena gruesa, y 4 cm de grava. Primero, se lavó el sustrato con abundante agua de caño para retirar todas las impurezas, y al final se enjuagó

con agua destilada. Después, se instaló la cama de sustrato con las alturas mencionadas (ver Figura 16).

Figura 15
Lavado del medio filtrante



Fuente: Elaboración propia

Figura 16
Instalación del medio filtrante en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, las macrófitas acuáticas empleadas fueron: *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco), las cuales son especies emergentes, enraizadas en el medio filtrante, en el cual se llevará a cabo la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual doméstica. La especie *Typha domingensis* (totora) fue plantada en el sistema H₁; la *Phragmites australis* (carricillo), en el sistema H₂; y la *Schoenoplectus americanus* (junco), en el sistema H₃. Antes de la instalación en los sistemas, se realizó el lavado de las raíces, tallos y hojas con agua de caño, y por último con agua destilada (ver Figura 17). Lavadas las especies, se realizaron las medidas iniciales de las raíces que serían sembradas en los sistemas (ver Figura 18).

Figura 17

Lavado de las tres especies macrofitas empleadas (totora , carricillo y junco)





Fuente: Elaboración propia

Figura 18
Medición de las raíces de las especies macrófitas antes de sembrarlas



Fuente: Elaboración propia

Las plantas fueron colocadas en el medio filtrante, donde las raíces fueron colocadas a una profundidad de 15 cm en el medio filtrante (ver Figura 19).

Figura 19
*Instalación de las especie macrófitas
en el medio filtrante*



Fuente: Elaboración propia

Durante el desarrollo de la investigación, se observó el desarrollo morfológico de las especies, a fin de conocer la altura promedio alcanzada (zona visible), altura mínima inicial y final, altura máxima inicial y final, velocidad de crecimiento, y altura promedio inicial y final de las raíces.

El agua residual circulará a través del medio filtrante, y se mantendrá retenida con tiempo de retención de 48 hrs. para cada sistema.

CAPÍTULOS V: RESULTADOS

En el presente capítulo, se indican los resultados obtenidos en el tratamiento del agua residual doméstica a través de los sistemas piloto de humedales sembrados con las especies macrófitas *Typha domingensis* (tatora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Scirpus americanus* (junco).

Se obtuvieron los parámetros básicos, físicos y químicos del agua residual antes del tratamiento; así como también, se determinó la calidad del agua residual obtenida en los sistemas H₁, H₂ y H₃, posterior al tratamiento. Los sistemas piloto iniciaron su funcionamiento el 16 de junio del 2018 y sus operaciones finalizaron el 13 de setiembre del 2018.

Se determinaron los valores de los parámetros fisicoquímicos: pH, Temperatura, Conductividad eléctrica, TDS y Sólidos Suspendidos Totales (SST); los parámetros de indicadores de carga orgánica: DBO, DQO, Aceites y grasas; y los parámetros nutrientes: Amonio, Fosfatos.

1.7 Determinación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas antes del tratamiento

En esta etapa se determinó la calidad del agua residual doméstica a través de su caracterización antes del ingreso a los sistemas piloto. Para ello, se obtuvieron los parámetros básicos y los parámetros físicos y químicos mencionados.

Los parámetros básicos o parámetros de campo obtenidos fueron los obtenidos en la Tabla 7.

Tabla 7
Parámetros básicos registrados antes del tratamiento

Parámetros básicos	Valores
Conductividad	845 $\mu\text{s/cm}$
TDS	450 mg/L
Temperatura	21 °C
pH	7.36

Fuente: Elaboración propia

Así como también, se determinaron los siguientes parámetros físicos y químicos. Para ello, se realizaron tres mediciones de las cuales se obtuvieron los valores promedio de la caracterización del agua residual (ver Tabla 8).

Tabla 8
Parámetros físicos y químicos registrados antes del tratamiento

Parámetros	1era Medición (mg/L)	2da Medición (mg/L)	3era medición (mg/L)	Promedio (mg/L)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	300	360	330	330
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	553	442	533	509.33
Fosfatos (PO_4^{-3})	19.13	24.99	23.11	22.41
Amonio (NH_4^+)	8.6	10	9.6	9.4

Aceites y grasas	100	216	192.6	169.53
Sólidos Suspendidos Totales	281	472	485	412.67

Fuente: Elaboración propia

1.8 Desarrollo morfológico de la *Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Scirpus americanus* durante y después del tratamiento

Se determinó el desarrollo morfológico de las macrófitas acuáticas sembradas en los sistemas de humedales artificiales. Para ello, se realizaron las mediciones de altura durante la etapa de investigación, con la finalidad de conocer el proceso de adaptación y crecimiento de las especies acuáticas en el tratamiento de las aguas residuales domésticas. El crecimiento de los especies vegetales fueron evaluadas desde el primer día que fueron sembradas, y las mediciones fueron realizadas cada cuatro días.

En cada uno de los sistemas de humedales piloto planteados, fueron sembradas unidades de las especies acuáticas; es decir, en el sistema H₁ se sembraron nueve unidades de la especie *Typha domingensis* (totora); en el sistema H₂, nueve unidades de la especie *Phragmites australis* (carricillo); y en el sistema H₃, nueve unidades de la especie *Schoenoplectus americanus* (junco). De los cuales, se tomó como muestra para la medición del crecimiento a nueve individuos para las especies *Typha domingensis* (totora) y *Schoenoplectus americanus* (junco) y seis individuos para la especie *Phragmites australis* (carricillo).

En las Tabla 9, 10 y 11 se muestran las alturas obtenidas de las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco), desde el día que fueron sembradas en los sistemas piloto (16/06/2018) y culminó

el día final de la investigación (13/09/2018).

Además, se determinó la altura promedio total (obtenida a partir de las mediciones del crecimiento de las especies, en todo el periodo de investigación) de las tres especies acuáticas, obteniendo los siguiente valores: 63.28, 82.10 y 61.67 para las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) respectivamente (ver Tabla 12); así como también, se determinó la altura aérea promedio inicial y final de las especies acuáticas en cada sistema piloto, lo cual se muestra en la Tabla 13. La altura promedio inicial de las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) sembradas fueron respectivamente 20.66, 78.87, 47.60, y las alturas promedio finales de las mismas obtenida al culminar la investigación fueron: 103.21, 82.58, 75.40 respectivamente. Por otro lado, se realizaron las mediciones de crecimiento de las raíces; para ello, se tuvieron muestras para cada especie, determinando las mediciones iniciales (antes de sembrar las especies en los sistemas piloto) y las mediciones finales (terminado el periodo de investigación) a fin de conocer el desarrollo de crecimiento de las raíces (ver tablas 14, 15 y 16).

Para el caso de la especie *Phragmites australis* (carricillo), también se realizaron las mediciones de crecimiento de los brotes y de las hojas en los individuos escogidos los cuales se detallan en la Tabla 17 y 18.

Tabla 9

Mediciones de altura de la especie Typha domingensis (totora) en el periodo de investigación

Muestra	Periodo de la investigación																	
	Junio			Julio						Agosto				Setiembre				
	16	21	26	2	7	12	17	23	28	2	7	13	18	23	28	3	8	13
1	27.0	32.7	38.3	44.0	47.7	54.0	63.0	70.5	73.2	74.3	83.6	89.2	94.9	100.6	106.4	111.2	114.1	117.2
2	49.0	52.1	55.2	57.1	61.7	64.4	67.9	72.4	74.6	74.6	79.9	82.9	86.0	89.1	91.3	94.6	96.4	99.3
3	67.1	71.4	75.2	77.1	82.5	84.2	86.5	87.3	87.5	87.7	87.8	87.9	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0
4	8.3	10.7	12.6	23.7	34.7	45.8	51.9	68.1	79.4	94.5	107.9	112.8	115.9	116.5	117	125	138.8	143.2
5	6.5	8.2	10.1	12.3	15.5	20.0	25.0	41.0	52.3	67.3	86.8	97.7	113.0	123.0	127.8	128.7	128.8	129
6	7.4	9.4	11.0	14.1	22.6	31.2	39.8	46.7	54.2	67.4	79.8	84.0	86.3	86.5	86.8	86.9	87.8	88.5
7	7.2	8.5	9.6	11.2	13.5	16.7	24.1	31.5	33.0	49.3	60.1	62.7	63.3	63.3	63.3	63.3	63.3	63.3
8	7.1	8.1	9.8	10.1	12.5	14.4	17.3	28.0	36.7	50.2	62.9	71.3	79.7	84.9	88.8	89.3	101	104.2
9	6.1	7.1	8.2	10.8	11.7	13.2	15.6	20.7	32.7	47.5	65.4	75.0	87.1	92.5	95.3	96	96	96.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10
Mediciones de altura de la especie Phragmites australis (carricillo) en el periodo de investigación

Muestra	Periodo de la investigación																	
	Junio			Julio						Agosto				Setiembre				
	16	21	26	2	7	12	17	23	28	2	7	13	18	23	28	3	8	13
1	65.5	67.4	70.3	69.5	70.2	70.4	70.5	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
2	83.5	85	85.7	86	86	86.2	86.3	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4
3	73.4	74.5	75	74.5	76	76.1	76.2	76.4	76.4	76.4	76.4	76.4	76.4	76.4	76.4	76.4	76.4	76.4
4	80.5	81.3	82.5	82.1	82.3	82.5	82.5	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
5	84.2	88	88.7	88	88.6	88.9	89	89.2	89.2	89.2	89.2	89.2	89.2	89.2	89.2	89.2	89.2	89.2
6	86.1	86.4	89.4	89.1	89.3	89.4	89.4	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11

Mediciones de altura de la especie Schoenoplectus americanus (junco) en el periodo de investigación

Muestra	Periodo de la investigación																	
	Junio			Julio						Agosto				Setiembre				
	16	21	26	2	7	12	17	23	28	2	7	13	18	23	28	3	8	13
1	44.3	45.4	45.7	45.9	46.0	46.3	46.4	46.5	46.7	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8
2	47.3	51.7	50.0	50.3	50.5	50.7	50.8	51.0	51.2	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3
3	45.8	46.7	46.6	47.0	47.1	47.5	47.8	47.7	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8	47.8
4	77.0	78.0	78.2	78.4	78.7	78.9	79.1	79.0	79.4	79.4	79.4	79.4	79.4	79.4	79.4	79.4	79.4	79.4
5	91.6	91.8	92.0	92.0	92.5	92.7	93.0	93.5	93.7	93.7	93.9	94.0	94.2	94.2	94.3	94.4	94.4	94.4
6	37.3	39.0	40.8	42.5	44.2	45.9	47.0	47.2	52.5	54.0	55.5	56.5	56.6	56.7	71	85.3	96.2	100.2
7	8.7	13.8	19.0	24.1	29.3	34.4	39.6	44.7	49.3	55.1	61.2	65.2	70.0	81.0	89	89.5	90.3	91.2
8	58.4	58.5	58.6	58.7	58.7	58.8	58.9	58.9	59.0	59.1	59.1	59.2	59.3	60.0	60	60	60	60
9	18.1	24.2	30.4	36.6	42.8	49.0	55.2	61.4	67.6	72.5	81.9	86.2	91.7	93.7	102.5	105.5	106.2	107.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12
 Alturas promedio de las especies macrófitas

Periodo de investigación	Altura promedio (cm)			
	<i>Typha domingensis</i>	<i>Phragmites</i>	<i>Schoenoplectus</i>	
	(totora)	<i>australis</i> (carricillo)	<i>americanus</i> (junco)	
Junio	16	20.66	78.87	47.60
	21	23.13	80.43	49.91
	26	25.55	81.93	51.25
	2	28.92	81.53	52.83
	7	33.60	82.07	54.42
Julio	12	38.20	82.25	56.03
	17	43.45	82.32	57.53
	23	51.80	82.58	58.88
	28	58.18	82.58	60.80
	2	68.09	82.58	62.19
Agosto	7	79.35	82.58	64.10
	13	84.84	82.58	65.16
	18	90.47	82.58	66.34
	23	93.82	82.58	68.28
	28	96.08	82.58	71.34
Setiembre	3	98.11	82.58	73.33
	8	101.58	82.58	74.71
	13	103.21	82.58	75.40

Periodo de investigación	Altura promedio (cm)		
	<i>Typha domingensis</i> (totora)	<i>Phragmites australis</i> (carricillo)	<i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)
Altura promedio total (cm)	63.28	82.10	61.67

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13
Altura aérea promedio inicial y final de las especies macrófitas

Altura (cm)	Especies macrófitas		
	<i>Typha domingensis</i> (totora)	<i>Phragmites australis</i> (carricillo)	<i>Schoenoplectus americanus</i> (junco)
	Altura promedio inicial	20.66	78.87
Altura promedio final	103.21	82.58	75.40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14
Mediciones de las raíces de la especie Typha domingensis (totora)

Muestra	Medida inicial (cm)	Medida final (cm)
R ₁	13.5	26
R ₂	14.4	23

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15
Mediciones de las raíces de la especie Phragmites australis (carricillo)

Muestra	Medida inicial (cm)	Medida final (cm)
R ₁	35	47
R ₂	15	50
R ₃	17	39
R ₄	21	27
R ₅	31	46

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16
Mediciones de las raíces de la especie Schoenoplectus americanus (junco)

Muestra	Medida inicial (cm)	Medida final (cm)
R ₁	9	27
R ₂	13	23
R ₃	14	25
R ₄	24	28

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17
 Mediciones de crecimiento de brotes de la especie *Phragmites australis* (carricillo)

Muestra	Periodo de la investigación																	
	Junio			Julio						Agosto				Setiembre				
	16	21	26	2	7	12	17	23	28	2	7	13	18	23	28	3	8	13
1	SB	SB	SB	SB	8	14	17.5	24.3	29.5	32.6	38	41.2	41.8	47.5	48.7	50	51	51.8
2	5	5.2	5	5.4	5.4	5.2	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
	7.3	9	8.2	9	9.6	10.2	11	11	11	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
3	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB
4	7	8	9.8	13.3	19.5	25.2	32	36.5	41.2	45.8	53.2	61.5	68.5	80	93.5	104	111	115
5	10.4	12.6	13	13	13	13.5	15.3	15.5	16	16.5	16.5	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6
6	10.4	12	15.3	21.3	26.9	31	28.9	32.5	29	33	35.3	41	41.3	48.5	49.1	50	51.2	52.3

Fuente: Elaboración propia

SB: Sin brote

M: Marchito

Tabla 18
*Cantidad y promedio inicial y final de hojas de la especie
 Phragmites australis (carricillo)*

Muestra	Inicial (cm)	Final (cm)
Cantidad	7	42
Hojas		
Longitud promedio	9	18.35

Fuente: Elaboración propia

1.9 Determinación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas después del tratamiento por humedales artificiales

En esta etapa se determinó la calidad del agua residual doméstica después del tratamiento en los sistemas piloto de humedales, obteniendo como resultados los parámetros básicos y los parámetros físicos y químicos en los tres sistemas. Se tuvo diez mediciones; cada una de ellas tomadas después de un tiempo de retención de 48 hrs en cada sistema piloto.

1.9.1 Conductividad eléctrica

Se obtuvieron los valores de conductividad eléctrica de las muestras de agua después del tratamiento para cada sistema piloto.

En la Tabla 19 se indican los valores obtenidos de las mediciones en los tres sistemas de humedales.

Tabla 19
 Valores de conductividad eléctrica en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H ₁ (μs/cm)	H ₂ (μs/cm)	H ₃ (μs/cm)
1	956	855	934
2	934	815	843
3	1486	889	1004
4	1022	1000	1101
5	1057	1010	1110
6	1148	1014	1062
7	1155	1012	1038
8	1153	1043	1031
9	1093	968	986
10	1104	1067	1064

Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

En el Tabla 20 se muestra el valor inicial promedio de la conductividad antes del tratamiento en comparación con los valores promedios de la conductividad obtenidos a partir de las diez mediciones para cada especie macrófita después del tratamiento.

Los valores promedios obtenidos en los sistemas H₁, H₂ y H₃ posterior al tratamiento fueron 1110.8, 967.3 y 1017.3 μs/cm respectivamente (ver Figura 20).

Tabla 20
Conductividad promedio antes y después del tratamiento

Sistemas de humedales	Valor Promedio inicial ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Valor Promedio final ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
H ₁	979.2	1110.8
H ₂	979.2	967.3
H ₃	979.2	1017.3

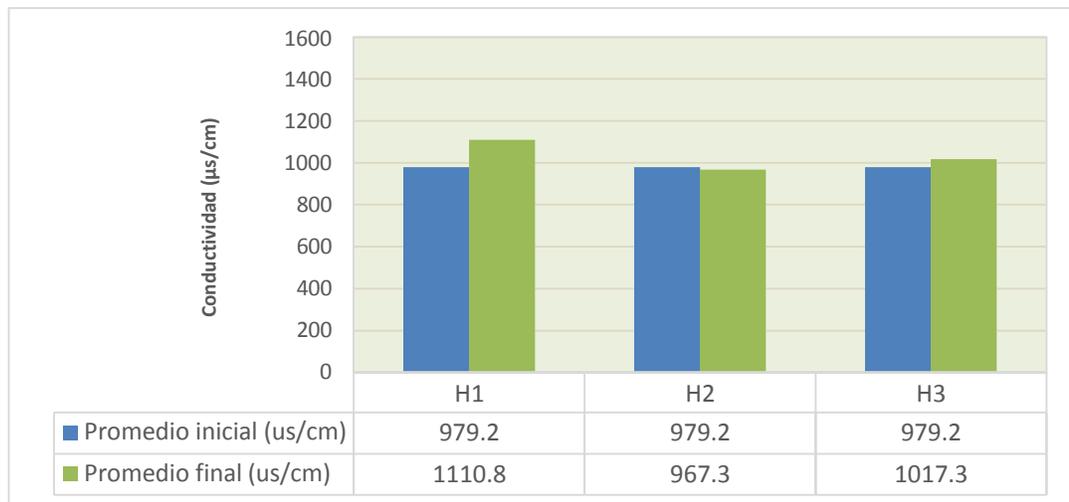
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 20
Conductividad eléctrica promedio obtenida en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

1.9.1.1 Conductividad en efluente H₁

Los valores obtenidos en las diez mediciones de conductividad tanto de ingreso como los obtenidos a la salida del sistema piloto H₁ se detallan en la Tabla 21 (ver Figura 21).

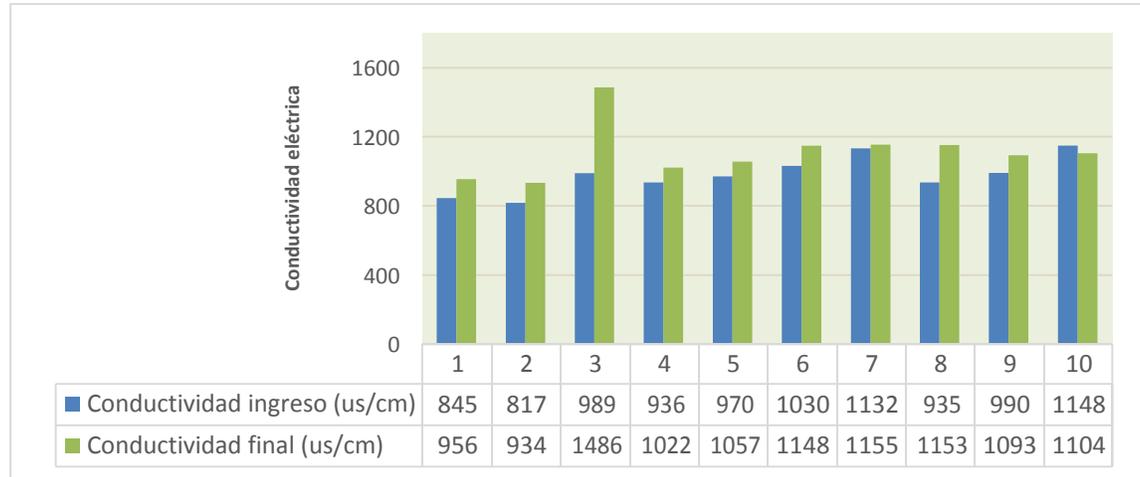
Tabla 21
Conductividad eléctrica obtenida en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₁

N° de mediciones	Conductividad ingreso ($\mu\text{s/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{s/cm}$)
1	845	956
2	817	934
3	989	1486
4	936	1022
5	970	1057
6	1030	1148
7	1132	1155
8	935	1153
9	990	1093
10	1148	1104

Fuente: Elaboración propia

Figura 21

Conductividad eléctrica al ingreso y salida del tratamiento con la especie Typha domingensis (totora)



A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 979.2 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 1110.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Ver Tabla 22).

En el periodo de investigación, la conductividad del efluente H_1 varió entre 934 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (conductividad mínima registrada en la segunda medición) y 1155 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (conductividad máxima registrada en la séptima medición).

Tabla 22

Conductividad eléctrica promedio al ingreso y salida del sistema H_1

N° de mediciones	Conductividad ingreso	Conductividad final
	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	845	956
2	817	934
3	989	1486

N° de mediciones	Conductividad ingreso ($\mu\text{s/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{s/cm}$)
4	936	1022
5	970	1057
6	1030	1148
7	1132	1155
8	935	1153
9	990	1093
10	1148	1104
Promedio	979.2	1110.8

Fuente: Elaboración propia

1.9.1.2 Conductividad en efluente H_2

Los valores obtenidos en las diez mediciones de conductividad tanto de ingreso como los obtenidos a la salida del sistema piloto H_2 se detallan en la Tabla 23 (ver Figura 22).

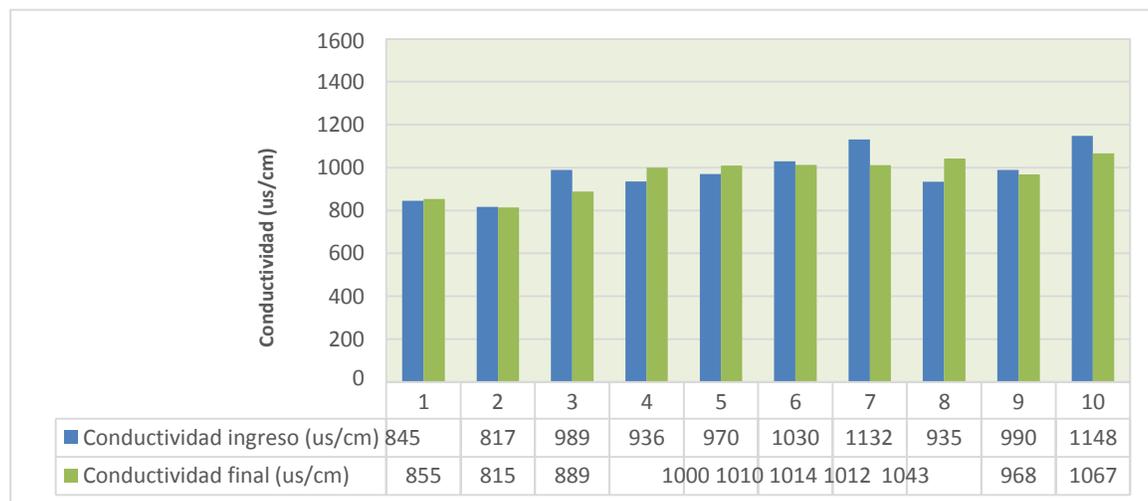
Tabla 23
Conductividad eléctrica obtenida en las mediciones al ingreso y salida del sistema H_2

N° de mediciones	Conductividad ingreso ($\mu\text{s/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{s/cm}$)
1	845	855
2	817	815
3	989	889

N° de mediciones	Conductividad ingreso ($\mu\text{s/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{s/cm}$)
4	936	1000
5	970	1010
6	1030	1014
7	1008	1012
8	935	1043
9	990	968
10	1148	1067

Fuente: Elaboración propia

Figura 22
Conductividad eléctrica al ingreso y salida del tratamiento con la especie Phragmites australis (carricillo)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 979.2 $\mu\text{s/cm}$ y 967.3 $\mu\text{s/cm}$ (Ver Tabla 24).

En el periodo de investigación, la conductividad del efluente H_2 varió entre 815 $\mu\text{s/cm}$ (conductividad mínima registrada en la segunda medición) y 1067 $\mu\text{s/cm}$ (conductividad máxima registrada en la séptima medición).

Tabla 24
Conductividad eléctrica promedio al ingreso y salida del sistema H_2

N° de mediciones	Conductividad ingreso ($\mu\text{s/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{s/cm}$)
1	845	855
2	817	815
3	989	889
4	936	1000
5	970	1010
6	1030	1014
7	1132	1012
8	935	1043
9	990	968
10	1148	1067
Promedio	979.2	967.3

Fuente: Elaboración propia

1.9.1.3 Conductividad en efluente H₃

Los valores obtenidos en las diez mediciones de conductividad tanto de ingreso como los obtenidos a la salida del sistema piloto H₃ se detallan en la Tabla 25 (ver Figura 23).

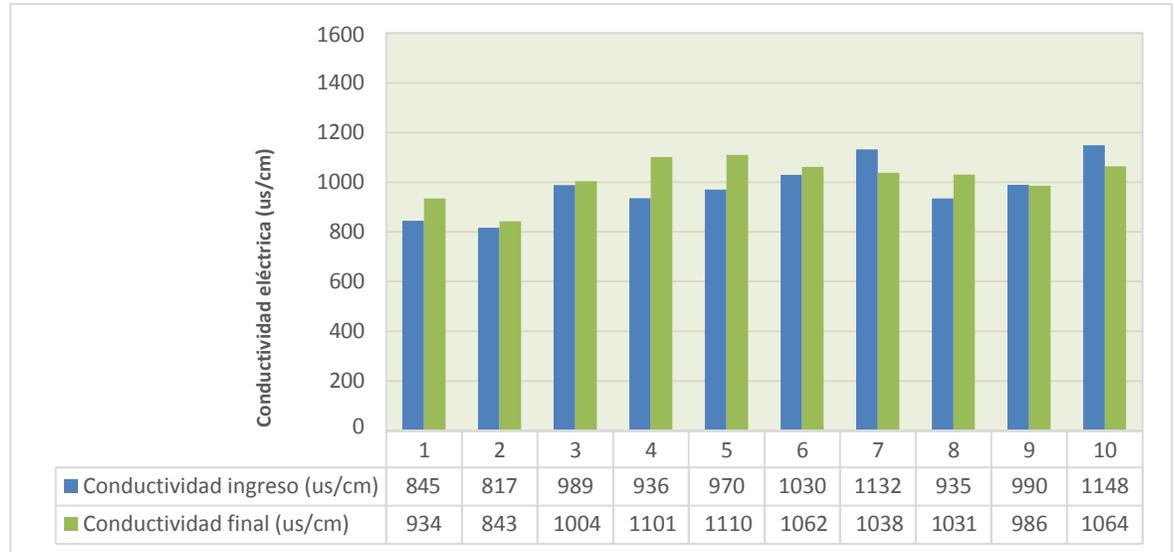
Tabla 25
Conductividad eléctrica obtenida en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₃

Nº de mediciones	Conductividad ingreso ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	845	934
2	817	843
3	989	1004
4	936	1101
5	970	1110
6	1030	1062
7	1132	1038
8	935	1031
9	990	986
10	1148	1064

Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Conductividad eléctrica al ingreso y salida del tratamiento con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 979.2 $\mu\text{s/cm}$ y 1017.3 $\mu\text{s/cm}$ (ver Tabla 26).

En el periodo de investigación, la conductividad del efluente H_3 varió entre 843 $\mu\text{s/cm}$ (conductividad mínima registrada en la segunda medición) y 1064 $\mu\text{s/cm}$ (conductividad máxima registrada en la décima medición).

Tabla 26

Conductividad eléctrica promedio al ingreso y salida del sistema H_3

N° de mediciones	Conductividad ingreso	Conductividad final
	($\mu\text{s/cm}$)	($\mu\text{s/cm}$)
1	845	934

N° de mediciones	Conductividad ingreso ($\mu\text{s/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{s/cm}$)
2	817	843
3	989	1004
4	936	1101
5	970	1110
6	1030	1062
7	1132	1038
8	935	1031
9	990	986
10	1148	1064
Promedio	979.2	1017.3

Fuente: Elaboración propia

1.9.2 TDS

Se obtuvieron los valores de TDS de las muestras de agua después del tratamiento para cada sistema piloto. En la Tabla 27 se indican los valores obtenidos de las mediciones en los tres sistemas de humedales.

Tabla 27
Valores de TDS obtenidos en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H ₁ (mg/L)	H ₂ (mg/L)	H ₃ (mg/L)
1	556	486	487

N° de mediciones	H ₁ (mg/L)	H ₂ (mg/L)	H ₃ (mg/L)
2	573	417	468
3	738	435	512
4	502	491	491
5	520	496	546
6	566	498	522
7	569	497	510
8	568	512	506
9	538	475	484
10	543	525	523

Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

En la Figura 24 se muestra el valor inicial promedio de TDS antes del tratamiento en comparación con los valores promedios de TDS obtenidos a partir de las diez mediciones para cada especie macrófita después del tratamiento. Los valores promedios obtenidos en los sistemas H₁, H₂ y H₃ posterior al tratamiento fueron 567.3, 483.2 y 504.9 mg/L respectivamente, los cuales se detallan en la Tabla 28.

Tabla 28
TDS promedio antes y después del tratamiento

Sistemas de humedales	Valor Promedio inicial (mg/L)	Valor Promedio final (mg/L)
H ₁	487	567.3
H ₂	487	483.2
H ₃	487	504.9

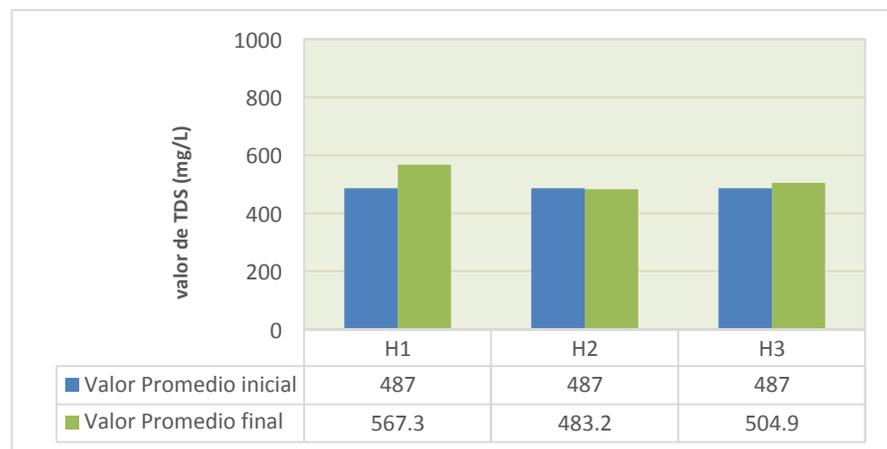
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 24
Valores de TDS promedio obtenidos en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

1.9.2.1 TDS en efluente H₁

Los valores obtenidos en las diez mediciones de TDS de las muestras de agua residual, tanto antes del tratamiento, como a la salida del sistema piloto H₁ se detallan en la Tabla

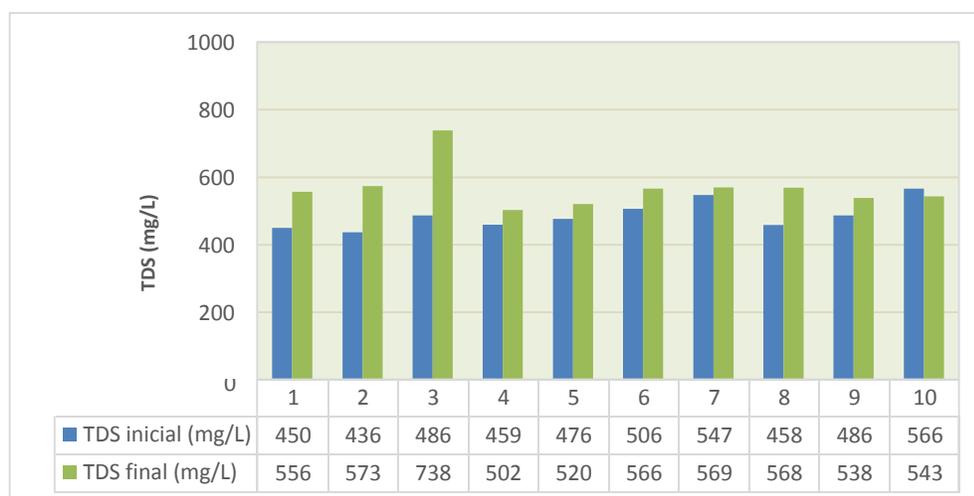
29 (ver Figura 25).

Tabla 29
Valores de TDS obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₁

N° de mediciones	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)
1	450	556
2	436	573
3	486	738
4	459	502
5	476	520
6	506	566
7	547	569
8	458	568
9	486	538
10	566	543

Fuente: Elaboración propia

Figura 25
 Valores de TDS al ingreso y a la salida del tratamiento con la *Typha domingensis* (totora)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 487 mg/L y 567.3 mg/L respectivamente (ver Tabla 30).

En el periodo de investigación, el valor de TDS del efluente H_1 varió entre 502 mg/L (TDS mínimo registrado en la cuarta medición) y 738 mg/L (TDS máximo registrado en la tercera medición).

Tabla 30
 TDS promedio al ingreso y salida del sistema H_1

N° de mediciones	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)
1	450	556
2	436	573
3	486	738

N° de mediciones	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)
4	459	502
5	476	520
6	506	566
7	547	569
8	458	568
9	486	538
10	566	543
Promedio	487	567.3

Fuente: Elaboración propia

1.9.2.2 TDS en efluente H₂

Los valores obtenidos en las diez mediciones de TDS de las muestras de agua residual, tanto antes del tratamiento, como a la salida del sistema piloto H₂ se detallan en la Tabla 31 (ver Figura 26).

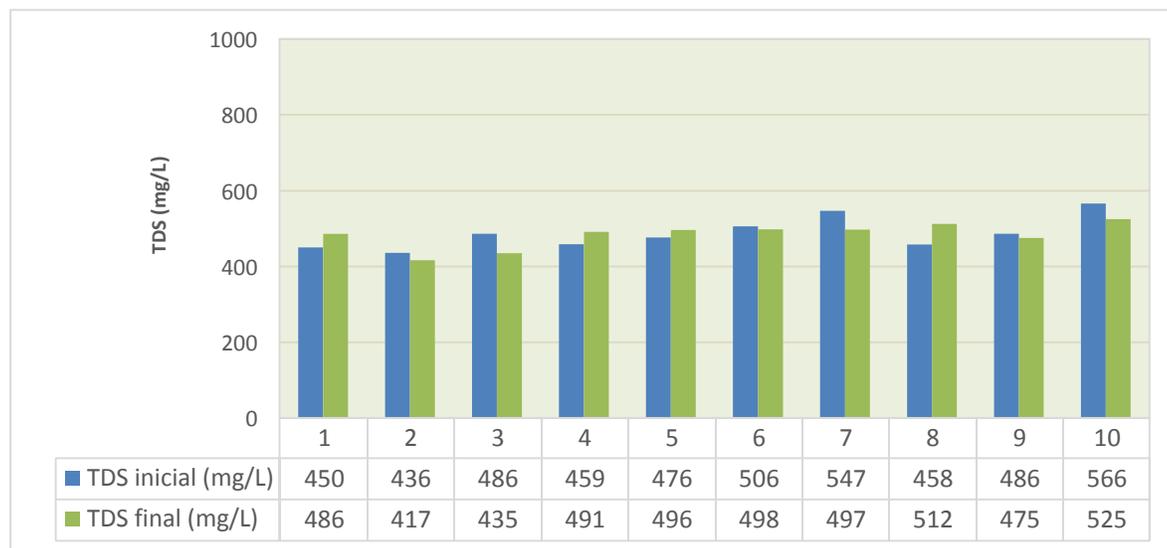
Tabla 31
Valores de TDS obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₂

N° de mediciones	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)
1	450	486
2	436	417
3	486	435
4	459	491

N° de mediciones	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)
5	476	496
6	506	498
7	547	497
8	458	512
9	486	475
10	566	525

Fuente: Elaboración propia

Figura 26
Valores de TDS al ingreso y salida del tratamiento con la *Phragmites australis* (carricillo)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 487 mg/L y 483.2 mg/L respectivamente (ver Tabla 32).

En el periodo de investigación, el valor de TDS del efluente H₂ varió entre 417 mg/L (TDS mínimo registrado en la segunda medición) y 525 mg/L (TDS máximo registrado en la décima medición).

Tabla 32
TDS promedio al ingreso y salida del sistema H₂

N° de mediciones	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)
1	450	486
2	436	417
3	486	435
4	459	491
5	476	496
6	506	498
7	547	497
8	458	512
9	486	475
10	566	525
Promedio	487	483.2

Fuente: Elaboración propia

1.9.2.3 TDS en efluente H₃

Los valores obtenidos en las diez mediciones de TDS de las muestras de agua residual, tanto antes del tratamiento, como a la salida del sistema piloto H₃ se detallan en la Tabla 33 (ver Figura 27).

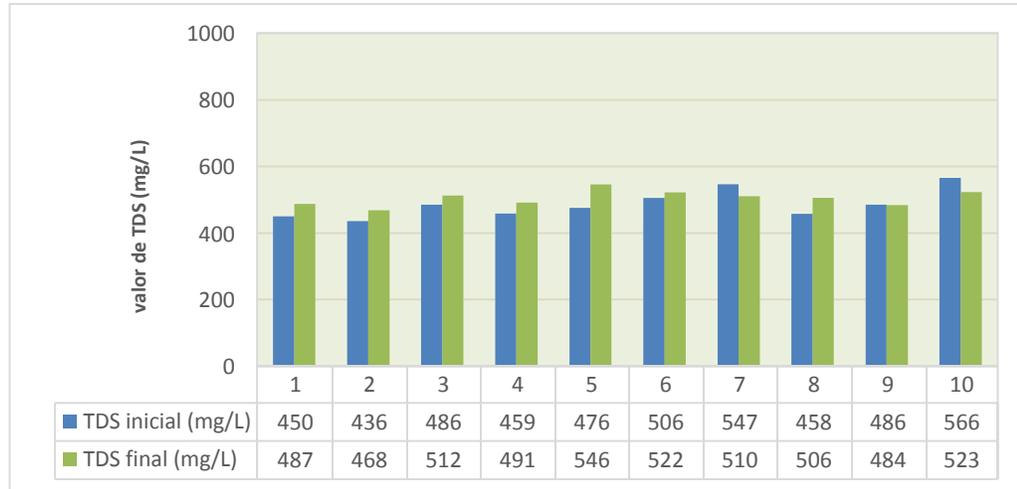
Tabla 33

Valores de TDS obtenidos en las mediciones al ingreso y a la salida del sistema H₃

N° de mediciones	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)
1	450	487
2	436	468
3	486	512
4	459	491
5	476	546
6	506	522
7	547	510
8	458	506
9	486	484
10	566	523

Fuente: Elaboración propia

Figura 27
 Valores de TDS al ingreso y salida del tratamiento con la *Schoenoplectus americanus* (junco)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 487 mg/L y 504.90 mg/L respectivamente (ver Tabla 34).

En el periodo de investigación, el valor de TDS del efluente H₃ varió entre 468 mg/L (TDS mínimo registrado en la segunda medición) y 546 mg/L (TDS máximo registrado en la quinta medición).

Tabla 34
 TDS promedio al ingreso y salida del sistema H₃

N° de mediciones	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)
1	450	487
2	436	468

N° de mediciones	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)
3	486	512
4	459	491
5	476	546
6	506	522
7	547	510
8	458	506
9	486	484
10	566	523
Promedio	487	504.90

Fuente: Elaboración propia

1.9.3 Temperatura

Se obtuvieron los valores de Temperatura de las muestras de agua después del tratamiento para cada sistema piloto. En la Tabla 35 se indican los valores obtenidos de las mediciones en los tres sistemas de humedales.

Tabla 35
Valores de temperatura en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H₁ (°C)	H₂ (°C)	H₃ (°C)
1	20.7	19.5	20.3
2	19.3	19.6	19.8
3	18.2	18.5	18.7
4	18.3	18.3	18.6

N° de mediciones	H₁ (°C)	H₂ (°C)	H₃ (°C)
5	17.8	17.7	17.9
6	18.4	17.7	18.1
7	17.1	17	17.2
8	17.2	17	17.2
9	17.1	16.8	17.2
10	17.4	17.3	17.3

Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

En la Tabla 36 se muestra el valor inicial promedio de la Temperatura antes del tratamiento en comparación con los valores promedios de la Temperatura obtenidos a partir de las diez mediciones para cada especie macrófita después del tratamiento. Los valores promedios obtenidos en los sistemas H₁, H₂ y H₃ posterior al tratamiento fueron 18.15 °C, 17.94 °C y 18.23 °C respectivamente (ver Figura 28).

Tabla 36

Temperatura promedio antes y después del tratamiento

Sistemas de humedales	Valor Promedio inicial (°C)	Valor Promedio final (°C)
H ₁	19.61	18.15
H ₂	19.61	17.94
H ₃	19.61	18.23

Fuente: Elaboración propia

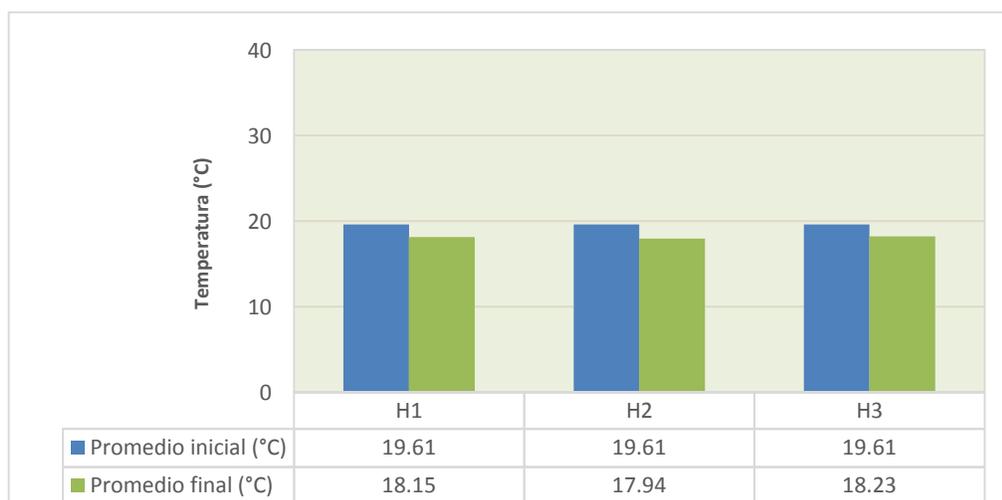
H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 28

Valores de Temperatura promedio obtenidos en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

1.9.3.1 Temperatura en el efluente H₁

Los valores obtenidos en las diez mediciones de la Temperatura de las muestras de agua residual, tanto antes del tratamiento, como a la salida del sistema piloto H₁ se detallan en la Tabla 37 (ver Figura 29).

Tabla 37

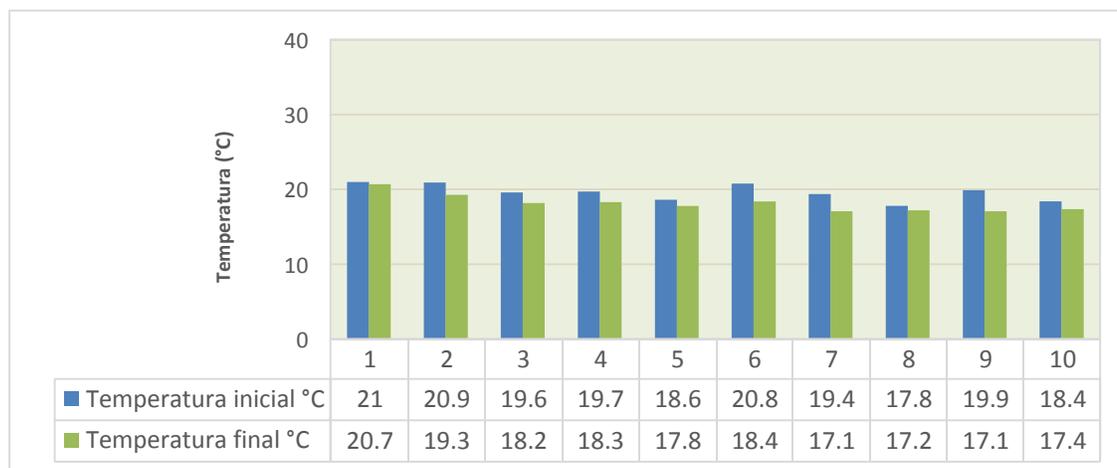
Valores de temperatura obtenidas en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₁

N° de mediciones	Temperatura inicial °C	Temperatura final °C
1	21	20.7
2	20.9	19.3

N° de mediciones	Temperatura inicial °C	Temperatura final °C
3	19.6	18.2
4	19.7	18.3
5	18.6	17.8
6	20.8	18.4
7	19.4	17.1
8	17.8	17.2
9	19.9	17.1
10	18.4	17.4

Fuente: Elaboración propia

Figura 29
Temperaturas al ingreso y salida del tratamiento con la especie Typha domingensis (totora)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del

tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 19.61 °C y 18.15 °C respectivamente. Se observa que los valores de la temperatura de las muestras de agua en las diez mediciones fueron menores a la salida del sistema, en comparación con la temperatura registrada en las muestras de agua antes de ingreso al tratamiento. Según los resultados obtenidos, la temperatura promedio en el sistema H_1 , disminuyó en 1.46 °C a la salida del tratamiento (ver Tabla 38).

Además, en el periodo de investigación, el valor de la Temperatura del efluente H_1 varió entre 17.1 °C (Temperatura mínima registrada en la séptima y novena medición) y 20.7 °C (Temperatura máxima registrada en la primera medición).

Tabla 38
Temperatura promedio al ingreso y salida del sistema H_1

N° de mediciones	Temperatura inicial °C	Temperatura final °C
1	21	20.7
2	20.9	19.3
3	19.6	18.2
4	19.7	18.3
5	18.6	17.8
6	20.8	18.4
7	19.4	17.1
8	17.8	17.2
9	19.9	17.1
10	18.4	17.4

N° de mediciones	Temperatura inicial °C	Temperatura final °C
Promedio	19.61	18.15

Fuente: Elaboración propia

1.9.3.2 Temperatura en efluente H₂

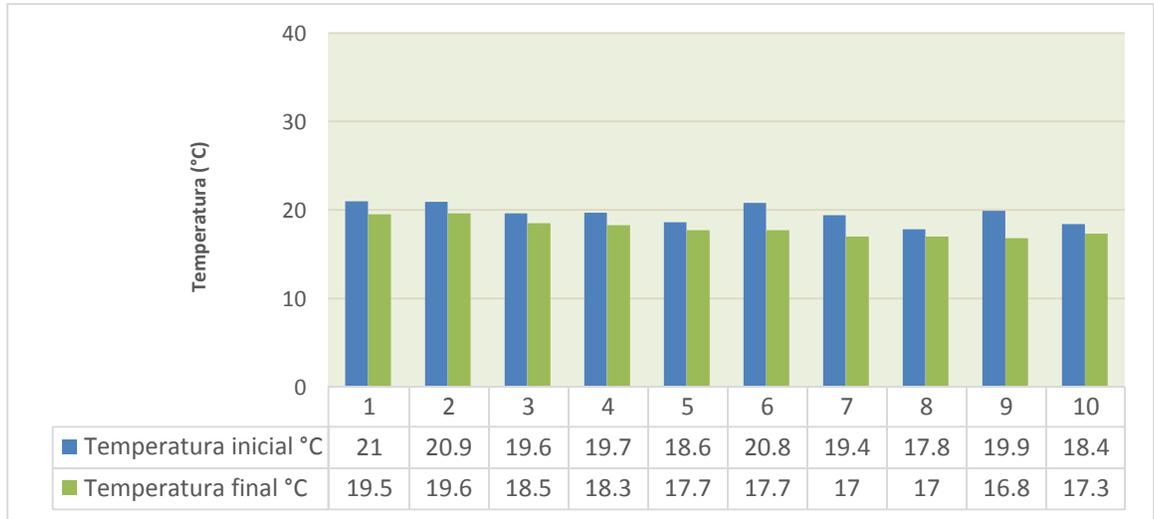
Los valores obtenidos en las diez mediciones de la Temperatura de las muestras de agua residual, tanto antes del tratamiento, como a la salida del sistema piloto H₂ se detallan en la Tabla 39 (ver Figura 30).

Tabla 39
Temperaturas obtenidas en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₂

N° de mediciones	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final °C
1	21	19.5
2	20.9	19.6
3	19.6	18.5
4	19.7	18.3
5	18.6	17.7
6	20.8	17.7
7	19.4	17
8	17.8	17
9	19.9	16.8
10	18.4	17.3

Fuente: Elaboración propia

Figura 30
Temperaturas al ingreso y salida del tratamiento con la especie Phragmites australis (carricillo)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 19.61 °C y 17.94 °C respectivamente. Se observa que los valores de la temperatura de las muestras de agua en las diez mediciones fueron menores a la salida del sistema, en comparación con la temperatura registrada en las muestras de agua antes de ingreso al tratamiento. Según los resultados obtenidos, la temperatura promedio en el sistema H₂, disminuyó en 1.67 °C a la salida del tratamiento (ver Tabla 40).

Además, en el periodo de investigación, el valor de la Temperatura del efluente H₂ varió entre 17 °C (Temperatura mínima registrada en la séptima y octava medición) y 19.5 °C (Temperatura máxima registrada en la primera medición).

Tabla 40
Temperatura promedio al ingreso y salida del sistema H₂

N° de mediciones	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
1	21	19.5
2	20.9	19.6
3	19.6	18.5
4	19.7	18.3
5	18.6	17.7
6	20.8	17.7
7	19.4	17
8	17.8	17
9	19.9	16.8
10	18.4	17.3
Promedio	19.61	17.94

Fuente: Elaboración propia

1.9.3.3 Temperatura en el efluente H₃

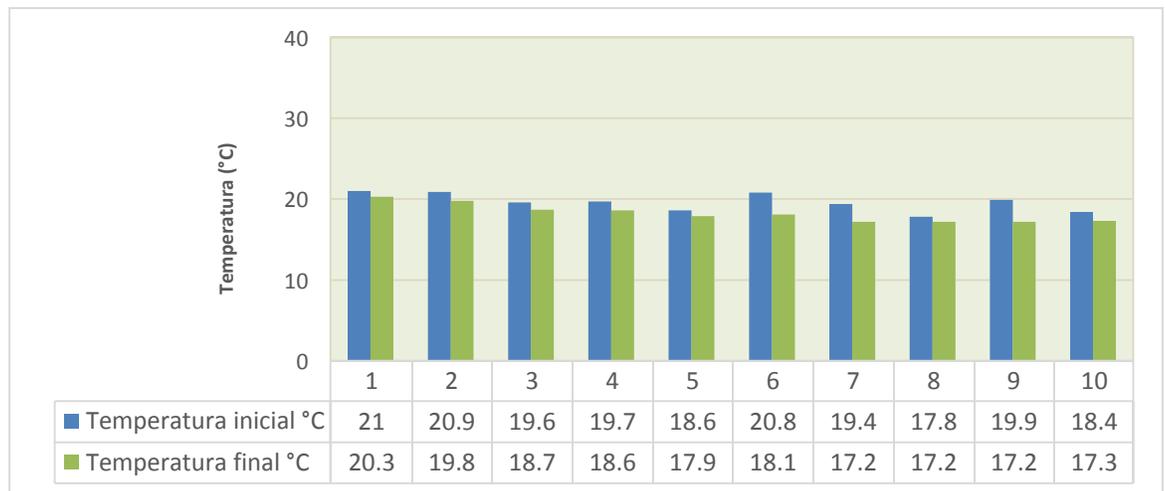
Los valores obtenidos en las diez mediciones de la Temperatura de las muestras de agua residual, tanto antes del tratamiento, como a la salida del sistema piloto H₃ se detallan en la Tabla 41 (ver Figura 31).

Tabla 41
Temperaturas obtenidas en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₃

N° de mediciones	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
1	21	20.3
2	20.9	19.8
3	19.6	18.7
4	19.7	18.6
5	18.6	17.9
6	20.8	18.1
7	19.4	17.2
8	17.8	17.2
9	19.9	17.2
10	18.4	17.3

Fuente: Elaboración propia

Figura 31
Temperaturas al ingreso y salida del tratamiento con la Schoenoplectus americanus (junco)



A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 19.61 °C y 18.23 °C respectivamente. Se observa que los valores de la temperatura de las muestras de agua en las diez mediciones fueron menores a la salida del sistema, en comparación con la temperatura registrada en las muestras de agua antes de ingreso al tratamiento. Según los resultados obtenidos, la temperatura promedio en el sistema H₃, disminuyó en 1.38 °C a la salida del tratamiento (ver Tabla 42).

Además, en el periodo de investigación, el valor de la Temperatura del efluente H₃ varió entre 17.2 °C (temperatura mínima registrada en la séptima, octava y novena medición) y 20.3 °C (temperatura máxima registrada en la primera medición).

Tabla 42
Temperatura promedio al ingreso y salida del sistema H₃

N° de mediciones	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
1	21	20.3
2	20.9	19.8
3	19.6	18.7
4	19.7	18.6
5	18.6	17.9
6	20.8	18.1
7	19.4	17.2
8	17.8	17.2
9	19.9	17.2

N° de mediciones	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
10	18.4	17.3
Promedio	19.61	18.23

Fuente: Elaboración propia

1.9.4 Potencial de Hidrógeno (pH)

Se obtuvieron los valores de Temperatura de las muestras de agua después del tratamiento para cada sistema piloto.

En la Tabla 43 se indican los valores obtenidos de las mediciones en los tres sistemas de humedales.

Tabla 43

Valores de pH obtenidos en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H₁	H₂	H₃
1	7.04	6.99	7.12
2	7.33	6.95	7
3	7.13	7.34	7.13
4	7.52	7.18	7.27
5	7.24	7	7.11
6	7.14	7.13	7.19
7	8.11	8.17	8.06
8	8.07	7.82	7.81
9	7.8	7.85	7.85
10	7.9	7.86	7.86

Fuente: Elaboración propia

- H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)
 H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)
 H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

En la Figura 32 se muestra el valor inicial promedio de pH antes del tratamiento en comparación con los valores promedios de pH obtenidos a partir de las diez mediciones para cada especie macrófita después del tratamiento.

Los valores promedios obtenidos en los sistemas H₁, H₂ y H₃ posterior al tratamiento fueron 7.53, 7.43 y 7.44 respectivamente, los cuales se detallan en la Tabla 44.

Tabla 44
pH promedio antes y después del tratamiento

Sistemas de humedales	Valor Promedio inicial	Valor Promedio final
H ₁	7.604	7.53
H ₂	7.604	7.43
H ₃	7.604	7.44

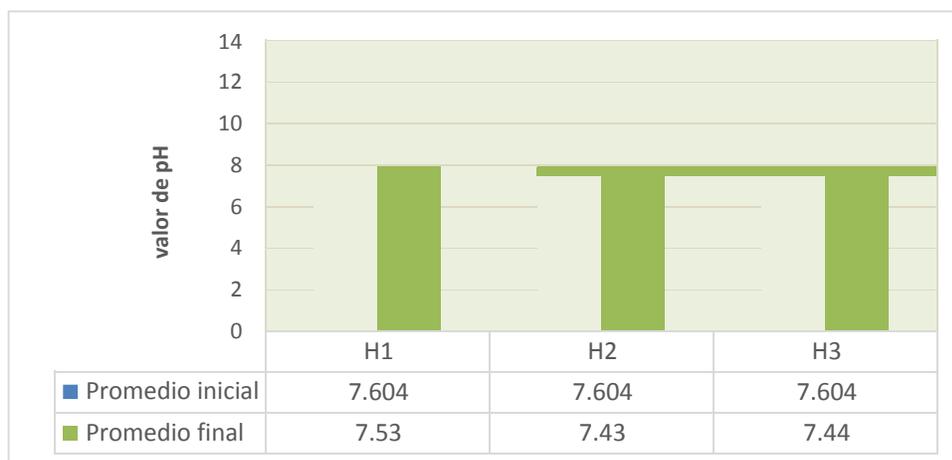
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 32
Valores de pH promedio obtenidos en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

1.9.4.1 Potencial de Hidrógeno en el efluente H₁

Los resultados obtenidos en las diez mediciones de pH de las muestras de agua residual, tanto antes del tratamiento, como a la salida del sistema piloto H₁ se detallan en la Tabla 45 (ver Figura 33).

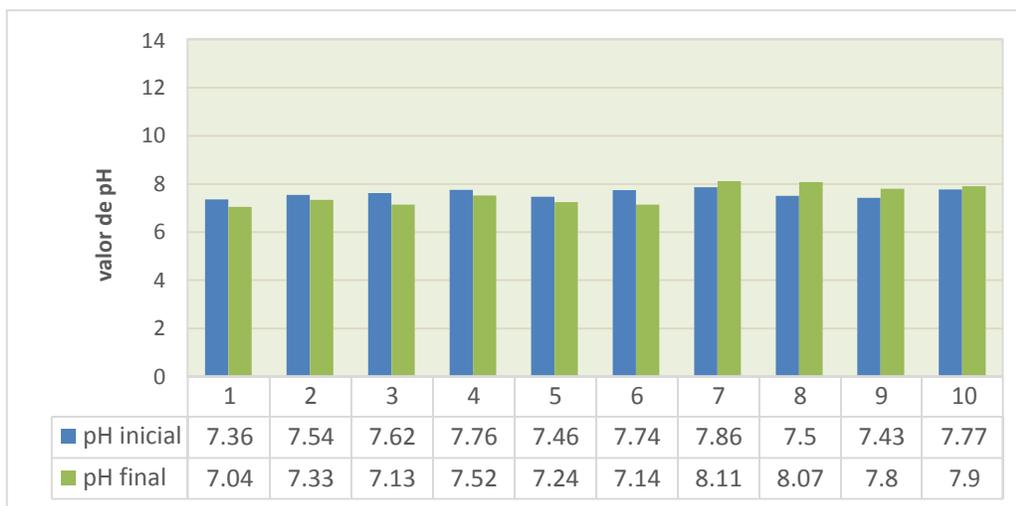
Tabla 45
Valores de pH obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₁

N° de mediciones	pH inicial	pH final
1	7.36	7.04
2	7.54	7.33
3	7.62	7.13
4	7.76	7.52
5	7.46	7.24
6	7.74	7.14

N° de mediciones	pH inicial	pH final
7	7.86	8.11
8	7.5	8.07
9	7.43	7.8
10	7.77	7.9

Fuente: Elaboración propia

Figura 33
Valores de pH al ingreso y salida del tratamiento con la especie *Typha domingensis* (totora)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 7.60 y 7.53 respectivamente. Según los resultados obtenidos, la temperatura promedio en el sistema H₁, disminuyó en 0.08 a la salida del tratamiento (ver Tabla 46)

En el periodo de investigación, los valores de pH obtenidos de las muestras de agua

residual a la salida del sistema variaron entre 7.04 (valor mínimo registrado en la primera medición) y 8.11 (valor máximo registrado en la séptima medición).

Tabla 46
pH promedio al ingreso y salida del sistema H₁

N° de mediciones	pH inicial	pH final
1	7.36	7.04
2	7.54	7.33
3	7.62	7.13
4	7.76	7.52
5	7.46	7.24
6	7.74	7.14
7	7.86	8.11
8	7.5	8.07
9	7.43	7.8
10	7.77	7.9
Promedio	7.60	7.53

Fuente: Elaboración propia

1.9.4.2 Potencial de Hidrógeno en el efluente H₂

Los resultados obtenidos en las diez mediciones de pH de las muestras de agua residual, tanto antes del tratamiento, como a la salida del sistema piloto H₂ se detallan en la Tabla 47 (ver figura 34).

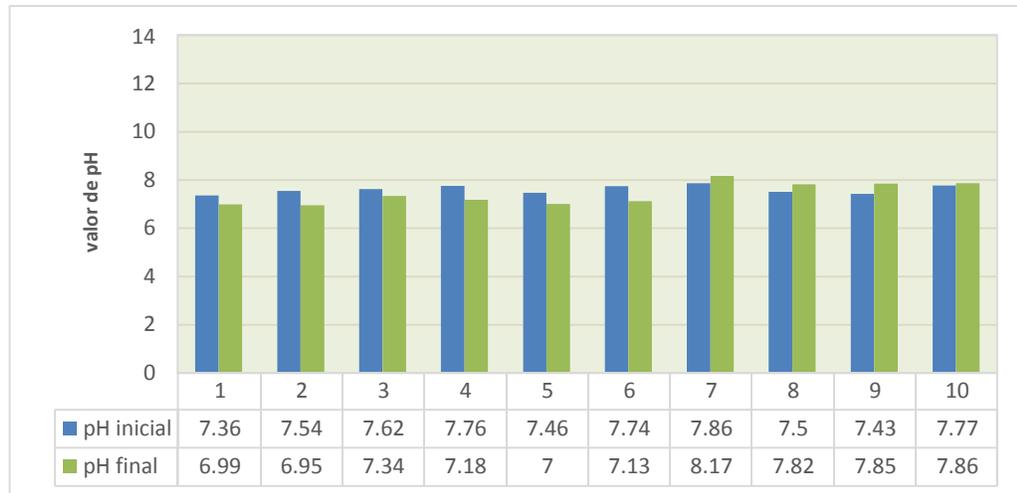
Tabla 47

Valores de pH obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₂

N° de mediciones	pH inicial	pH final
1	7.36	6.99
2	7.54	6.95
3	7.62	7.34
4	7.76	7.18
5	7.46	7
6	7.74	7.13
7	7.86	8.17
8	7.5	7.82
9	7.43	7.85
10	7.77	7.86

Fuente: Elaboración propia

Figura 34
 Valores de pH al ingreso y salida del tratamiento con la especie *Phragmites australis* (carricillo)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 7.60 y 7.43 respectivamente. Según los resultados obtenidos, la temperatura promedio en el sistema H_2 , disminuyó en 0.18 a la salida del tratamiento (ver Tabla 48)

En el periodo de investigación, los valores de pH obtenidos de las muestras de agua residual a la salida del sistema variaron entre 6.95 (valor mínimo registrado en la segunda medición) y 8.17 (valor máximo registrado en la séptima medición).

Tabla 48
 pH promedio al ingreso y salida del sistema H_2

N° de mediciones	pH inicial	pH final
1	7.36	6.99

N° de mediciones	pH inicial	pH final
2	7.54	6.95
3	7.62	7.34
4	7.76	7.18
5	7.46	7
6	7.74	7.13
7	7.86	8.17
8	7.5	7.82
9	7.43	7.85
10	7.77	7.86
Promedio	7.60	7.43

Fuente: Elaboración propia

1.9.4.3 Potencial de Hidrógeno en el efluente H₃

Los resultados obtenidos en las diez mediciones de pH de las muestras de agua residual, tanto antes del tratamiento, como a la salida del sistema piloto H₃ se detallan en la Tabla 49 (ver Figura 35).

Tabla 49
Valores de pH obtenidos en las mediciones al ingreso y salida del sistema H₃

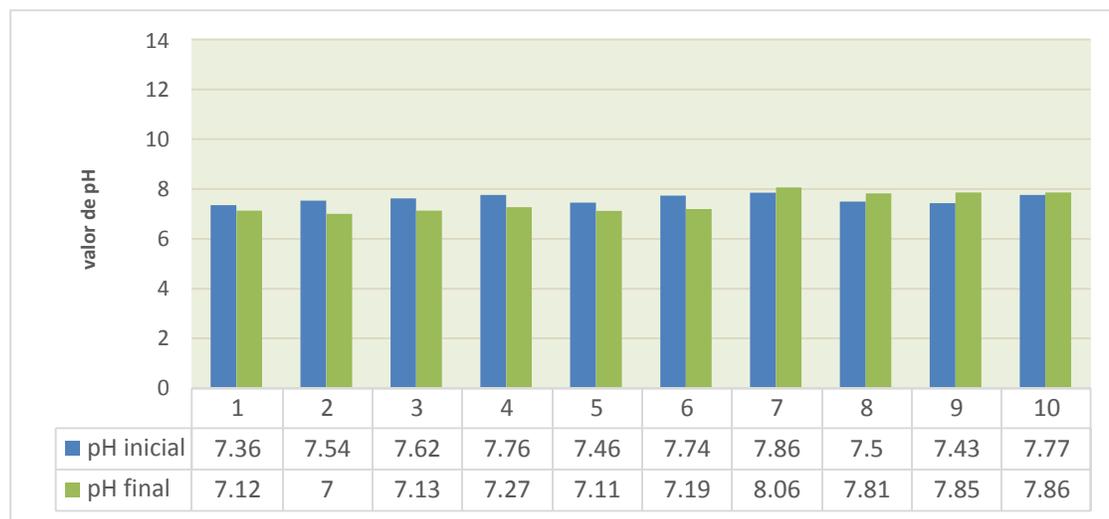
N° de mediciones	pH inicial	pH final
1	7.36	7.12

N° de mediciones	pH inicial	pH final
2	7.54	7
3	7.62	7.13
4	7.76	7.27
5	7.46	7.11
6	7.74	7.19
7	7.86	8.06
8	7.5	7.81
9	7.43	7.85
10	7.77	7.86

Fuente: Elaboración propia

Figura 35

Valores de pH al ingreso y salida del tratamiento con la especie *Typha domingensis* (totora)



A partir de las mediciones realizadas, se determinó un valor promedio inicial (antes del tratamiento) y un valor promedio final (después del tratamiento) de 7.60 y 7.44

respectivamente. Según los resultados obtenidos, la temperatura promedio en el sistema H₃, disminuyó en 0.16 a la salida del tratamiento (ver Tabla 50).

En el periodo de investigación, los valores de pH obtenidos de las muestras de agua residual a la salida del sistema variaron entre 7 (valor mínimo registrado en la segunda medición) y 8.06 (valor máximo registrado en la séptima medición).

Tabla 50
pH promedio al ingreso y salida del sistema H₃

N° de mediciones	pH inicial	pH final
1	7.36	7.12
2	7.54	7
3	7.62	7.13
4	7.76	7.27
5	7.46	7.11
6	7.74	7.19
7	7.86	8.06
8	7.5	7.81
9	7.43	7.85
10	7.77	7.86
Promedio	7.60	7.44

Fuente: Elaboración propia

1.9.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Se determinaron los valores de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras a la salida de cada sistema (H₁, H₂ y H₃) para las diez mediciones. Para ello, primero se calcularon por diferencia de concentraciones las concentraciones de Oxígeno Disuelto presentes en las muestras, a fin de determinar la Demanda Bioquímica de Oxígeno, a partir de la siguiente ecuación:

$$OD_0(ml) - OD_5(ml) = [DBO](ml)$$

Ecuación 7: *Determinación de Oxígeno Disuelto*

Donde:

$$1ml = 1mg/l$$

Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/l), y se multiplicaron por el valor de la dilución la cual es 5:300, obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 51 (ver Figura 36).

En el proceso de investigación, la DBO de las muestras después del tratamiento, varían e entre 17 mg/L (registrada en la séptima y octava muestra de agua a la salida del sistema H₂) y 20.7 mg/L (registrada en la primera muestra de agua a la salida del sistema H₁).

Tabla 51
Valores de DBO en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H ₁ (mg/L)	H ₂ (mg/L)	H ₃ (mg/L)
1	174	54	162
2	120	42	108
3	6	48	24
4	102	102	90

N° de mediciones	H ₁ (mg/L)	H ₂ (mg/L)	H ₃ (mg/L)
5	123	132	126
6	30	60	36
7	60	72	78
8	78	78	66
9	60	84	66
10	114	162	114

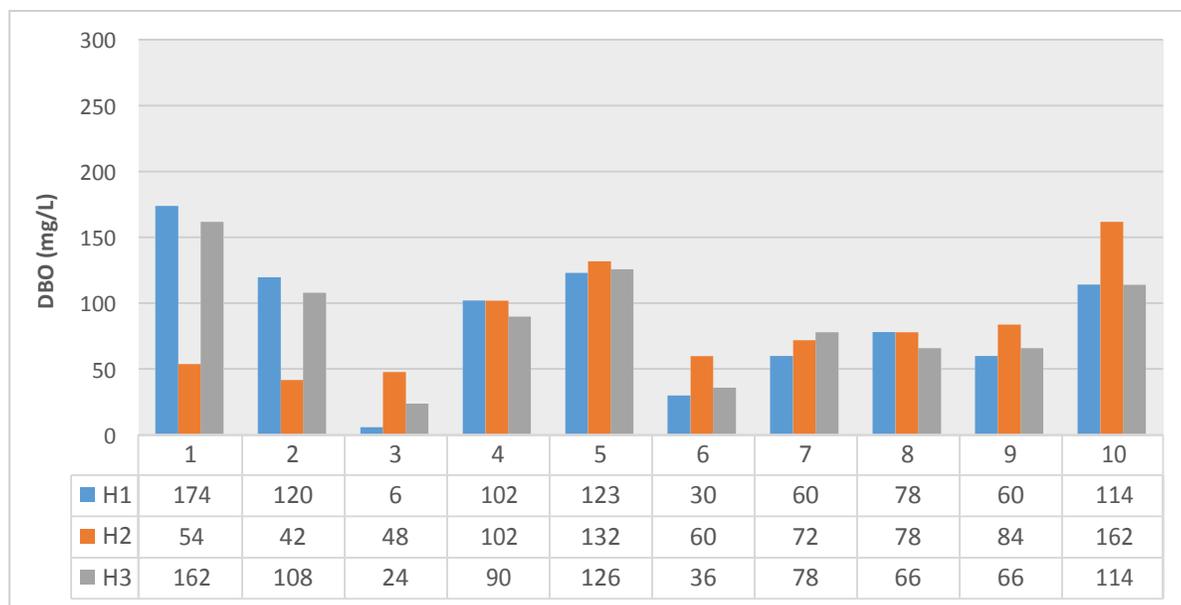
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 36
DBO de las muestras a la salida de cada sistema



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 52 se muestra el valor inicial promedio de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras de agua obtenidas antes del tratamiento (330 mg/L) en comparación con los valores de DBO promedios obtenidos a partir de las diez mediciones para cada especie macrófita después del tratamiento en los sistemas H₁, H₂ y H₃ (86.7 mg/L, 83.4 mg/L y 87 mg/L respectivamente) (ver Figura 37).

Tabla 52
DBO₅ promedio antes y después del tratamiento

Valor inicial (mg/L)	330
H ₁	86.7
H ₂	83.4
H ₃	87

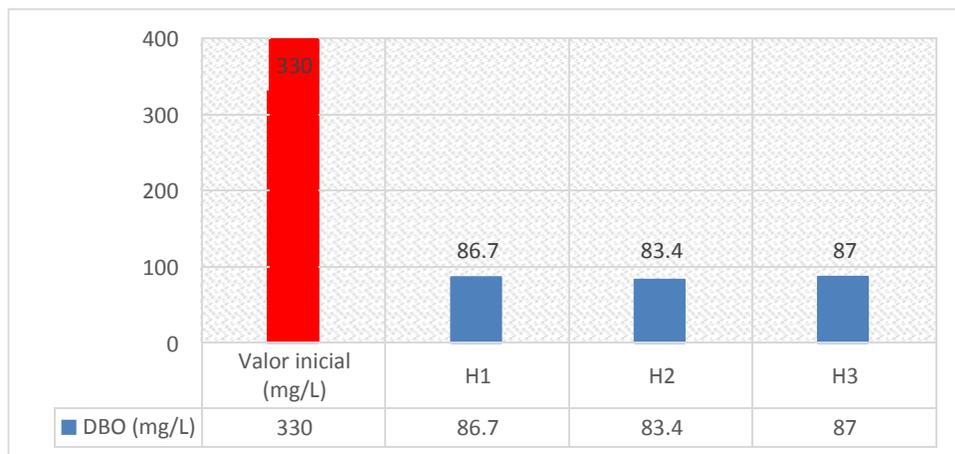
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 37
Valores de la DBO₅ promedio en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

Además, se señala el porcentaje de remoción de DBO en cada uno de los sistemas piloto; así como también, el porcentaje de remoción promedio de DBO, a partir de la cuales se obtienen las eficiencias promedio del periodo de investigación de las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) de 73.73 %, 74.73 % y 73.64 % respectivamente (ver Tabla 53 y Figura 38).

Tabla 53
Porcentaje de remoción de la DBO

Sistemas de humedales	DBO final (mg/L)	% Remoción
H ₁	86.7	73.73
H ₂	83.4	74.73
H ₃	87	73.64

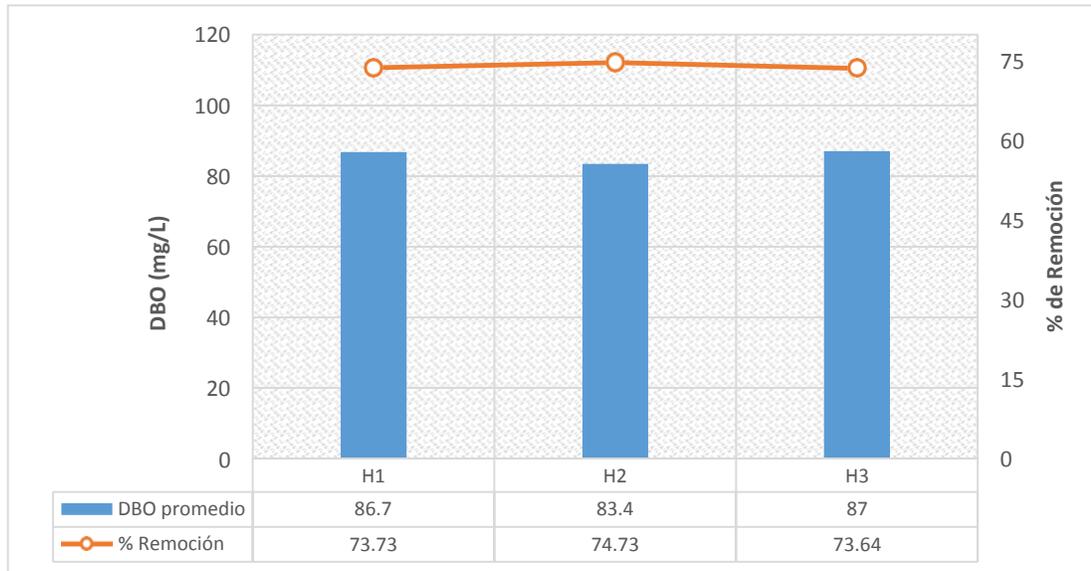
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 38
Remoción de DBO en los sistemas de humedales



Fuente: Elaboración propia

1.9.5.1 DBO en el efluente H₁

Se determinó la Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras del efluente H₁ a la salida del sistema con la especie. Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 54 (ver Figura 39).

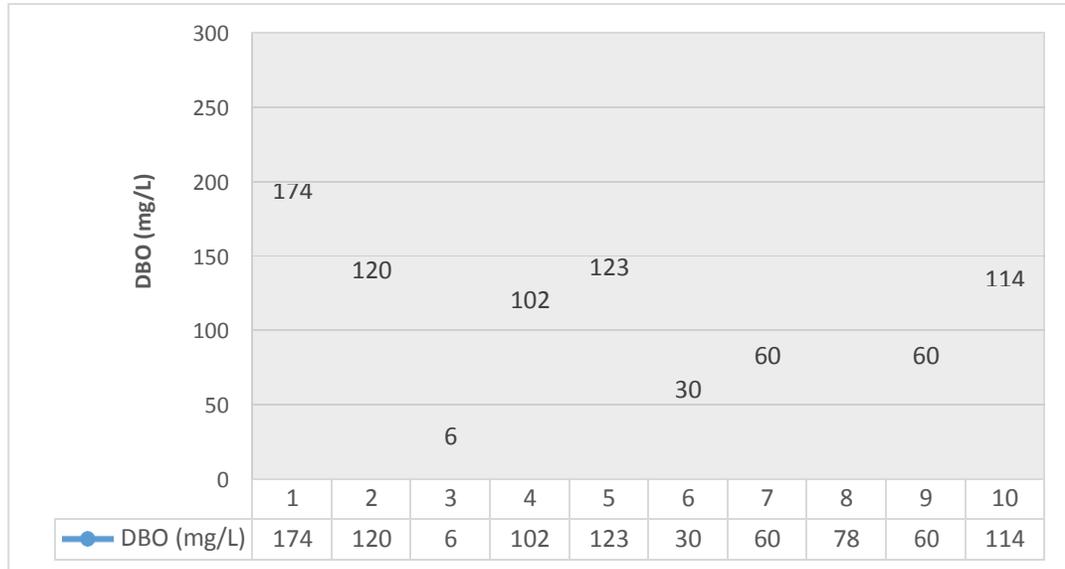
Además, los resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de las muestras del efluente H₁ variaron entre 6 mg/L (DBO mínima registrada en la tercera medición) y 174 mg/L (DBO máxima registrada en la primera medición).

Tabla 54
 Valores de DBO obtenidos a la salida del sistema H₁

N° de mediciones	OD₀ (ml)	OD₅ (ml)	OD₅ - OD₀ (ml)	DBO (mg/L)
1	9	6.1	2.9	174
2	9	7	2	120
3	7.3	7.2	0.1	6
4	8.4	6.7	1.7	102
5	8.7	6.65	2.05	123
6	7.9	7.4	0.5	30
7	8.5	7.5	1	60
8	8.4	7.1	1.3	78
9	8	7	1	60
10	8	6.1	1.9	114

Fuente: Elaboración propia

Figura 39
 Valores de DBO a la salida del tratamiento con la especie *Typha domingensis* (totora)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₁, se determinó el valor promedio de DBO de las muestras en el sistema H₁, el cual fue de 86.7 mg/L (ver Tabla 55)

Tabla 55
 Valor promedio de DBO de las muestras en el sistema H₁

DBO (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	DBO (mg/L)
174	120	6	102	123	30	60	78	60	114	86.7

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de DBO de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₁; los resultados obtenidos en el humedal, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Typha domingensis* (totora) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa la DBO de 330 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 86.7 mg/L; es decir, 73.73 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₁ con la especie *Typha domingensis* (totora) en el periodo de investigación (ver Tabla 56).

Tabla 56
Porcentaje de remoción de la DBO en el sistema H₁

N° de mediciones	DBO (mg/L)	% Remoción
1	174	47.3
2	120	63.6
3	6	98.2
4	102	69.1
5	123	62.7
6	30	90.9
7	60	81.8
8	78	76.4
9	60	81.8
10	114	65.5
Promedio	86.7	73.7

Fuente: Elaboración propia

1.9.5.2 DBO en el efluente H₂

Se determinó la Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras del efluente H₂ a la salida del sistema con la especie. Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 57 (ver Figura 40).

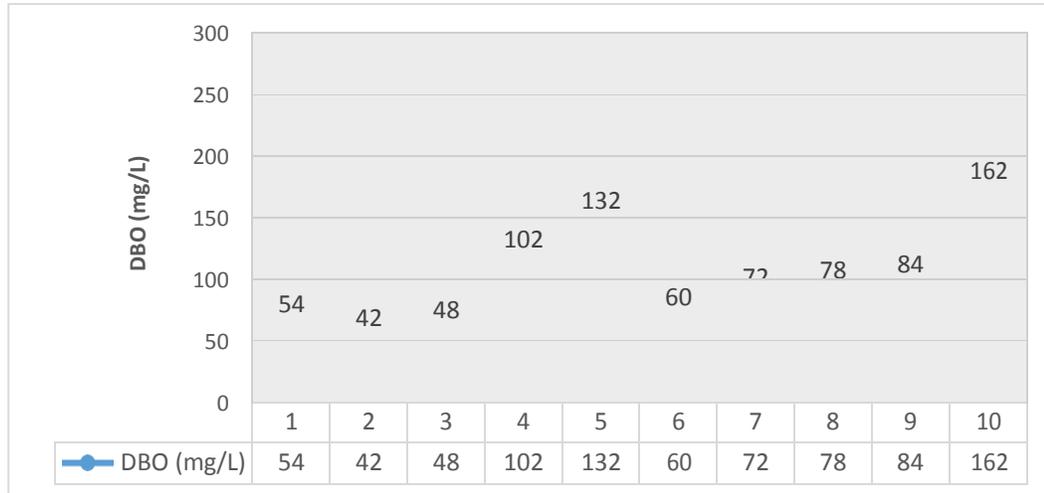
Además, los resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de las muestras del efluente H₂ variaron entre 42 mg/L (DBO mínima registrada en la segunda medición) y 162 mg/L (DBO máxima registrada en la décima medición).

Tabla 57
Valores de DBO obtenidos a la salida del sistema H₂

N° de mediciones	OD ₀ (ml)	OD ₅ (ml)	OD ₅ - OD ₀ (ml)	DBO (mg/L)
1	8.6	7.7	0.9	54
2	8.6	7.9	0.7	42
3	7.5	6.7	0.8	48
4	8.3	6.6	1.7	102
5	8.5	6.3	2.2	132
6	7.6	6.6	1	60
7	8.4	7.2	1.2	72
8	8.3	7	1.3	78
9	7.9	6.5	1.4	84
10	7.9	5.2	2.7	162

Fuente: Elaboración propia

Figura 40
 Valores de DBO a la salida del tratamiento con la especie *Phragmites australis* (carricillo)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₂, se determinó un valor promedio de DBO de las muestras de 83.4 mg/L (ver Tabla 58).

Tabla 58
 Valor promedio de DBO de las muestras en el sistema H₂

DBO (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	DBO (mg/L)
54	42	48	102	132	60	72	78	84	162	83.4

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de DBO de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₂. Los resultados obtenidos en el humedal, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Phragmites australis* (carricillo) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa la DBO de 330

mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 83.4 mg/L; es decir, 74.73 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₂ con la especie *Phragmites australis* (*carricillo*) en el periodo de investigación (ver Tabla 59).

Tabla 59
Porcentaje de remoción de la DBO en el sistema H₂

N° de mediciones	DBO (mg/L)	% Remoción
1	54	83.6
2	42	87.3
3	48	85.5
4	102	69.1
5	132	60.0
6	60	81.8
7	72	78.2
8	78	76.4
9	84	74.5
10	162	50.9
Promedio	83.4	74.7

Fuente: Elaboración propia

1.9.5.3 DBO en el efluente H₃

Se determinó la Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras del efluente H₃ a la salida del sistema. Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro

(mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 60 (ver Figura 41).

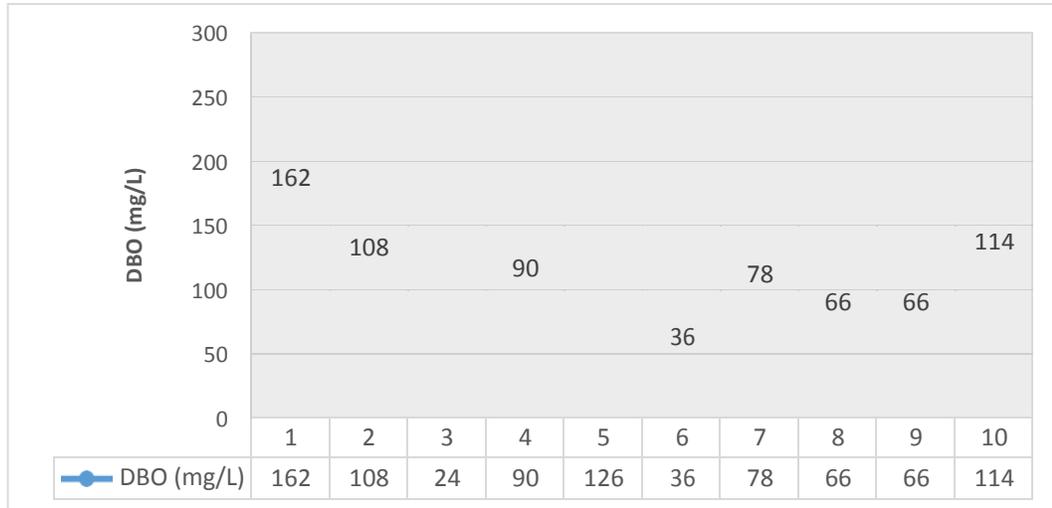
Los resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de las muestras del efluente H₃ variaron entre 24 mg/L (DBO mínima registrada en la tercera medición) y 162 mg/L (DBO máxima registrada en la primera medición).

Tabla 60
Valores de DBO obtenidos a la salida del sistema H₃

N° de mediciones	OD₀ (ml)	OD₅ (ml)	OD₅ - OD₀ (ml)	DBO (mg/L)
1	9.5	6.8	2.7	162
2	8.7	6.9	1.8	108
3	7	6.6	0.4	24
4	8.2	6.7	1.5	90
5	8.3	6.2	2.1	126
6	7.8	7.2	0.6	36
7	8.4	7.1	1.3	78
8	8.5	7.4	1.1	66
9	8.2	7.1	1.1	66
10	8	6.1	1.9	114

Fuente: Elaboración propia

Figura 41
 Valores de DBO a la salida del tratamiento con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₃, se determinó un valor promedio de DBO de 87 mg/L (Ver Tabla 61).

Tabla 61
 Valor promedio de DBO de las muestras en el sistema H₃

DBO (mg/L)										Promedio DBO
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	(mg/L)
162	108	24	90	126	36	78	66	66	114	87

Fuente: Elaboración propia

Además en la Tabla 62, se muestran los porcentajes de remoción de DBO de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₃, obteniendo una mejor remoción del 92% en el tercer ensayo. Los resultados obtenidos en el humedal, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Schoenoplectus americanus* (junco)

sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa la DBO de 330 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 87 mg/L; es decir, 73.64 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₃ con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco) en el periodo de investigación.

Tabla 62
Porcentaje de remoción de la DBO en el sistema H₃

N° de mediciones	DBO (mg/L)	% Remoción
1	162	50.9
2	108	67.3
3	24	92.7
4	90	72.7
5	126	61.8
6	36	89.1
7	78	76.4
8	66	80.0
9	66	80.0
10	114	65.5
Promedio	87	73.6

Fuente: Elaboración propia

1.9.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se determinaron los valores de la Demanda Química de Oxígeno de las muestras a la salida de cada sistema (H₁, H₂ y H₃) para las diez mediciones, obteniéndose como

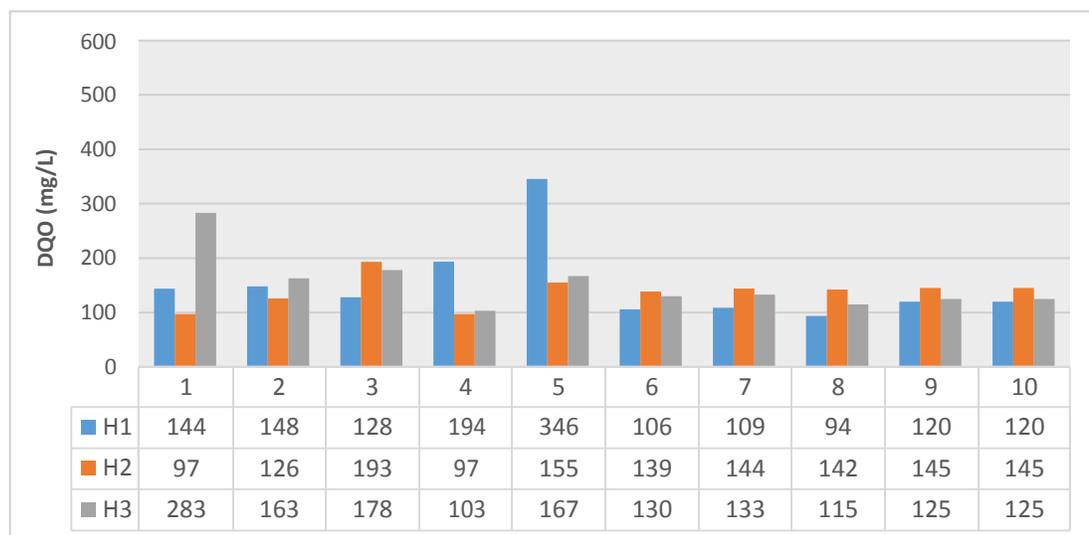
resultados los valores expresados en la Tabla 63. En el proceso de investigación, la DBO de las muestras después del tratamiento, varían e entre 97 mg/L (valor registrado en la primera medición a la salida del sistema H₂) y 346 mg/L (valor registrado en la quinta medición a la salida del sistema H₁) (ver Figura 42).

Tabla 63
Valores de DQO en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H₁ (mg/L)	H₂ (mg/L)	H₃ (mg/L)
1	144	97	283
2	148	126	163
3	128	193	178
4	194	97	103
5	346	155	167
6	106	139	130
7	109	144	133
8	94	142	115
9	120	145	125
10	120	145	125

Fuente: Elaboración propia

Figura 42
DQO de las muestras a la salida de cada sistema piloto



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 64 se muestra el valor inicial promedio de la Demanda Química de Oxígeno de las muestras de agua obtenidas antes del tratamiento (509.33 mg/L) en comparación con los valores de DQO promedios obtenidos a partir de las diez mediciones para cada especie macrófita después del tratamiento en los sistemas H₁, H₂ y H₃ (150.9 mg/L, 138.3 mg/L y 152.2 mg/L respectivamente) (ver Figura 43).

Tabla 64
DQO promedio antes y después del tratamiento

Valor inicial (mg/L)	509.33
H ₁	150.9
H ₂	138.3
H ₃	152.2

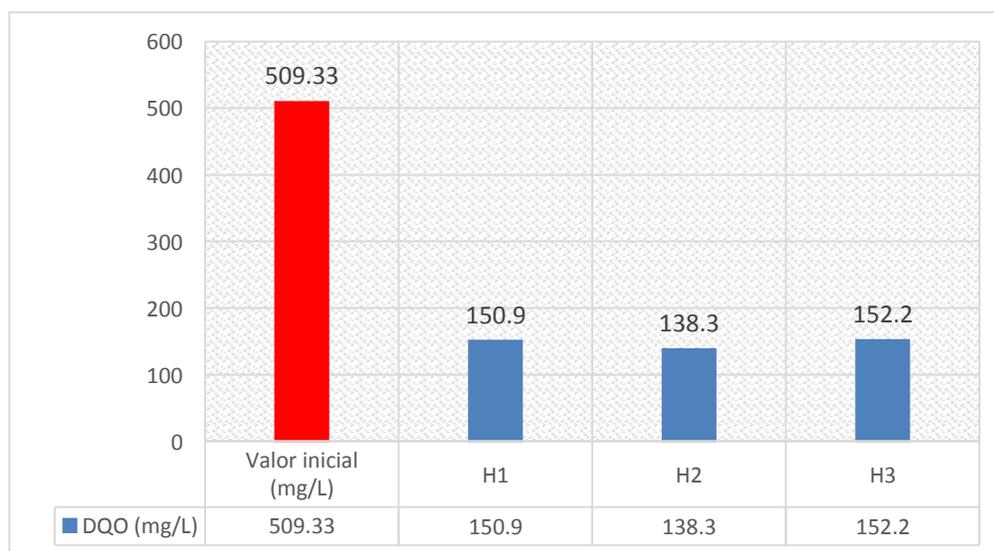
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 43
DQO promedio en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

Además, se señala el porcentaje de remoción de DQO en cada uno de los sistemas piloto, así como también, el porcentaje de remoción promedio de DQO, a partir de la cuales se obtienen las eficiencias promedio del periodo de investigación de las especies *Typha domingensis* (totora) de 70.37 %, 72.85 % y 70.12 % respectivamente (ver Tabla 65 y Figura 44).

Tabla 65
Porcentaje de remoción de la DQO

Sistemas de humedales	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)	% Remoción
H ₁	509.33	150.9	70.37

H ₂	138.3	72.85
H ₃	152.2	70.12

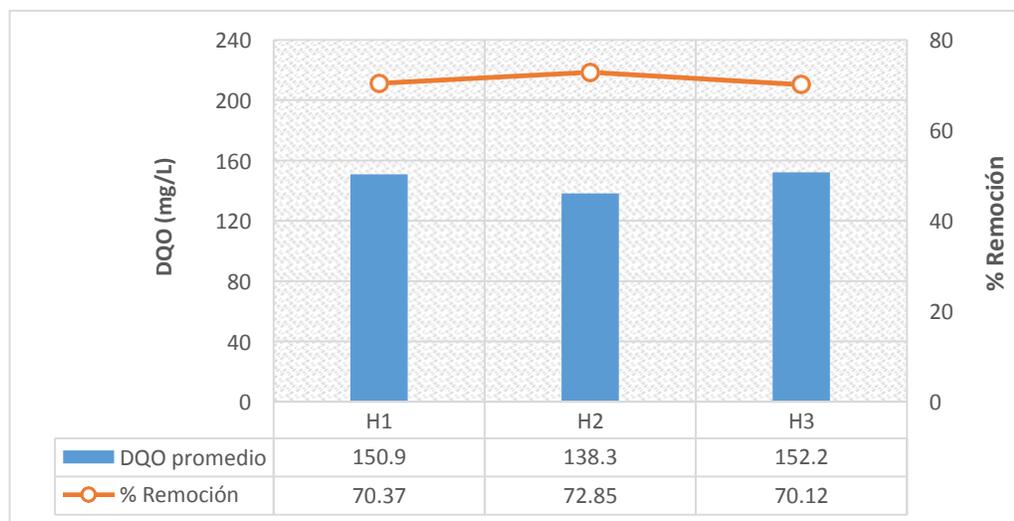
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 44
Remoción de DQO en los sistemas de humedales



Fuente: Elaboración propia

1.9.6.1 DQO en el efluente H₁

Se determinó la Demanda Química de Oxígeno de las muestras del efluentes H₁ a la salida del sistema con la especie *Typha domingensis* (totora). Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 66 (ver Figura 45).

Además, los resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de las muestras del efluente H₁ variaron entre 94 mg/L (DQO mínima registrada en la octava medición) y

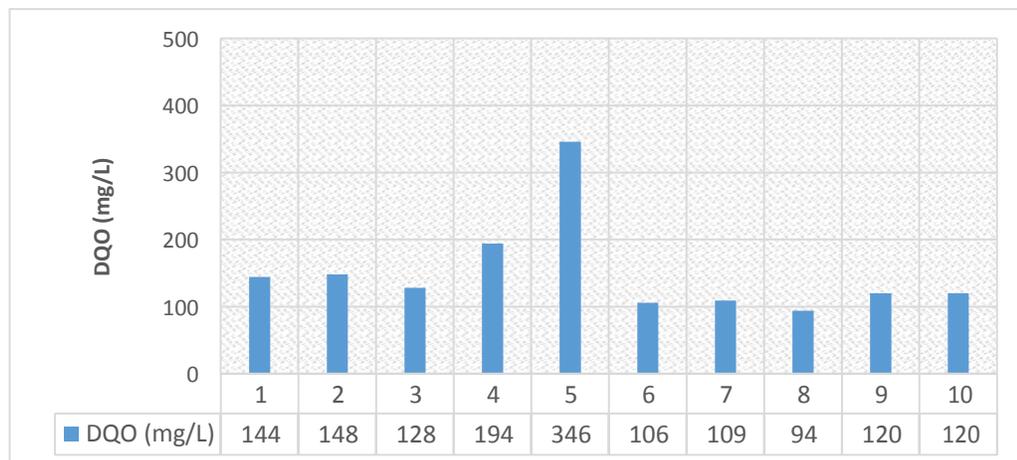
346 mg/L (DQO máxima registrada en la quinta medición).

Tabla 66
Valores de DQO obtenidos a la salida del sistema H_1

N° de mediciones	DQO (mg/L)
1	144
2	148
3	128
4	194
5	346
6	106
7	109
8	94
9	120
10	120

Fuente: Elaboración propia

Figura 45
DQO a la salida del sistema con la especie *Typha domingensis* (totora)



A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₁, se determinó el valor promedio de DQO de las muestras en el sistema H₁, el cual fue de 150.9 mg/L (ver Tabla 67).

Tabla 67
Valor promedio de DQO de las muestras en el sistema H₁

DQO (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	DQO
144	148	128	194	346	106	109	94	120	120	150.9

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de DQO de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₁. Los resultados obtenidos en el humedal, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Typha domingensis* (totora) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa la DQO de 509.33 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 150.3 mg/L; es decir, 70.37 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₁ con la especie *Typha domingensis* en el periodo de investigación (ver Tabla 68).

Tabla 68
Porcentaje de remoción de la DQO en el sistema H₁

N° de mediciones	DQO (mg/L)	% Remoción
1	144	71.73
2	148	70.94

N° de mediciones	DQO (mg/L)	% Remoción
3	128	74.87
4	194	61.91
5	346	32.07
6	106	79.19
7	109	78.60
8	94	81.54
9	120	76.44
10	120	76.44
Promedio	150.9	70.37

Fuente: Elaboración propia

1.9.6.2 DQO en el efluente H₂

Se determinó la Demanda Química de Oxígeno de las muestras del efluente H₂ a la salida del sistema con la especie *Phragmites australis* (*carricillo*). Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 69 (ver Figura 46).

Además, los resultados de DQO de las muestras del efluente H₂ variaron entre 97 mg/L (DBO mínima registrada en la primera medición) y 193 mg/L (DBO máxima registrada en la tercera medición).

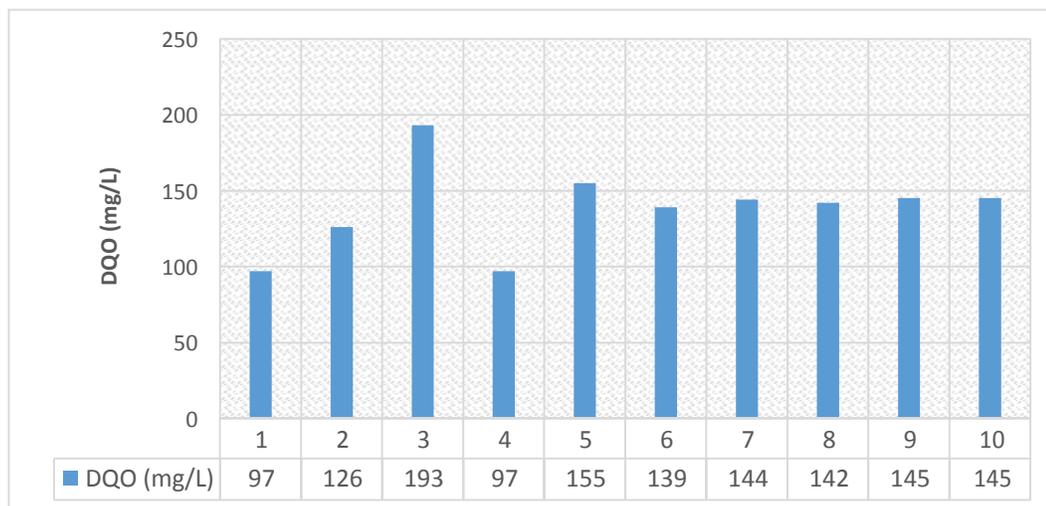
Tabla 69
Valores de DQO obtenidos a la salida del sistema H₂

N° de mediciones	DQO (mg/L)
1	97
2	126
3	193
4	97
5	155
6	139
7	144
8	142
9	145
10	145

Fuente: Elaboración propia

Figura 46

DQO a la salida del sistema con la especie *Phragmites australis* (carricillo)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₂, se determinó un valor promedio de DQO de las muestras de 138.3 mg/L (ver Tabla 70).

Tabla 70
Valor promedio de DQO de las muestras en el sistema H₂

DQO (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	DQO (mg/L)
97	126	193	97	155	139	144	142	145	145	138.3

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de DQO de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₂. Los resultados obtenidos en el humedal, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Phragmites australis* (carricillo) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa la DQO de 509.33 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 138.3 mg/L; es decir, 72.85 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₂ con la especie *Phragmites australis* (carricillo) en el periodo de investigación (ver Tabla 71).

Tabla 71
Porcentaje de remoción de la DQO en el sistema H₂

N° de mediciones	DQO (mg/L)	% Remoción
1	97	80.96
2	126	75.26
3	193	62.11

N° de mediciones	DQO (mg/L)	% Remoción
4	97	80.96
5	155	69.57
6	139	72.71
7	144	71.73
8	142	72.12
9	145	71.53
10	145	71.53
Promedio	138.3	72.85

Fuente: Elaboración propia

1.9.6.3 DQO en el efluente H₃

Se determinó la Demanda Química de Oxígeno de las muestras del efluente H₃ a la salida del sistema con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco). Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 72 (ver Figura 47).

Los resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de las muestras del efluente H₃ variaron entre 103 mg/L (DQO mínima registrada en la cuarta medición) y 283 mg/L (DQO máxima registrada en la primera medición).

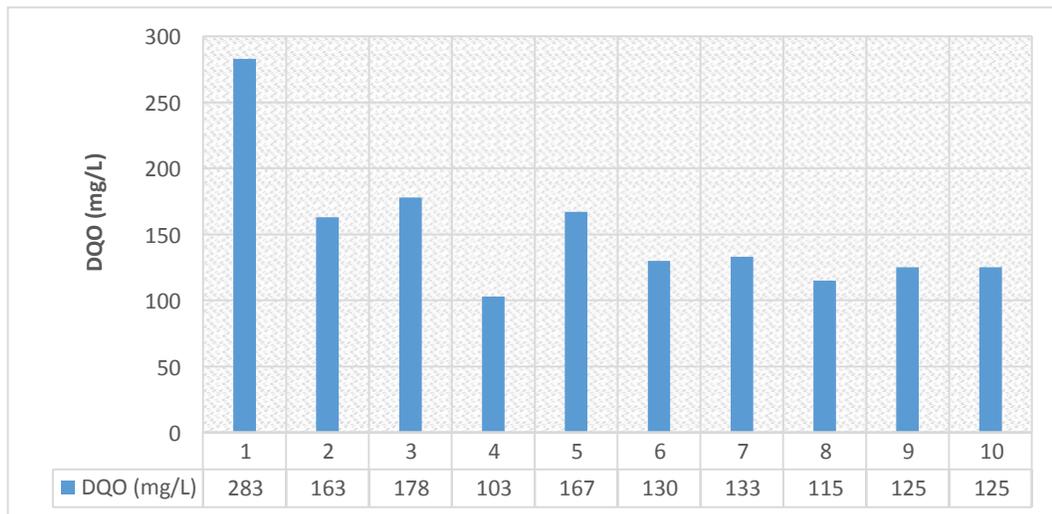
Tabla 72
Valores de DQO obtenidos a la salida del sistema H₃

N° de mediciones	DQO (mg/L)
1	283

N° de mediciones	DQO (mg/L)
2	163
3	178
4	103
5	167
6	130
7	133
8	115
9	125
10	125

Fuente: Elaboración propia

Figura 47
DQO a la salida del sistema con la especie Schoenoplectus americanus (junco)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₃, se determinó un valor promedio de DQO de 152.2 mg/L (ver Tabla 73).

Tabla 73
Valor promedio de DBO de las muestras en el sistema H₃

DQO (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	DQO
283	163	178	103	167	130	133	115	125	125	152.2

Fuente: Elaboración propia

Además en la Tabla 74, se señalan los porcentajes de remoción de DQO de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₃, obteniendo una mejor remoción del 79.78 % en el cuarto ensayo. Los resultados obtenidos en el humedal, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Schoenoplectus americanus* (junco) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa la DQO de 509.33 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 152.2 mg/L; es decir, 70.12 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₃ con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco) en el periodo de investigación.

Tabla 74
Porcentaje de remoción de la DQO en el sistema H₃

N° de mediciones	DQO (mg/L)	% Remoción
1	283	44.44
2	163	68.00
3	178	65.05

N° de mediciones	DQO (mg/L)	% Remoción
4	103	79.78
5	167	67.21
6	130	74.48
7	133	73.89
8	115	77.42
9	125	75.46
10	125	75.46
Promedio	152.2	70.12

Fuente: Elaboración propia

1.9.7 Amonio (NH₄⁺)

Se determinaron los valores de Amonio de las muestras a la salida de cada sistema (H₁, H₂ y H₃) para las diez mediciones, obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 75. En el proceso de investigación, los valores de Amonio de las muestras después del tratamiento, varían entre 2 mg/L y 8.6 mg/L (ver Figura 48).

Tabla 75
Valores de Amonio en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H₁ (mg/L)	H₂ (mg/L)	H₃ (mg/L)
1	3.8	2	2.2
2	2.2	3.2	0.4
3	3.2	2.2	2
4	4.2	4	3.8

N° de mediciones	H ₁ (mg/L)	H ₂ (mg/L)	H ₃ (mg/L)
5	2.4	2.6	2.2
6	1.8	1.6	1.8
7	1.8	2.6	1.6
8	2	2.4	2.2
9	4.4	3.6	4.4
10	7.2	8.4	8.6

Fuente: Elaboración propia

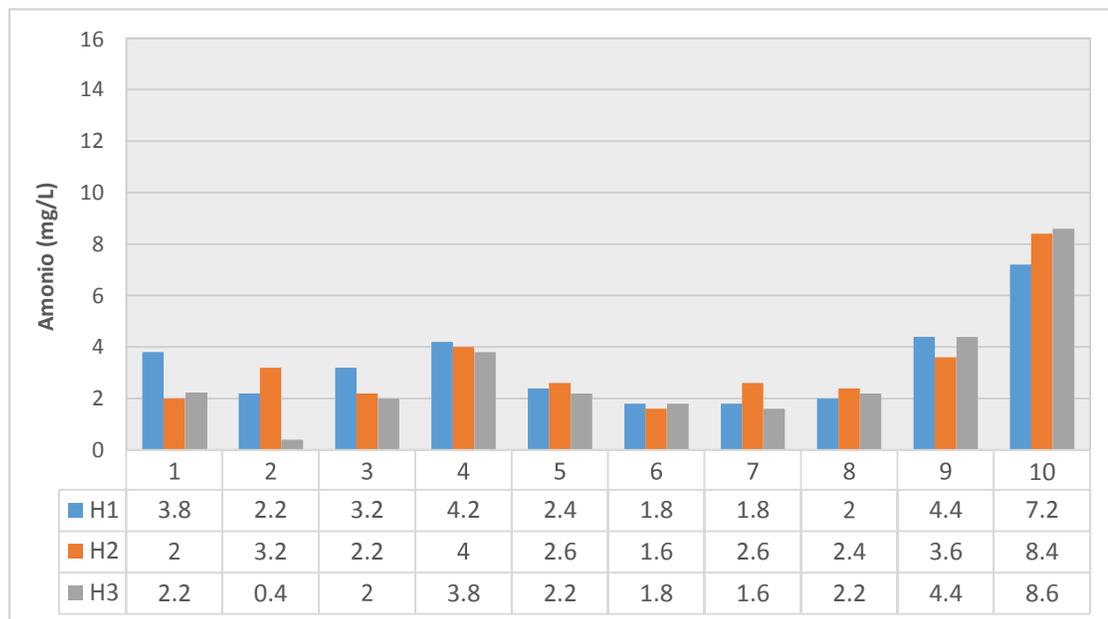
H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 48

Amonio en las muestras a la salida de cada sistema piloto



Fuente: Elaboración propia

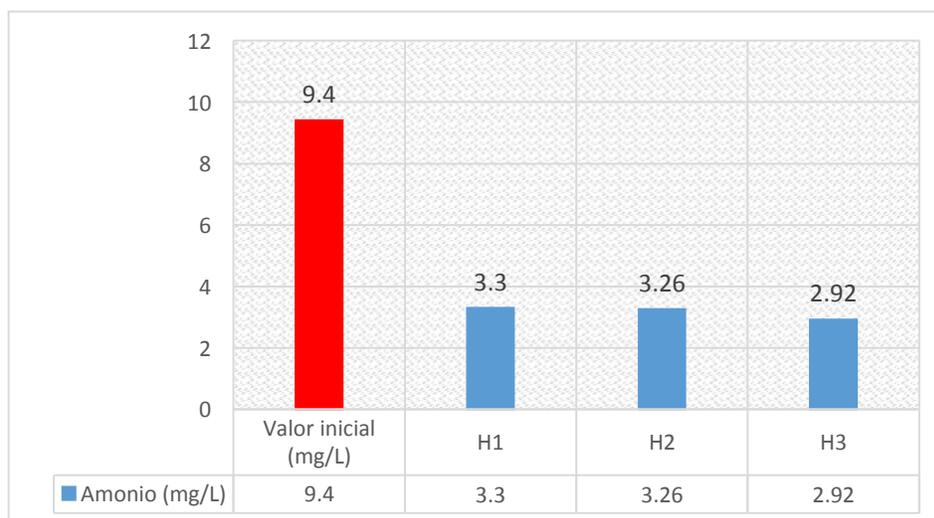
En la Figura 49 se muestra el valor inicial promedio de Amonio obtenida a partir de la caracterización del agua residual antes del tratamiento en comparación con los valores promedios de Amonio obtenidos a partir de las diez mediciones en los sistemas piloto (H₁, H₂ y H₃) para cada especie macrófita después del tratamiento. Los concentraciones promedios de Amonio en las muestras obtenidas a la salida de los sistemas H₁, H₂ y H₃, fueron 3.3 mg/L, 3.26 mg/L, 2.92 mg/L respectivamente los cuales se detalla en la Tabla 76.

Tabla 76
Valores promedio de Amonio antes y después del tratamiento

Valor inicial (mg/L)	9.4
H ₁	3.3
H ₂	3.26
H ₃	2.92

Fuente: Elaboración propia

Figura 49
Amonio promedio en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

Además, se señala el porcentaje de remoción de Amonio de las diez mediciones en cada uno de los sistemas piloto; así como también, el porcentaje de remoción promedio de Amonio por sistema, a partir de la cuales se obtienen las eficiencias promedio del periodo de investigación de las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) de 64.89 %, 65.32 % y 68.94 % respectivamente (ver Tabla 77 y Figura 50).

Tabla 77
Porcentaje de remoción de Amonio

Sistemas de humedales	Amonio inicial (mg/L)	Amonio final (mg/L)	% Remoción
H ₁	9.4	3.3	64.89
H ₂		3.26	65.32

Sistemas de humedales	Amonio inicial (mg/L)	Amonio final (mg/L)	% Remoción
H ₃		2.92	68.94

Fuente: Elaboración propia

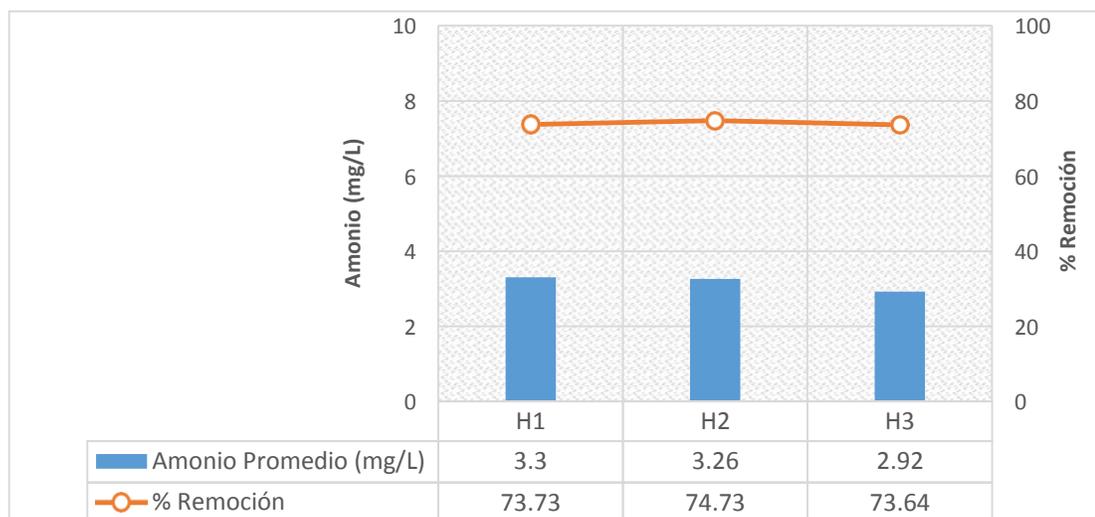
H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 50

Amonio promedio en los sistemas de humedales



Fuente: Elaboración propia

1.9.7.1 Amonio en el efluente H₁

Se determinaron las concentraciones de Amonio presentes en las muestras del efluente H₁ a la salida del sistema con la especie *Typha domingensis* (totora). Los resultados obtenidos se expresaron en miligramos por litro (mg/L), teniendo como resultados los valores expresados en la Tabla 78.

Además, los resultados de Amonio de las muestras del efluente H₁ variaron entre 1.8

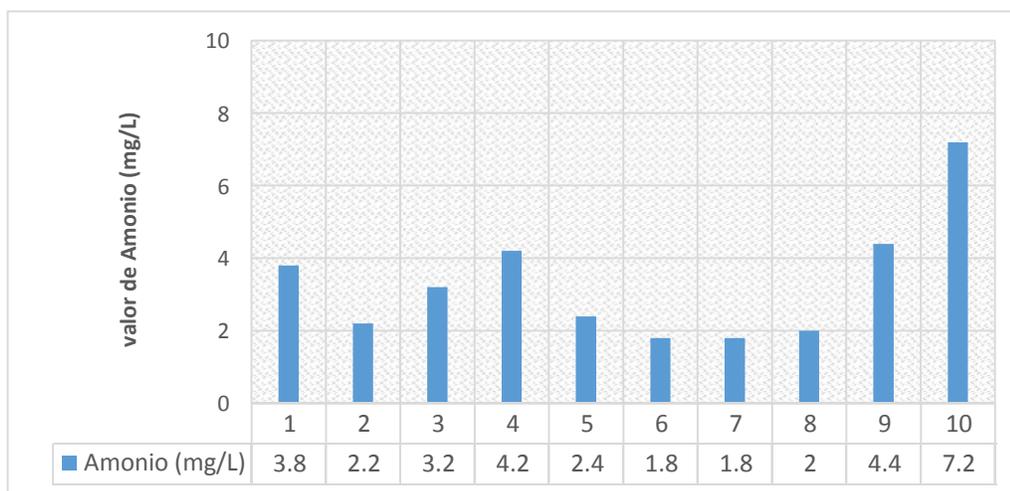
mg/L (valor mínimo registrado en la sexta y séptima medición) y 7.2 mg/L (valor máximo registrado en la décima medición) (ver Figura 51).

Tabla 78
Valores de Amonio obtenidos a la salida del sistema H₁

N° de mediciones	Amonio (mg/L)
1	3.8
2	2.2
3	3.2
4	4.2
5	2.4
6	1.8
7	1.8
8	2
9	4.4
10	7.2

Fuente: Elaboración propia

Figura 51
 Amonio a la salida del sistema con la especie *Typha domingensis* (totora)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₁, se determinó el valor promedio de Amonio de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₁, el cual fue de 3.26 mg/L (Ver Tabla 79).

Tabla 79
 Valor promedio de Amonio de las muestras en el sistema H₁

Amonio (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	(mg/L)
3.8	2.2	3.2	4.2	2.4	1.8	1.8	2.0	4.4	7.2	3.3

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de Amonio de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₁. Los resultados obtenidos en el humedal, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Typha domingensis* (totora) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa el Amonio de 9.4

mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 3.3 mg/L; es decir, 64.89 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₁ con la especie *Typha domingensis* (*tatora*) en el periodo de investigación (ver Tabla 80).

Tabla 80
Porcentaje de remoción de Amonio en el sistema H₁

N° de mediciones	Amonio (mg/L)	% Remoción
1	3.8	59.57
2	2.2	76.60
3	3.2	65.96
4	4.2	55.32
5	2.4	74.47
6	1.8	80.85
7	1.8	80.85
8	2	78.72
9	4.4	53.19
10	7.2	23.40
Promedio	3.3	64.89

Fuente: Elaboración propia

1.9.7.2 Amonio en el efluente H₂

Se determinaron las concentraciones de Amonio presentes en las muestras del efluentes H₂ a la salida del sistema con la especie *Phragmites australis* (carricillo). Las

concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 81.

Además, los resultados de Amonio de las muestras en las diez mediciones variaron entre 1.6 mg/L (valor mínimo registrado en la sexta medición) y 8.4 mg/L (valor máximo registrado en la décima medición) (ver Figura 52).

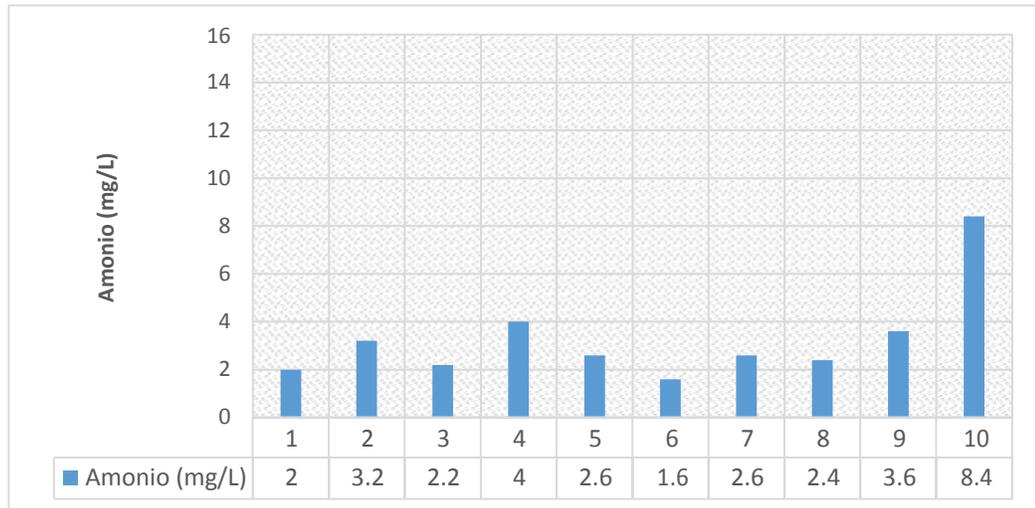
Tabla 81
Valores de Amonio obtenidos a la salida del sistema H₂

N° de mediciones	Amonio (mg/L)
1	2
2	3.2
3	2.2
4	4
5	2.6
6	1.6
7	2.6
8	2.4
9	3.6
10	8.4

Fuente: Elaboración propia

Figura 52

Amonio a la salida del sistema con la especie *Phragmites australis* (carricillo)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₂, se determinó un valor promedio de Amonio de las muestras de 3.26 mg/L (ver Tabla 82).

Tabla 82

Valor promedio de Amonio de las muestras en el sistema H₂

Amonio (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	(mg/L)
2	3.2	2.2	4	2.6	1.6	2.6	2.4	3.6	8.4	3.26

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de Amonio de las muestras, obtenidas a la salida del sistema H₂, de las diez mediciones; así como también, los resultados obtenidos en el humedal, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Phragmites australis* (carricillo) sembradas en el medio filtrante, pueden

reducir de forma significativa el Amonio de 9.4 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 3.26 mg/L; es decir, 65.32 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₂ con la especie *Phragmites australis* (carricillo) en el periodo de investigación (ver Tabla 83).

Tabla 83
Porcentaje de remoción de Amonio en el sistema H₂

N° de mediciones	Amonio (mg/L)	% Remoción
1	2	78.72
2	3.2	65.96
3	2.2	76.60
4	4	57.45
5	2.6	72.34
6	1.6	82.98
7	2.6	72.34
8	2.4	74.47
9	3.6	61.70
10	8.4	10.64
Promedio	3.26	65.32

Fuente: Elaboración propia

1.9.7.3 Amonio en el efluente H₃

Se determinaron las concentraciones de Amonio de las muestras del efluente H₃ a la salida del sistema con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco) Las concentraciones

obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), teniendo como resultados los valores expresados en la Tabla 84 (ver Figura 53).

Los resultados de Amonio de las muestras del efluente H₃ variaron entre 0.4 mg/L (valor mínimo registrado en la segunda medición) y 8.6 mg/L (valor máximo registrado en la décima medición).

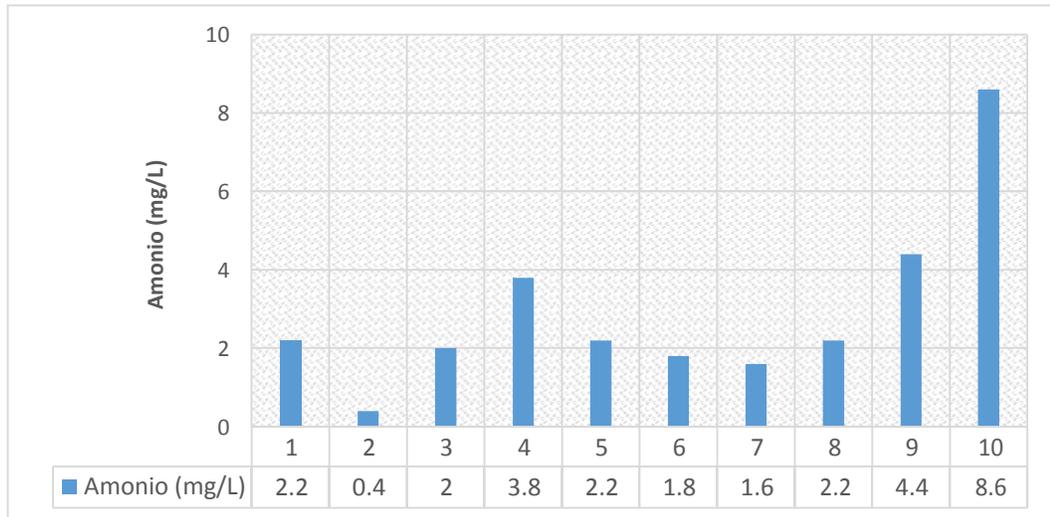
Tabla 84
Valores de Amonio obtenidos a la salida del sistema H₃

N° de mediciones	Amonio (mg/L)
1	2.2
2	0.4
3	2
4	3.8
5	2.2
6	1.8
7	1.6
8	2.2
9	4.4
10	8.6

Fuente: Elaboración propia

Figura 53

Amonio a la salida del sistema con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₃, se determinó un valor promedio de Amonio de 2.92 mg/L (ver Tabla 85)

Tabla 85

Valor promedio de Amonio de las muestras en el sistema H₃

Amonio (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	(mg/L)
2.2	0.4	2	3.8	2.2	1.8	1.6	2.2	4.4	8.6	2.92

Fuente: Elaboración propia

Además en la Tabla 86, se muestra los porcentajes de remoción de Amonio de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₃, obteniendo en la segunda medición una mayor remoción de 95.74 % en el cuarto ensayo; así como también, los resultados obtenidos en el humedal piloto H₃, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que

el sistema empleando *Schoenoplectus americanus* (junco) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa el Amonio de 9.4 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 2.92 mg/L; es decir, 68.94 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₃ con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco) en el periodo de investigación.

Tabla 86
Porcentaje de remoción de Amonio en el sistema H₃

N° de mediciones	Amonio (mg/L)	% Remoción
1	2.2	76.60
2	0.4	95.74
3	2	78.72
4	3.8	59.57
5	2.2	76.60
6	1.8	80.85
7	1.6	82.98
8	2.2	76.60
9	4.4	53.19
10	8.6	8.51
Promedio	2.92	68.94

Fuente: Elaboración propia

1.9.8 Fosfato

Se determinaron las concentraciones de Fosfato de las muestras a la salida de cada

sistema (H₁, H₂ y H₃) para las diez mediciones, obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 87. En el proceso de investigación, los valores de Fosfato de las muestras después del tratamiento, variaron entre 3.42 (valor registrado en la primera medición a la salida del sistema H₃) y 28.26 mg/L (valor registrado en la décima medición a la salida del sistema H₂) (ver Figura 54).

Tabla 87
Valores de Fosfato en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H ₁ (mg/L)	H ₂ (mg/L)	H ₃ (mg/L)
1	3.86	3.49	3.42
2	4.97	3.25	4.5
3	6.05	5.29	5.86
4	11.92	11.97	10.4
5	9.99	13.91	10.62
6	16.36	19.85	15.22
7	14.66	14.37	15.7
8	18.87	20.73	15.17
9	23.01	27.01	17.84
10	20	28.26	21.56

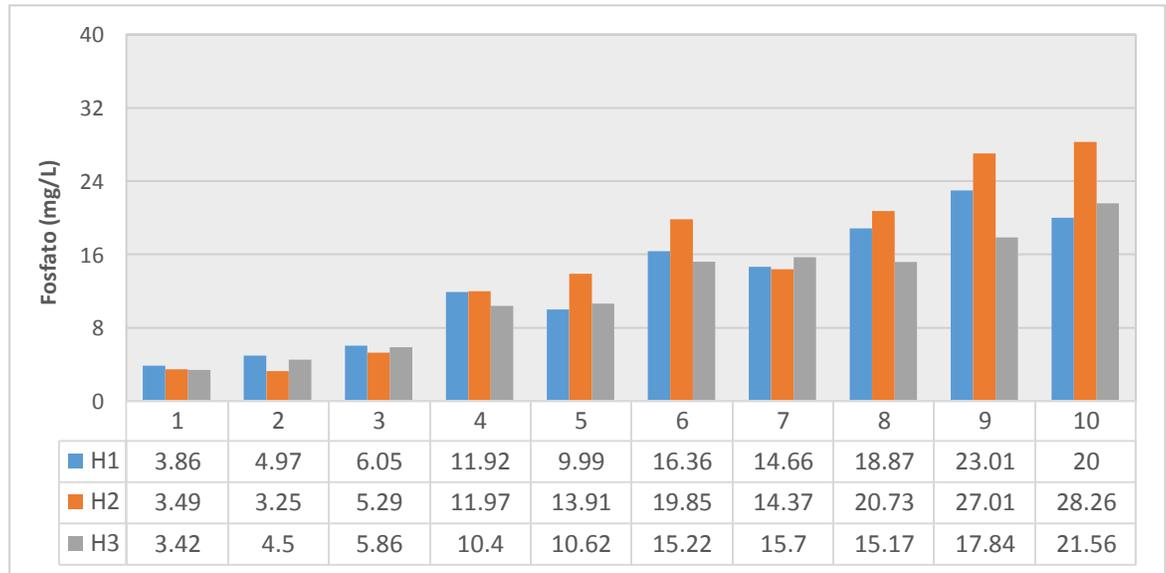
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 54
Fosfato de las muestras a la salida de cada sistema piloto



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 88, se muestra el valor inicial promedio de Fosfato (23.11 mg/L) obtenido a partir de la caracterización del agua residual antes del tratamiento, en comparación con los valores promedios de Fosfato obtenidos a partir de las diez mediciones a la salida de los sistemas piloto (H₁, H₂ y H₃) para cada especie macrófita después del tratamiento. Los concentraciones promedios de Fosfato en las muestras obtenidas a la salida de los sistemas H₁, H₂ y H₃ fueron 12.97 mg/L, 14.81 mg/L y 12.03 mg/L respectivamente (ver Figura 55).

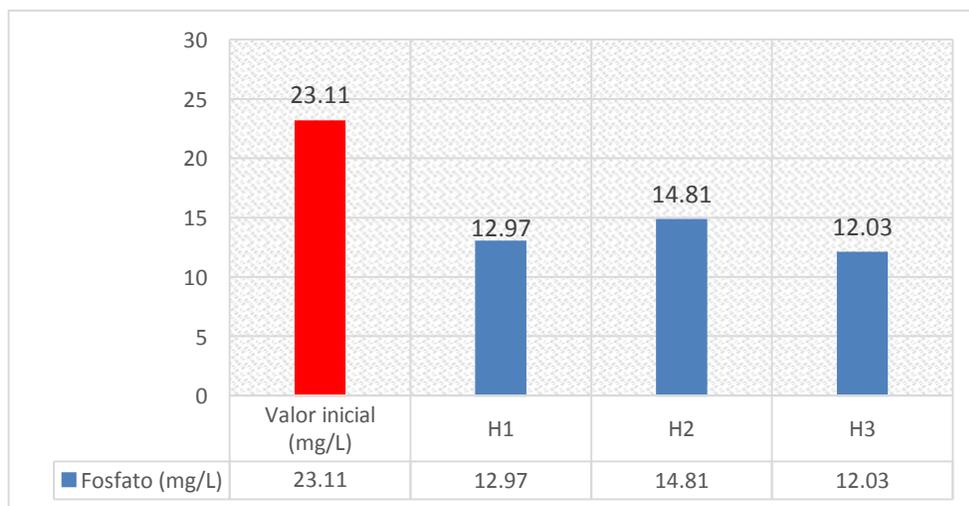
Tabla 88
Valores promedio de Fosfato antes y después del tratamiento

Valor inicial (mg/L)	23.11
H ₁	12.97

H ₂	14.81
H ₃	12.03

Fuente: Elaboración propia

Figura 55
Fosfato promedio en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

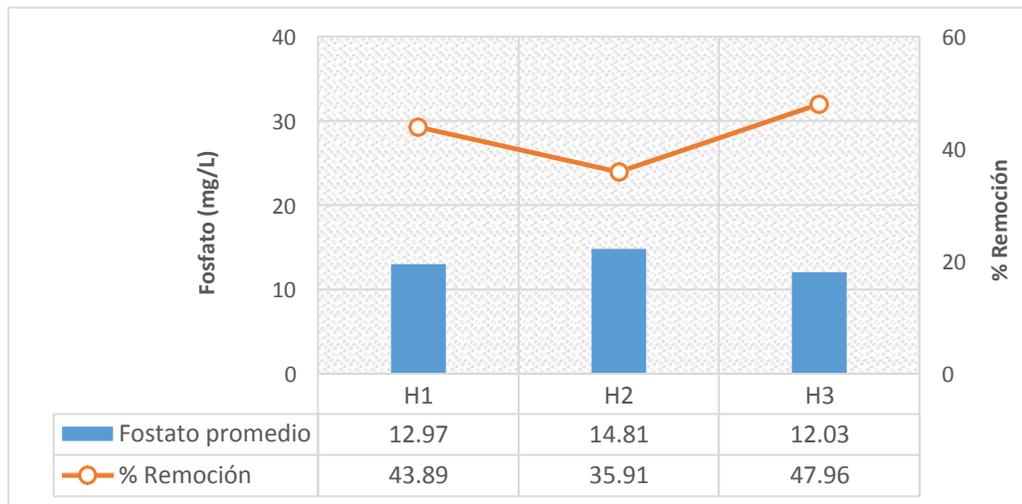
Además, se señala el porcentaje de remoción de Fosfato de las diez mediciones en cada uno de los sistemas piloto; así como también, se muestra el porcentaje de remoción promedio de Fosfato por sistema, a partir del cual se obtiene las eficiencias promedio del periodo de investigación de las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) de 43.89 %, 35.91 % y 47.96 % respectivamente (ver Tabla 89 y Figura 56).

Tabla 89
 Porcentaje de remoción de Fosfato

Sistemas de humedales	Fosfato final (mg/L)	Fosfato final (mg/L)	% Remoción
H ₁		12.97	43.89
H ₂	22.41	14.81	35.91
H ₃		12.03	47.96

Fuente: Elaboración propia

Figura 56
 Fosfato promedio en el sistema con la especie *Typha domingensis*



Fuente: Elaboración propia

1.9.8.1 Fosfato en el efluente H₁

Se determinaron las concentraciones de Fosfato presentes en las muestras del efluente H₁ a la salida del sistema con la especie *Typha domingensis* (totora). Los resultados obtenidos se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose los valores expresados en la Tabla 90.

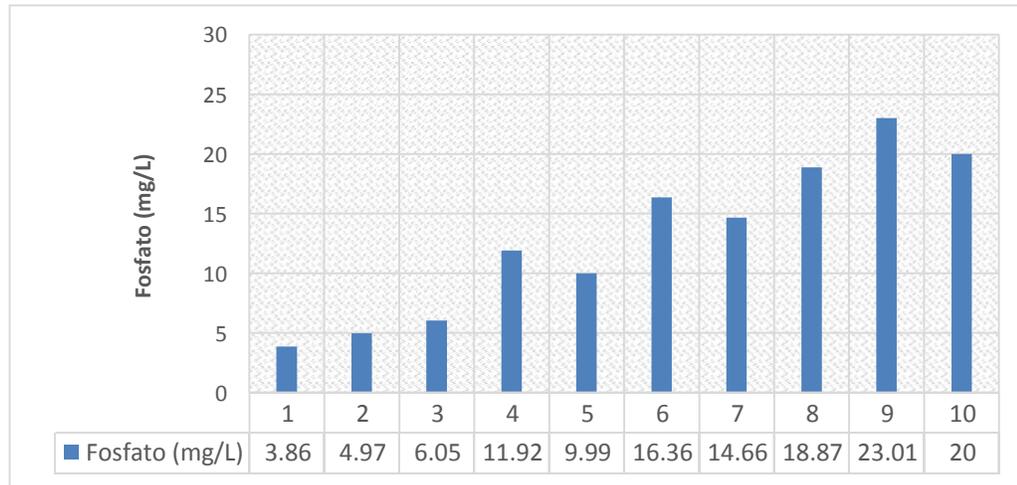
Además, los resultados de Fosfato de las muestras del efluente H₁ variaron entre 3.86 mg/L (valor mínimo registrado en la primera medición) y 23.01 mg/L (valor máximo registrado en la novena medición) (ver Figura 57).

Tabla 90
Valores de Fosfato obtenidos a la salida del sistema H₁

N° de mediciones	Fosfato (mg/L)
1	3.86
2	4.97
3	6.05
4	11.92
5	9.99
6	16.36
7	14.66
8	18.87
9	23.01
10	20

Fuente: Elaboración propia

Figura 57
 Fosfato a la salida del sistema con la especie *Typha domingensis* (totora)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₁, se determinó el valor promedio de Fosfato de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₁, el cual fue de 12.97 mg/L (ver Tabla 91).

Además, se muestran los porcentajes de remoción de Fosfato de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₁, donde se muestra una remoción mayor del 83.30 % en la primera medición. Los resultados con respecto a los Fosfatos obtenidos en el humedal piloto H₁, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Typha domingensis* (totora) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa los Fosfatos de 23.11 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 12.97 mg/L; es decir, 43.89 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₁ con la especie *Typha domingensis* (totora) en el periodo de investigación (ver Tabla 91).

Tabla 91
Porcentaje de remoción de Fosfato en el sistema H₁

N° de mediciones	Fosfato (mg/L)	% Remoción
1	3.86	83.30
2	4.97	78.50
3	6.05	73.82
4	11.92	48.43
5	9.99	56.78
6	16.36	29.22
7	14.66	36.57
8	18.87	18.36
9	23.01	0.45
10	20	13.47
Promedio	12.97	43.89

Fuente: Elaboración propia

1.9.8.2 Fosfato en el efluente H₂

Se determinaron las concentraciones de Fosfato presentes en las muestras de efluente H₂ a la salida del sistema con la especie *Phragmites australis* (carricillo). Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), teniendo como resultados los valores expresados en la Tabla 92 (ver Figura 58).

Además, los resultados de Fosfato de las muestras en las diez mediciones variaron entre 3.25 mg/L (valor mínimo registrado en la segunda medición) y 28.26 mg/L (valor máximo

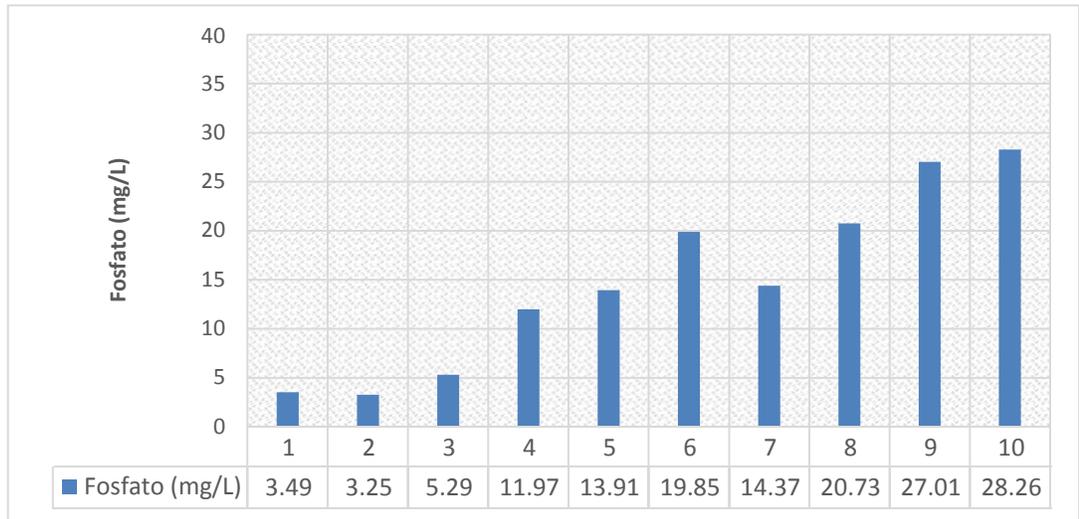
registrado en la décima medición).

Tabla 92
Valores de Fosfato obtenidos a la salida del sistema H₂

N° de mediciones	Fosfato (mg/L)
1	3.49
2	3.25
3	5.29
4	11.97
5	13.91
6	19.85
7	14.37
8	20.73
9	27.01
10	28.26

Fuente: Elaboración propia

Figura 58
 Fosfato a la salida del sistema con la especie *Phragmites australis* (carricillo)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₂, se determinó un valor promedio de Fosfato de las muestras de 14.81 mg/L.

Además, se señalan los porcentajes de remoción de Fosfato de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₂ de las diez mediciones, donde se muestra una remoción mayor del 85.94 % en la segunda medición. Los resultados con respecto a los Fosfatos obtenidos en el humedal piloto H₂, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Phragmites australis* (carricillo) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa los Fosfatos de 23.11 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 14.81 mg/L; es decir, 35.91 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₂ con la especie *Phragmites australis* (carricillo) en el periodo de investigación (ver Tabla 93).

Tabla 93
Promedio final y porcentaje de remoción de Fosfato en el sistema H₂

N° de mediciones	Fosfato (mg/L)	% Remoción
1	3.49	84.90
2	3.25	85.94
3	5.29	77.11
4	11.97	48.21
5	13.91	39.82
6	19.85	14.12
7	14.37	37.83
8	20.73	10.31
9	27.01	0.00
10	28.26	0.00
Promedio	14.81	35.91

Fuente: Elaboración propia

1.9.8.3 Fosfato en el efluente H₃

Se determinaron las concentraciones de Fosfato de las muestras del efluente H₃ a la salida del sistema con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco). Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 94.

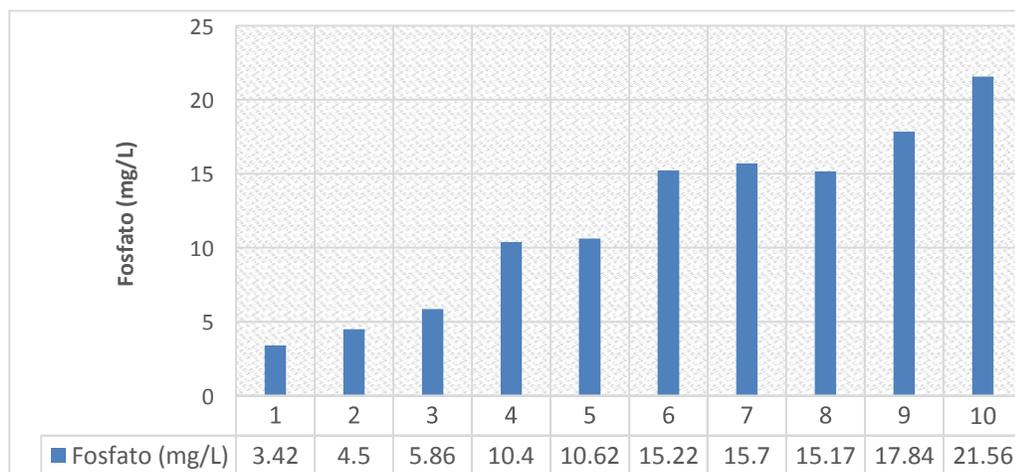
Los resultados de Fosfato de las muestras del efluente H₃ variaron entre 3.42 mg/L (valor mínimo registrado en la primera medición) y 21.56 mg/L (valor máximo registrado en la décima medición) (ver Figura 59).

Tabla 94
 Valores de Fosfato obtenidos a la salida del sistema H₃

N° de mediciones	Fosfato (mg/L)
1	3.42
2	4.5
3	5.86
4	10.4
5	10.62
6	15.22
7	15.7
8	15.17
9	17.84
10	21.56

Fuente: Elaboración propia

Figura 59
 Fosfato a la salida del sistema con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₃, se determinó un valor promedio de Fosfato de 12.03 mg/L.

Además en la Tabla 95, se señalan los porcentajes de remoción de Fosfato de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₃, obteniéndose en la primera medición una mayor remoción del 85.20 %. Los resultados con respecto a los Fosfatos obtenidos en el humedal piloto H₃, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Schoenoplectus americanus* (junco) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa los Fosfatos de 23.11 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 12.03 mg/L; es decir, 47.96 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₃ con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco) en el periodo de investigación.

Tabla 95
Promedio final y porcentaje de remoción de Fosfato en el sistema H₃

N° de mediciones	Fosfato (mg/L)	% Remoción
1	3.42	85.20
2	4.5	80.53
3	5.86	74.65
4	10.4	55.00
5	10.62	54.05
6	15.22	34.15
7	15.7	32.07
8	15.17	34.37
9	17.84	22.82

N° de mediciones	Fosfato (mg/L)	% Remoción
10	21.56	6.72
Promedio	12.03	47.96

Fuente: Elaboración propia

1.9.9 Aceites y grasas

Se determinaron los valores de Aceites y grasas de las muestras a la salida de cada sistema (H₁, H₂ y H₃) para las diez mediciones, obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 96. Las concentraciones de Aceites y grasas de las muestras después del tratamiento, variaron entre 0.2 (valor registrado en la tercera medición a la salida del sistema H₁) y 20.4 (valor registrado en la décima medición a la salida del sistema H₂) (ver Figura 60).

Tabla 96
Valores de Fosfato en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H₁ (mg/L)	H₂ (mg/L)	H₃ (mg/L)
1	2.4	5.2	1.3
2	4.2	3.4	1.6
3	0.2	1.2	3.4
4	7.8	16	2.2
5	2.2	6.8	12
6	9.2	2.6	4.6
7	3.2	4.8	12.4
8	6	8	1.2

N° de mediciones	H ₁ (mg/L)	H ₂ (mg/L)	H ₃ (mg/L)
9	4.2	1	4.6
10	9.8	20.4	2.7

Fuente: Elaboración propia

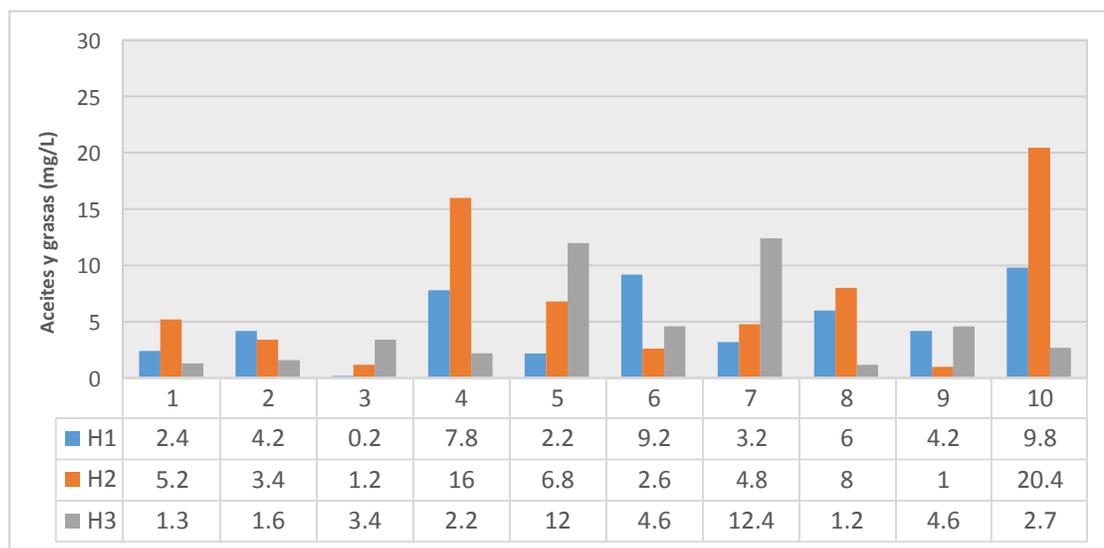
H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 60

Aceites y grasas de las muestras a la salida de cada sistema piloto



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 97, se muestra el valor inicial promedio de Aceites y grasas resultante a partir de la caracterización del agua residual antes del tratamiento, en comparación con los valores promedios de Aceites y grasas obtenidos a partir de las diez mediciones en los sistemas piloto (H₁, H₂ y H₃) para cada especie macrófita después del tratamiento. Los concentraciones promedios de Aceites y grasas en las muestras obtenidas a la salida de los sistemas H₁, H₂ y H₃, fueron 4.92 mg/L, 6.94 mg/L y 4.60 mg/L respectivamente (ver

Figura 61).

Tabla 97
Valores promedio de Aceites y grasas antes y después del tratamiento

Valor inicial (mg/L)	169.53
H ₁	4.92
H ₂	6.94
H ₃	4.60

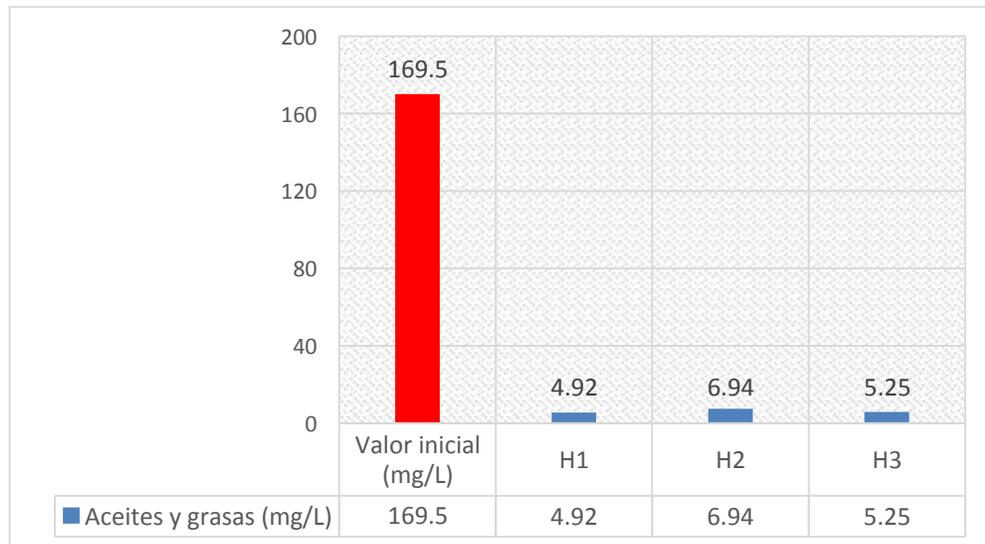
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carrillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 61
Aceites y grasas promedio en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

Además, se señala el porcentaje de remoción de Aceites y grasas de las diez mediciones

en cada uno de los sistemas piloto; así como también, se muestra el porcentaje de remoción promedio por sistema, a partir del cual se obtienen las eficiencias promedio del periodo de investigación con las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) del 97.10 %, 95.91 % y 97.29 % respectivamente (ver Tabla 98 y Figura 62).

Tabla 98
Porcentaje de remoción de Aceites y grasas

Sistema de humedales	Aceites y grasas final (mg/L)	Aceites y grasas final (mg/L)	% Remoción
H ₁		4.92	97.10
H ₂	169.53	6.94	95.91
H ₃		4.60	97.29

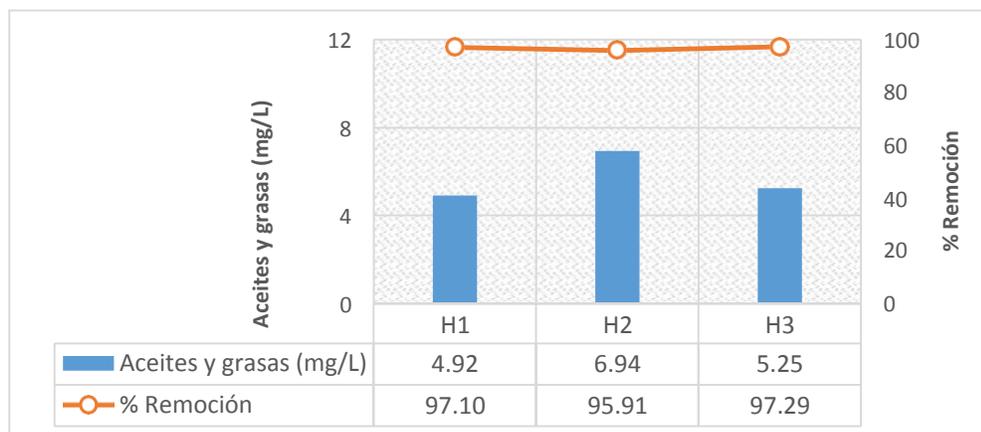
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 62
Remoción de Aceites y grasas en los sistemas de humedales



1.9.9.1 Aceites y grasas en el efluente H₁

Se determinaron las concentraciones de Aceites y grasas presentes en las muestras del efluente H₁ a la salida del sistema con la especie *Typha domingensis* (totora). Los resultados obtenidos se expresaron en miligramos por litro (mg/L), teniendo los valores expresados en la Tabla 99.

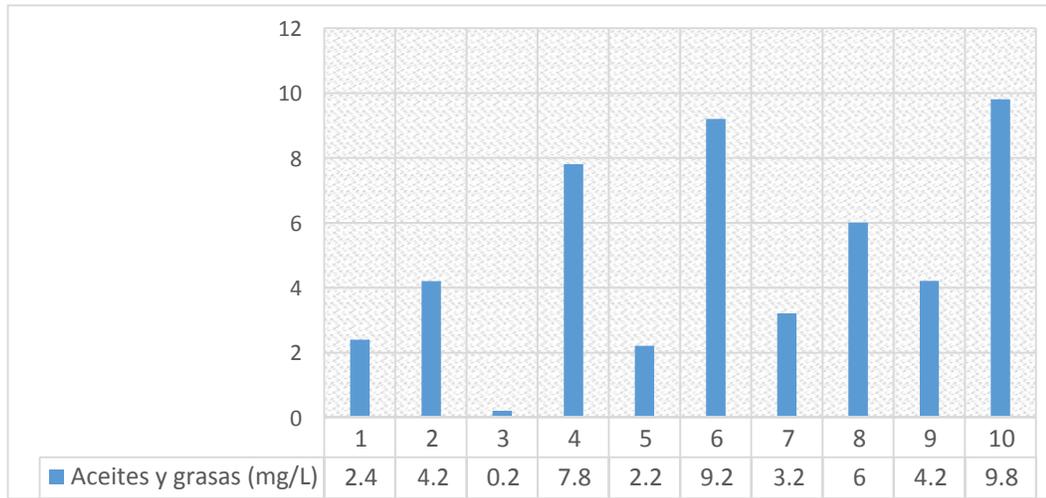
Además, los resultados de Aceites y grasas de las muestras del efluente H₁ variaron entre 0.2 mg/L (valor mínimo registrado en la tercera medición) y 9.8 mg/L (valor máximo registrado en la décima medición) (ver Figura 63).

Tabla 99
Valores de Aceites y grasas obtenidos a la salida del sistema H₁

N° de mediciones	Aceites y grasas (mg/L)
1	2.4
2	4.2
3	0.2
4	7.8
5	2.2
6	9.2
7	3.2
8	6
9	4.2
10	9.8

Fuente: Elaboración propia

Figura 63
Aceites y grasas a la salida del sistema con la especie Typha domingensis (totora)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₁, se determinó el valor promedio de Aceites y grasas de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₁, el cual fue de 4.92 mg/L (ver Tabla 100).

Tabla 100
Valor promedio de Aceites y grasas de las muestras en el sistema H₁

Aceites y grasas (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	(mg/L)
2.4	4.2	0.2	7.8	2.2	9.2	3.2	6	4.2	9.8	4.92

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de Aceites y grasas de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₁, donde se muestra que en la tercera medición se obtuvo una mayor remoción del 99.88 %.

Los resultados con respecto a los aceites y grasas obtenidos en el humedal piloto H₁, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Typha domingensis* (*titora*), sembrada en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa los aceites y grasas de 169.53 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 4.92 mg/L; es decir, 97.10 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₁ con la especie *Typha domingensis* (*titora*) en el periodo de investigación (ver Tabla 101).

Tabla 101
Porcentaje de remoción de Aceites y grasas en el sistema H₁

N° de mediciones	Aceites y grasas (mg/L)	% Remoción
1	2.4	98.58
2	4.2	97.52
3	0.2	99.88
4	7.8	95.40
5	2.2	98.70
6	9.2	94.57
7	3.2	98.11
8	6	96.46
9	4.2	97.52
10	9.8	94.22
Promedio	4.92	97.10

Fuente: Elaboración propia

1.9.9.2 Aceites y grasas en el efluente H₂

Se determinaron las concentraciones de Aceites y grasas presentes en las muestras del efluente H₂ a la salida del sistema con la especie *Phragmites australis* (carricillo). Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 102 (ver Figura 64).

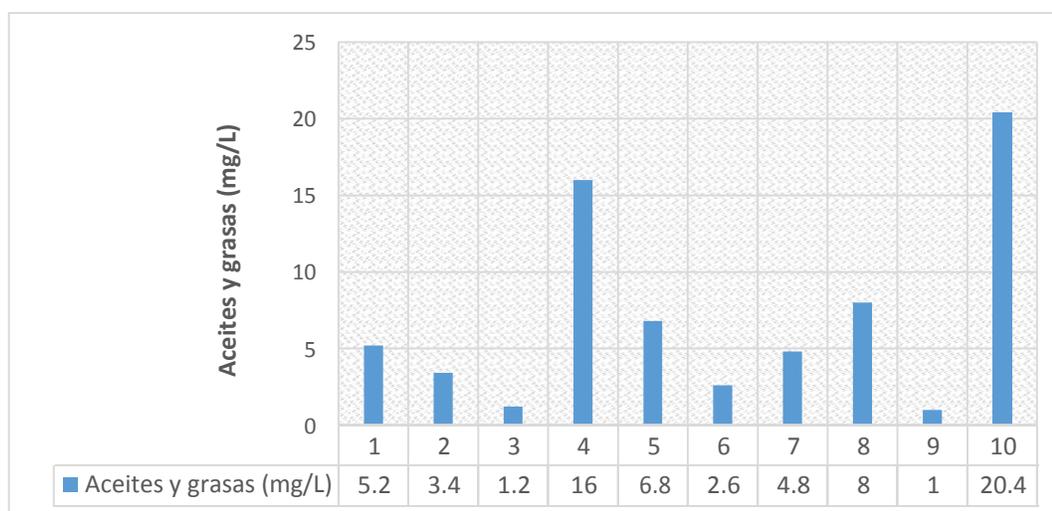
Además, los resultados de Aceites y grasas de las muestras en las diez mediciones variaron entre 1 mg/L (valor mínimo registrado en la novena medición) y 20.4 mg/L (valor máximo registrado en la décima medición).

Tabla 102
Valores de Aceites y grasas obtenidos a la salida del sistema H₂

N° de mediciones	Aceites y grasas (mg/L)
1	5.2
2	3.4
3	1.2
4	16
5	6.8
6	2.6
7	4.8
8	8
9	1
10	20.4

Fuente: Elaboración propia

Figura 64
 Aceites y grasas a la salida del sistema con la especie *Phragmites australis*
 (carricillo)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₂, se determinó un valor promedio de Aceites y grasas de las muestras de 6.94 mg/L (ver Tabla 103).

Tabla 103
 Valor promedio de Aceites y grasas de las muestras en el sistema H₂

Aceites y grasas (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	(mg/L)
5.2	3.4	1.2	16	6.8	2.6	4.8	8	1	20.4	6.94

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de Aceites y grasas de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₂, donde se muestra una remoción mayor del 99.41 % en la novena medición.

Los resultados con respecto a los Aceites y grasas obtenidos en el humedal piloto H₂, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Phragmites australis* (*carricillo*) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa los aceites y grasas de 169.53 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 6.94 mg/L; es decir, 95.91 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₂ con la especie *Phragmites australis* (*carricillo*) en el periodo de investigación (ver Tabla 104).

Tabla 104
Porcentaje de remoción de Aceites y grasas en el sistema H₂

N° de mediciones	Aceites y grasas (mg/L)	% Remoción
1	5.2	96.93
2	3.4	97.99
3	1.2	99.29
4	16	90.56
5	6.8	95.99
6	2.6	98.47
7	4.8	97.17
8	8	95.28
9	1	99.41
10	20.4	87.97
Promedio	6.94	95.91

Fuente: Elaboración propia

1.9.9.3 Aceites y grasas en el efluente H₃

Se determinaron las concentraciones de Aceites y grasas de las muestras del efluente H₃ a la salida del sistema con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco). Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultado los valores expresados en la Tabla 105 (ver Figura 65).

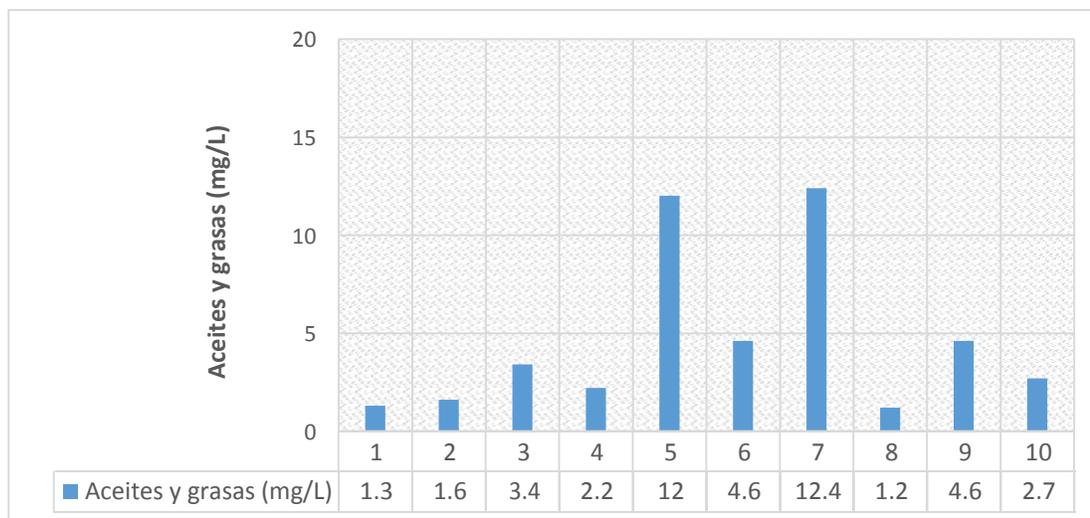
Los resultados de Aceites y grasas de las muestras del efluente H₃ variaron entre 1.2 mg/L (valor mínimo registrado en la octava medición) y 12.4 mg/L (valor máximo registrado en la séptima medición).

Tabla 105
Valores de Aceites y grasas obtenidos a la salida del sistema H₃

N° de mediciones	Aceites y grasas (mg/L)
1	1.3
2	1.6
3	3.4
4	2.2
5	12
6	4.6
7	12.4
8	1.2
9	4.6
10	2.7

Fuente: Elaboración propia

Figura 65
Aceites y grasas a la salida del sistema con la especie Schoenoplectus americanus (junco)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₃, se determinó un valor promedio de Aceites y grasas de 4.6 mg/L (Ver Tabla 106).

Tabla 106
Valor promedio de Aceites y grasas de las muestras en el sistema H₃

Aceites y grasas (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	(mg/L)
1.3	1.6	3.4	2.2	12	4.6	12.4	1.2	4.6	2.7	4.6

Fuente: Elaboración propia

Además en la Tabla 107, se señalan los porcentajes de remoción de Aceites y grasas de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₃, obteniendo en la octava medición una mayor remoción de 99.29 %.

Los resultados con respecto a los Aceites y grasas obtenidos en el humedal piloto H₃, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Schoenoplectus americanus* (junco) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa los aceites y grasas de 169.53 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 4.60 mg/L; es decir, 97.29 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₃ con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco) en el periodo de investigación (ver Tabla 107).

Tabla 107
Porcentaje de remoción de Aceites y grasas en el sistema H₃

N° de mediciones	Aceites y grasas (mg/L)	% Remoción
1	1.3	99.23
2	1.6	99.06
3	3.4	97.99
4	2.2	98.70
5	12	92.92
6	4.6	97.29
7	12.4	92.69
8	1.2	99.29
9	4.6	97.29
10	2.7	98.41
Promedio	5.25	97.29

Fuente: Elaboración propia

1.9.10 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Se determinaron las concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales de las muestras a la salida de cada sistema piloto para las diez mediciones, obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 108.

En el proceso de investigación, las concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales de las muestras después del tratamiento, varían entre 1 mg/L (valor registrado en el sistema H₂ y H₃) y 81 mg/L (valor registrado en el sistema H₂) (ver Figura 66).

Tabla 108

Valores de SST en los sistemas de humedales

N° de mediciones	H ₁ (mg/L)	H ₂ (mg/L)	H ₃ (mg/L)
1	42	81	46
2	56	25	51
3	3	9	11
4	29	16	6
5	22	2	4
6	22	6	6
7	2	1	7
8	4	2	2
9	3	1	1
10	4	1	2

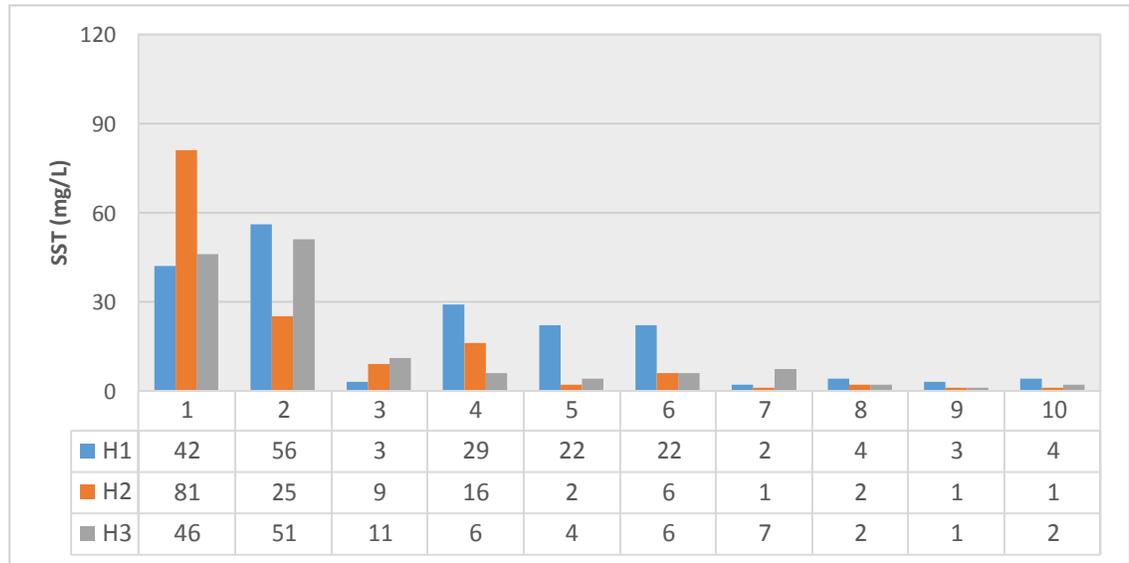
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 66
SST de las muestras a la salida de cada sistema piloto



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 109, se muestra el valor inicial promedio de Sólidos Suspendedos Totales obtenido a partir de la caracterización del agua residual antes del tratamiento, en comparación con los valores promedios de Sólidos Suspendedos Totales obtenidos a partir de las diez mediciones en los sistemas piloto (H₁, H₂ y H₃) para cada especie macrófita después del tratamiento. Los concentraciones promedios de Sólidos Suspendedos Totales en las muestras obtenidas a la salida de los sistemas H₁, H₂ y H₃, fueron 18.7 mg/L, 14.4 mg/L y 13.6 mg/L respectivamente.

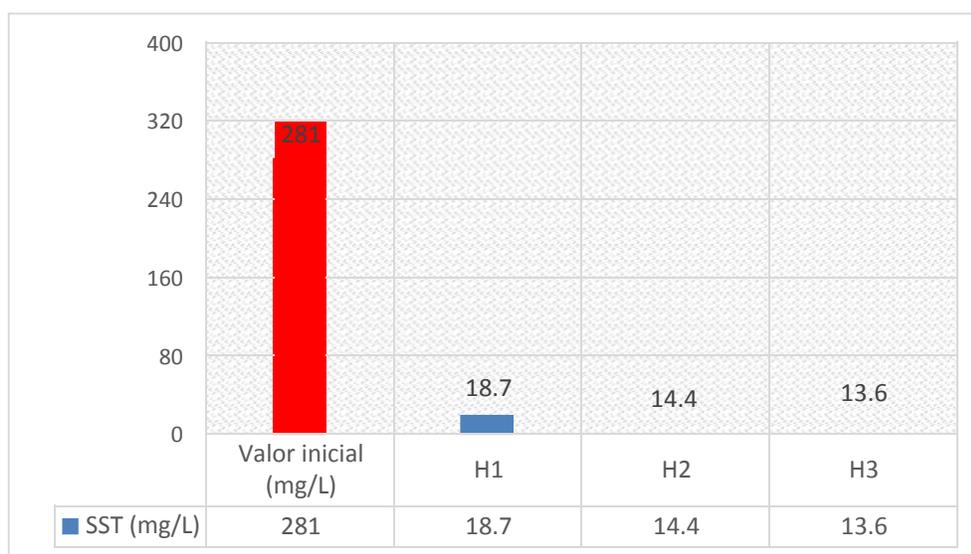
Tabla 109
Valores promedio de SST antes y después del tratamiento

Valor inicial (mg/L)	412.67
H ₁	18.7

Valor inicial (mg/L)	412.67
H ₂	14.4
H ₃	13.6

Fuente: Elaboración propia

Figura 67
SST promedio en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

Además en la Tabla 110, se señala el porcentaje de remoción de Sólidos Suspendidos Totales de las diez mediciones en cada uno de los sistemas piloto; así como también, se muestra el porcentaje de remoción promedio por sistema, a partir del cual se obtienen las eficiencias promedio del periodo de investigación de las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) del 95.47 %, 96.51 % y 96.70 % respectivamente (ver Figura 68).

Tabla 110
Porcentaje de remoción de SST

Sistemas de humedales	SST inicial (mg/L)	SST final (mg/L)	% Remoción
H ₁		18.70	95.47
H ₂	412.67	14.40	96.51
H ₃		13.60	96.70

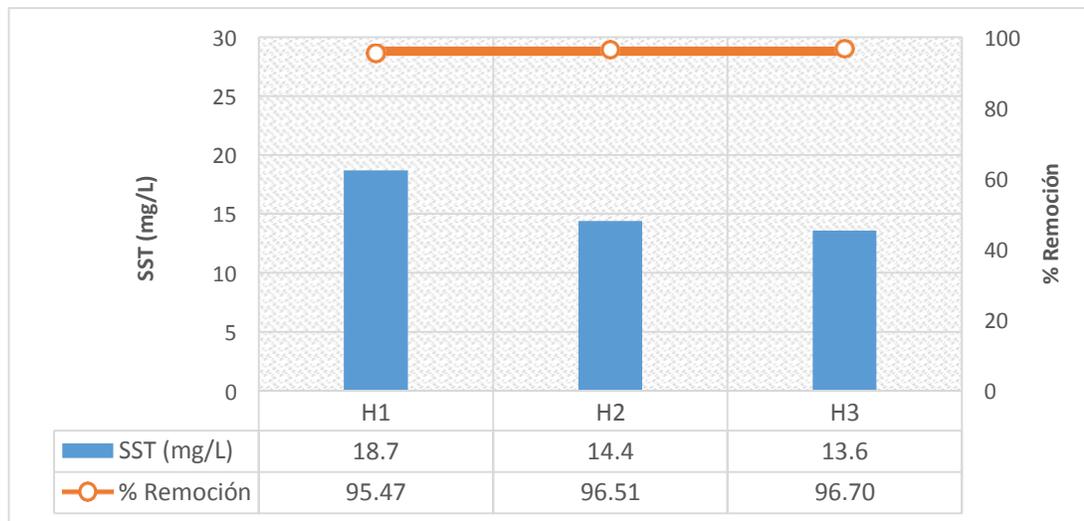
Fuente: Elaboración propia

H₁: Primer sistema sembrado con la especie *Typha domingensis* (totora)

H₂: Segundo sistema sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo)

H₃: Tercer sistema sembrado con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco)

Figura 68
Remoción de SST en los sistemas de humedales



Fuente: Elaboración propia

1.9.10.1 SST en el efluente H₁

Se determinaron las concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales presentes en las

muestras del efluente H₁ a la salida del sistema con la especie *Typha domingensis* (totora). Los resultados obtenidos se expresaron en miligramos por litro (mg/L), teniendo los valores expresados en la Tabla 111.

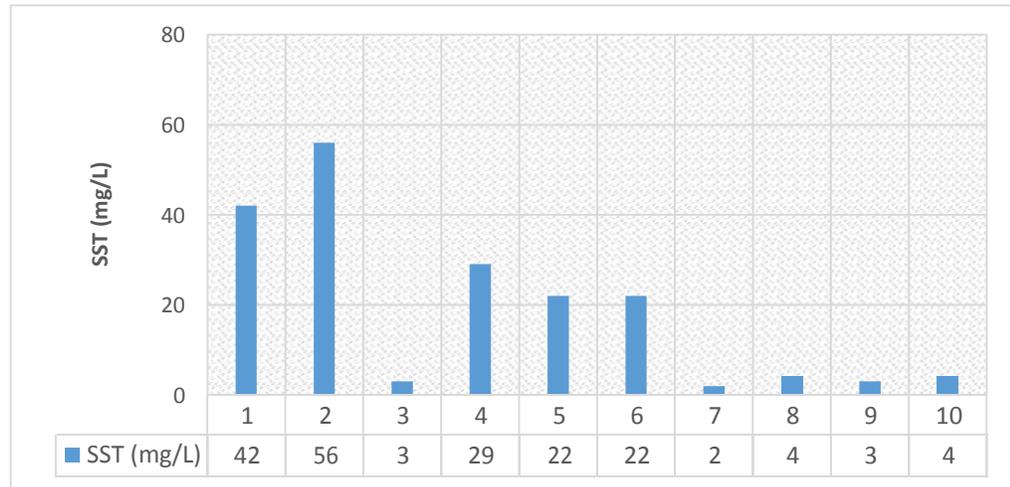
Además, los resultados de Sólidos Suspendidos Totales de las muestras del efluente H₁ variaron entre 2 mg/L (valor mínimo registrado en la séptima medición) y 56 mg/L (valor máximo registrado en la segunda medición) (ver Figura 69).

Tabla 111
Valores de SST obtenidos a la salida del sistema H₁

N° de mediciones	SST (mg/L)
1	42
2	56
3	3
4	29
5	22
6	22
7	2
8	4
9	3
10	4

Fuente: Elaboración propia

Figura 69
SST a la salida del sistema con la especie *Typha domingensis* (totora)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₁, se determinó el valor promedio de Sólidos Suspendedos Totales de las muestras obtenidas en el sistema H₁, el cual fue de 18.7 mg/L (ver Tabla 112).

Tabla 112
Valor promedio de Amonio de las muestras en el sistema H₁

Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	SST (mg/L)
42	56	3	29	22	22	2	4	3	4	18.7

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de Sólidos Suspendedos Totales de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₁, donde se muestra una remoción mayor del 99.52 % en la séptima medición.

Los resultados con respecto a los Sólidos Suspendidos Totales obtenidos en el humedal piloto H1, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Typha domingensis* (totora) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa los Sólidos Suspendidos Totales de 412.67 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 18.7 mg/L; es decir, 95.47 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₁ con la especie *Typha domingensis* (totora) en el periodo de investigación (ver Tabla 113).

Tabla 113
Porcentaje de remoción de SST en el sistema H₁

N° de mediciones	SST (mg/L)	% Remoción
1	42	89.82
2	56	86.43
3	3	99.27
4	29	92.97
5	22	94.67
6	22	94.67
7	2	99.52
8	4	99.03
9	3	99.27
10	4	99.03
Promedio	18.7	95.47

Fuente: Elaboración propia

1.9.10.2 SST en el efluente H₂

Se determinaron las concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales presentes en las muestras del efluente H₂ a la salida del sistema con la especie *Phragmites australis* (carricillo). Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultados los valores expresados en la Tabla 114 (ver Figura 70).

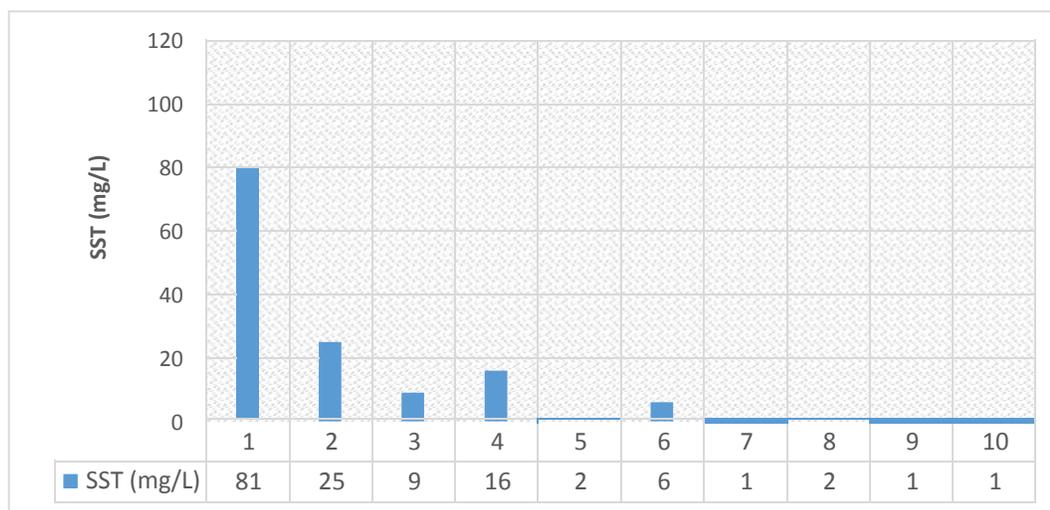
Además, los resultados de Sólidos Suspendidos Totales de las muestras en las diez mediciones variaron entre 1 mg/L (valor mínimo registrado en la novena y décima medición) y 81 mg/L (valor máximo registrado en la primera medición).

Tabla 114
Valores de SST obtenidos a la salida del sistema H₂

N° de mediciones	SST (mg/L)
1	81
2	25
3	9
4	16
5	2
6	6
7	1
8	2
9	1
10	1

Fuente: Elaboración propia

Figura 70
SST a la salida del sistema con la especie Typha domingensis (totora)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₂, se determinó un valor promedio de Sólidos Suspendidos Totales de las muestras de 14.4 mg/L (ver Tabla 115).

Tabla 115
Valor promedio de SST de las muestras en el sistema H₂

SST (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	SST (mg/L)
81	25	9	16	2	6	1	2	1	1	14.4

Fuente: Elaboración propia

Además, se señalan los porcentajes de remoción de los Sólidos Suspendidos Totales de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₂, donde se muestra una remoción mayor del 99.76 % en la séptima, novena y décima medición.

Los resultados con respecto a los Sólidos Suspendidos Totales obtenidos en el humedal piloto H₂, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Phragmites australis* (carricillo) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa los Sólidos Suspendidos Totales de 412.67 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 14.4 mg/L; es decir, 96.51 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₂ con la especie *Phragmites australis* (carricillo) en el periodo de investigación (ver Tabla 116).

Tabla 116
Porcentaje de remoción de Aceites y grasas en el sistema H₂

N° de mediciones	SST (mg/L)	% Remoción
1	81	80.37
2	25	93.94
3	9	97.82
4	16	96.12
5	2	99.52
6	6	98.55
7	1	99.76
8	2	99.52
9	1	99.76
10	1	99.76
Promedio	14.4	96.51

Fuente: Elaboración propia

1.9.10.3 SST en el efluente H₃

Se determinaron las concentraciones de los Sólidos Suspending Totales de las muestras del efluente H₃ a la salida del sistema con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco). Las concentraciones obtenidas se expresaron en miligramos por litro (mg/L), obteniéndose como resultado los valores expresados en la Tabla 117.

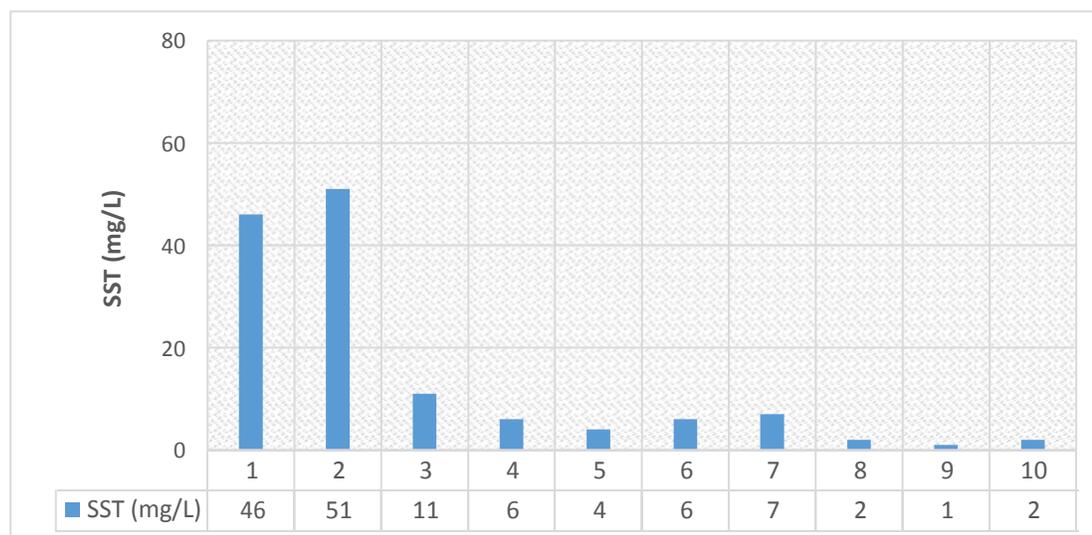
Los resultados de las concentraciones de los Sólidos Suspending Totales de las muestras del efluente H₃ variaron entre 1 mg/L (valor mínimo registrado en la novena medición) y 51 mg/L (valor máximo registrado en la segunda medición) (ver Figura 71).

Tabla 117
Valores de Aceites y grasas obtenidos a la salida del sistema H₃

N° de mediciones	SST (mg/L)
1	46
2	51
3	11
4	6
5	4
6	6
7	7
8	2
9	1
10	2

Fuente: Elaboración propia

Figura 71
SST a la salida del sistema con la especie Schoenoplectus americanus (junco)



Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas en el efluente del sistema H₃, se determinó un valor promedio de Sólidos Suspendidos Totales de 13.6 mg/L (ver Tabla 118).

Tabla 118
Valor promedio de SST de las muestras en el sistema H₃

SST (mg/L)										Promedio
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	SST (mg/L)
46	51	11	6	4	6	7	2	1	2	13.6

Fuente: Elaboración propia

Además en la Tabla 119, se señalan los porcentajes de remoción de SST de las muestras obtenidas a la salida del sistema H₃, obteniendo en la novena medición una mayor remoción de 99.76 %.

Los resultados con respecto a los Sólidos Suspendidos Totales obtenidos en el humedal

piloto H₃, para un tiempo de retención de 48 horas, indican que el sistema empleando *Schoenoplectus americanus* (junco) sembradas en el medio filtrante, pueden reducir de forma significativa los Sólidos Suspendidos Totales de 412.67 mg/L en el afluente, mientras que en el efluente se tiene un valor promedio de 13.6 mg/L; es decir, 96.70 % de remoción; a partir del cual, se obtiene una eficiencia promedio en el sistema H₃ con la especie *Schoenoplectus americanus* (junco) en el periodo de investigación (ver Tabla 119).

Tabla 119
Porcentaje de remoción de SST en el sistema H₃

N° de mediciones	SST (mg/L)	% Remoción
1	46	88.85
2	51	87.64
3	11	97.33
4	6	98.55
5	4	99.03
6	6	98.55
7	7	98.30
8	2	99.52
9	1	99.76
10	2	99.52
Promedio	13.6	96.70

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se muestra en la presente investigación, se determinó la eficiencia de tres especies macrófitas (*Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus Americanus*) para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en sistemas piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial. Para ello, se realizaron los análisis de las muestras de agua residual a nivel de laboratorio, determinando las concentraciones de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Amonio (NH_4^+), Fosfato, Aceites y grasas y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Se determinó la calidad del agua residual antes tratamiento; así como también, se analizaron las muestras de agua residual después del tratamiento en los sistemas de humedales artificiales.

Soles Silvan, Lopez Ocaña, Bautista Margulis, Hernandez Barajas y Romellon Cerino (2016) en su artículo titulado “Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita” determinaron la eficiencia de remoción de la DBO_5 empleando la especie *Typha domingensis* en un humedal artificial con tiempos de retención hidráulica de 5.5 y 7.5 días. A diferencia de la presente investigación, donde se obtuvo un porcentaje de remoción de la DBO_5 de 73.7 % a la salida del humedal artificial sembrado con *Typha domingensis* (totora), sin embargo la eficiencia obtenida fue menor en 23.8% ya que en la presente investigación se empleó un tiempo de retención hidráulica de 2 días. Chacon Ventura (2015), en su tesis denominada “Implementación de wetlands para mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de

la industria procesadora agropecuaria Esmeralda S.A.” determinó las ventajas del tratamiento secundario con la especie *Typha domingensis* de las aguas residuales de matadero mediante humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal con aireación y sin aireación con un tiempo de retención de 2.38 días. Respecto a la DBO₅, varió entre 1500 mg/L a 2500 mg/L antes del tratamiento y a la salida obtuvo como resultado valores entre 15 mg/L y 780 mg/L, con una eficiencia de remoción mínima y máxima de 77.25% y 98.33%. Mientras que en la presente investigación se obtuvo una DBO₅ promedio de 330 mg/L antes del tratamiento y un valor promedio de 86.7 mg/L a la salida del tratamiento con la especie *Typha domingensis* (totora).

Por otro lado, Rojas, Vera y Vidal (2013) en su investigación implementaron cuatro unidades de flujo subsuperficial, dos de ellas sembradas con *Phragmites australis*; y las otras dos, con *Schoenoplectus californicus*, teniendo como resultado concentraciones de los efluentes para DBO₅ que variaron entre 80 y 120 mg/L, con eficiencias de eliminación cercanas al 50 %. Mientras que en la presente investigación, a la salida del humedal artificial sembrado con la especie *Phragmites australis* (carricillo) se obtuvo una concentración promedio de DBO₅ de 83.4 mg/L y un porcentaje de remoción de 74.7%.

En relación a la DQO, Soles Silvan, Lopez Ocaña, Bautista Margulis, Hernandez Barajas y Romellon Cerino (2016), en su investigación emplearon la *Typha domingensis* y determinaron la concentración de este parámetro en el efluente, obteniendo un porcentaje de remoción del 97.8 %; mientras que Chacon Ventura (2015), en su tesis determinó a la salida del sistema de tratamiento valores de DQO entre 76 mg/L y 1153 mg/L, con una eficiencia de remoción mínima y máxima de 97.49 % y 98.89 %. A diferencia del presente trabajo de investigación donde a la salida del humedal artificial

sembrado con *Typha domingensis* se obtuvo una DQO promedio de 150.9 mg/L con una eficiencia del 70.37%. Por otro lado, Rojas, Vera y Vidal (2013) en su investigación determinaron la DQO del efluente a la salida de los sistemas con *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus*; las concentraciones variaron entre 160 y 240 mg/L, con eficiencias de eliminación menores al 30% en invierno y menores al 55% en primavera. Mientras que en la presente investigación se obtuvo una DQO promedio de 138.3 mg/L con una eficiencia del 72.85% a la salida del humedal artificial sembrado con *Phragmites australis* (carricillo).

Respecto al Amonio, Rojas, Vera y Vidal (2013), empleando las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* determinaron concentraciones en el afluente de 39.45 mg/L en la estación de invierno y 100.25 mg/L en primavera, mientras que en el efluente los valores obtenidos en invierno fueron menores al 30 mg/L, con eficiencias de eliminación inferiores a 44 %; y en primavera los valores variaron entre 60 y 70 mg/L, con eficiencias de eliminación menores a 35%. A diferencia de la presente investigación, donde se empleó la especie *Phragmites australis*, se determinó 9.4 mg/L de concentración promedio en el afluente y 3.26 mg/L de concentración del efluente, obteniendo una reducción en 6.14 mg/L con una eficiencia del 65.32 %. Con relación a los Fosfatos, Rojas, Vera y Vidal (2013) obtuvieron valores del afluente en invierno de 8.18 mg/L y 10.68 mg/L en primavera, con una eficiencia de remoción cercanas al 14 % para el efluente del humedal sembrado con *Phragmites australis* en la estación de invierno, y con una eficiencia de remoción entre 17 y 19 % en primavera; mientras que en la presente investigación se tuvo un afluente promedio de 22.41 mg/L, y a la salida del tratamiento determinó un valor promedio de 14.81 mg/L con una eficiencia de remoción del 35.91%.

Soles Silvan, Lopez Ocaña, Bautista Margulis, Hernandez Barajas y Romellon Cerino (2016), determinó una remoción de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) de 97.7%, mientras que en la presente investigación se determinó una remoción del 95.47% con el tratamiento en el humedal artificial con la especie *Thypa domingensis*. Por otro parte, Rojas, Vera y Vidal (2013) determinaron un valor en el afluente en invierno fue de 216.57 mg/L y 449.17 en primavera, mientras que los efluentes variaron entre 30 y 70 mg/L a la salida de las unidades de tratamiento con las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* con eficiencias de eliminación entre 74 y 84 %; a diferencia de los resultados en la presente investigación donde el afluente tuvo una concentración de 412.67 mg/L, mientras que el efluente tratado con la especie *Phragmites australis* tuvo un valor promedio de 14.4 mg/L y una eficiencia de remoción del 96.51%.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

1. Para la determinar la calidad del agua residual doméstica antes del tratamiento, se realizaron los análisis a nivel de laboratorio a fin de determinar los parámetros básicos: Temperatura, pH, Conductividad eléctrica, TDS, pH; y los parámetros fisicoquímicos: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Amonio (NH_4^+) y Fosfatos (PO_4^{-3}), Aceites y grasas, Sólidos Suspendedos Totales (SST). Los análisis realizados sirvieron para caracterizar y dar a conocer los parámetros fisicoquímicos del agua residual doméstica, habiéndose encontrado fuera de los límites máximos permisibles. Los valores obtenidos fueron: DBO_5 de 330 mg/L, DQO de 509.33 mg/L, Fosfatos (PO_4^{-3}) de 22.41 mg/L, Amonio (NH_4^+) de 9.4 mg/L, Aceites y grasas de 169.53 mg/L y Sólidos Suspendedos Totales (SST) de 412.67 mg/L.
2. Se realizaron las mediciones de las especies macrófitas (*Typha domingensis*, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus*) utilizadas en los sistemas de humedales artificiales. Se determinaron las variaciones de altura de las raíces antes de la siembra y concluida la investigación, obteniendo que la especie *Typha domingensis* (*titora*) presentó una mayor desarrollo respecto a las otras dos especies con una altura promedio inicial de 20.66 cm y una altura promedio final de 103.21cm, habiendo obtenido un crecimiento de 82.55 cm. Además, durante la etapa de investigación se tomaron como muestra, para la medición del crecimiento,

a un número de individuos de cada especie de cada uno de los sistemas piloto y las mediciones fueron realizadas cada cuatro días, desde el primer día que fueron sembradas, hasta concluir la investigación, donde la especie *Phragmites australis* (carricillo) fue la que alcanzó una mayor altura promedio total, con una altura promedio de 82.10 cm, seguida de la especie *Typha domingensis* (totora) con un altura promedio de 63.28 cm y la especie *Schoenoplectus americanus* (junco) con 61.67 cm. Así como también, durante la investigación se realizaron las mediciones de las hojas y brotes de la especie *Phragmites australis* (carricillo), teniendo en las hojas una longitud inicial promedio de 9 cm y una longitud final promedio de 18.35 cm, habiendo crecido 9.35 cm en promedio durante la investigación, mientras que la cantidad de hojas fue de 7 hojas al inicio y 42 hojas al final de la investigación, incrementándose la cantidad de hojas en 35. Para los brotes, se tuvo una longitud inicial promedio de 8.02cm y una longitud promedio final de, 49.44 cm, concluyendo que la adaptación y desarrollo de dicha especie macrofita en aguas residuales domesticas es óptima.

3. A fin de conocer las eficiencias de las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) en el tratamiento de las aguas residuales en sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial, se determinaron las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos a la salida del tratamiento; así como también, se determinaron los porcentajes de remoción de los mismos en cada humedal artificial. Respecto a la DBO₅ se obtuvieron porcentajes de remoción de 73.7%, 74.7% y 73.6 % en los

sistemas de humedales artificiales sembrados con totora, carricillo y junco.

Sobre la DQO los porcentaje de remoción fueron de 70.37 %, 72.85 % y 70.12% para cada sistema. En relación al Amonio (NH_4^+), se determinaron remociones de 64.89%, 65.32% y 68.94% para el tratamiento respectivamente.

Respecto al Fosfato, los eficiencias de remoción fueron de 43.89 %, 35.91 % y 47.96% en cada sistema de humedales artificiales. Sobre los Solidos Suspendidos Totales (SST), los sistemas piloto sembrados con totora, carricillo y junco pudieron reducir significativamente los SST, obteniendo porcentajes de remoción de 95.47 %, 96.51 %, y 96.70 % respectivamente. Por último, en la relación a los Aceites y grasas se obtuvieron porcentajes de remoción de 97.10 %, 95.91 % y 97.29 % en cada sistema piloto.

7.2 RECOMENDACIONES

De acuerdo a la investigación realizada, se presentan algunas recomendaciones las cuales se detallan a continuación:

1. Se recomienda el uso de especies macrófitas emergentes como son la *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) para el tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales, debido a los altos porcentajes de remoción obtenidos en los parámetros fisicoquímicos, los cuales fueron determinados en la presente investigación.
2. Se debe tener en cuenta las condiciones climáticas adecuadas donde las especies macrófitas a emplear en el tratamiento de las aguas residuales puedan desarrollarse y adaptarse de manera óptima. En el caso de la *Typha domingensis* (totora), la especie es de clima templado o templado frío; es decir temperaturas entre los 10 a 30°C aproximadamente. La especie *Phragmites australis* (carricillo) también es una especie de clima templado y se desarrolla a temperaturas superiores a los 10°C e inferiores a los 32°C. En climas fríos las bajas temperaturas reducen la tasa de remoción de la DBO en los sistemas de humedales artificiales.
3. Para los sistemas de humedales de flujo subsuperficial se recomienda que la profundidad del lecho filtrante o medio filtrante tenga una altura de 0.45m a 1m, teniendo en cuenta que la altura del agua residual que ingrese no sobrepase el nivel del medio. Además, la base del humedal artificial debe tener una ligera pendiente de 0.5% a 1%. Para el caso, de la relación largo (l) y ancho (a) del

humedal se recomienda una proporción de 2:1 o 4:1, según sea el tamaño del lugar donde se implementará el sistema de tratamiento.

4. Verificar que el medio filtrante a utilizar (arena gruesa, grava o piedra chancada) no contenga impurezas, ya que pueden disgregarse y saturar el sistema. Por ello, es importante realizar el lavado del medio filtrante antes de su instalación en los sistemas de humedales artificiales.
5. En la etapa de construcción de los sistemas de ingreso y salida del agua en los humedales artificiales, se debe tener en cuenta que los accesorios empleados deben ser asegurados adecuadamente a fin de evitar posibles fugas durante el tratamiento.
6. Durante el tratamiento, se debe realizar la limpieza del reservorio donde se almacena el agua residual doméstica por lo menos dos veces por semana con la finalidad de evitar la formación de hongos y acumulación de material sedimentable en el fondo del reservorio. Asimismo, se debe realizar la limpieza en el interior de los sistemas de humedales, retirando las hojas secas o malas hierbas que pudieran crecer en la superficie.
7. Es recomendable que el sistema cuente con periodos de descanso durante el tratamiento. Si el agua residual se encuentra retenida en los humedales artificiales para el tratamiento por 48 horas, el sistema debe descansar las 24 horas siguientes.
8. Es importante que esta investigación sea replicada, con la finalidad de establecer sistemas de tratamiento por humedales artificiales con especies

macrófitas con la finalidad de realizar la remoción de diferentes tipos de contaminantes; como por ejemplo, contaminantes provenientes de aguas residuales industriales o aguas procedentes del sector minero (a través de la remoción de metales).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amabalis Sosa, L. E., Siebe, C., Moeller Chávez, G., & Durán Domínguez De Bazúa, M. (2016). Remoción de mercurio por *Phragmites australis* empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 47-53.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control, Federation. (s.f.). *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*.
- Arteaga Tello, E. R., & Galindo Cabello, D. A. (2016). Estudio experimental para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto para la remoción de DBO en aguas residuales domésticas. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Autoridad Nacional del Agua, Á. d. (s.f.). *Protección del agua, vigilancia y control de vertimientos-PAVER*. Lima.
- Bedoya Pérez, J. C., Ardilla Arias, A. N., & Reyes Calle, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 275-283.
- Cecilio Cabrera, Y. (2016). Remoción de materia orgánica influenciada por la macrófita *Scirpus californicus* en humedales artificiales subsuperficiales. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

- Chacon Ventura, J. S. (2015). Implementación de wetlands para mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria procesadora agropecuaria Esmeralda S.A. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Da Cámara, L., Hernández, M., & Paz, L. (2003). *Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias*. Barcelona: M. Gómez.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (Nelson Antequera Durán ed.). Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua .
- Escudero Cornejo, G. E. (2011). Tratamiento de efluentes de la granja porcina del Instituto Redentores Mater y Juan Pablo II de Ventanilla a través de humedales artificiales para su reutilización como agua de clase III. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional del Callao.
- Espinosa Ortiz, C. E. (2014). *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes*. Bogotá.
- Fernández de la Mora, M. D. (sf.). Macrófitas de interés en fitodepuración. En J. Fernández González, E. De Miguel Beascochea, J. De Miguel Muñoz, & M. D. Fernández de la Mora, *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación* (pág. 1). Madrid.
- Fernández González, J. (sf.). Humedales artificiales para depuración. En J.

Fernández González, E. De Miguel Beascochea, J. De Miguel Muñoz, & M. D. Fernández de la Mora, *Manual de Fitodepuración. Filtros de Macrófitas en flotación* (pág. 2). Madrid, España.

- García, E. (2004). *Tratamiento de aguas industriales: Análisis microbiológico de aguas residuales*. Barcelona: Fundación Universitaria Iberoamericana.
- Gonzáles Díaz, O., & Deas Valdés, G. (2011). Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2.
- Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., & Von Muench, E. (2011). *Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. Eschborn.
- Jaramillo Gallego, M. L., Agudelo Cadavid, R. M., & Peñuela Mesa, G. A. (2016). Optimización de tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 20-29.
- Lara B., J. A. (1999). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña-Instituto Catalán de Tecnología.
- Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de Humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 32-55.

- Mendez Melgarejo, F. V., & Feliciano Muñoz, O. (Enero de 2010). Propuesta de un modelo socio económico de decisión de uso de aguas residuales tratadas en sustitución de agua limpia para áreas verdes. Lima, Perú.
- Mendonca, S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización: Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de riego*. Santafé de Bogota.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (Enero de 2010). Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos. Lima, Lima, Perú.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2017). Decreto Supremo N° 006-2017-AG. Lima, Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2010). Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales aprobado por Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2009). Manual para Municipios Ecoeficientes. *Tratamiento y reuso de aguas residuales*. Lima, Perú.
- Miyashiro Kiyon, V., Méndez Quincho, L., & Orihuela de Campos, L. (2014). *Gestión del Agua en el Perú: Uso, protección y tratamiento*. Lima: Fondo Editorial de la UNALM.
- Montiel Morales, P. A. (2014). Humedal Artificial. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes

contenidos en aguas servidas. *Theoria*, 33-46.

- ONU-Agua. (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016-Agua y Empleo*. París.
- ONU-Agua. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017-Aguas Residuales, el recurso desaprovechado*. París.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA]. (2014). *Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales*. Lima.
- Rojas, K., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial. *Revista Facultad de Ingeniería*, 289-299.
- Ron, C., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Santafé: Colombia.
- Seoáñez Calvo, M., & Angulo Aguado, I. (1995). *Aguas residuales urbanas : tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Seoáñez Calvo, M., & Gutiérrez De Ojesto, A. (1999). *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo S.A.
- Solís Silvan, R., López Ocaña, G., Bautista Margulis, R. G., Hernández Barajas, J. R., & Romellon Cerino, M. J. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales

utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 40-47.

- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS]. (2015). *Diagnóstico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el ámbito de operación de las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento*. Lima, Perú.
- Torbisco Sáenz, M. R. (2017). Eficiencia de un humedal de flujo vertical sembrada con *Chrysopogon zizanioides* para el tratamiento del efluente de un reactor UASB. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- United States Environmental Protection Agency. (2000). *Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial*. Washington.
- Valles Aragón, M. C., & Alarcón Herrera, M. T. (2014). Retención de arsénico en humedales construidos con *Eleocharis macrostachya* y *Schoenoplectus americanus*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 143-148.
- Vinueza Estévez, J. S. (2014). Diseño de un sistema de pantanos artificiales para el tratamiento de aguas negras y grises del campo base y área de mantenimiento El Coca de la empresa TRIBOILGAS. Lima, Lima, Perú: Universidad Central del Ecuador.

ANEXOS

ANEXO N° 1: Equipos de laboratorio utilizados en la determinación de los parámetros

Figura 73
Conductímetro HACH S/N Sension 7



Fuente: Elaboración propia

Figura 72
Potenciómetro marca PEN TYPE PH METER



Fuente: Elaboración propia

Figura 75
Multiparámetro HACH



Fuente: Elaboración propia

Figura 74
Colorímetro DR/890 Colorimeter HACH



Fuente: Elaboración propia

Figura 77
Reactor digital HACH DRB200



Fuente: Elaboración propia

Figura 76
Balanza analítica BAMERSAC AS220/C/2



Fuente: Elaboración propia

Figura 78
Esterilizador al seco J. Ovens



Fuente: Elaboración propia

Figura 79
Espectrofotómetro HACH DR/2010



Fuente: Elaboración propia

Figura 80
Bomba de vacío GE Commercial Motors



Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 2: Determinación de la conductividad eléctrica, TDS, temperatura y pH

Figura 81

Determinación de la conductividad eléctrica de las muestras de agua residual



Fuente: Elaboración propia

Figura 82

Determinación de TDS de las muestras de agua residual



Fuente: Elaboración propia

Figura 83

Determinación de pH en las muestras de agua residual



Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 3: Análisis para la determinación de la DBO

Figura 84
Preparación de reactivos para la DBO



Fuente: Elaboración propia

Figura 85
Preparación del agua de dilución



Fuente: Elaboración propia

Figura 86
Adición de los reactivos R1 y R2 a la muestra



Fuente: Elaboración propia

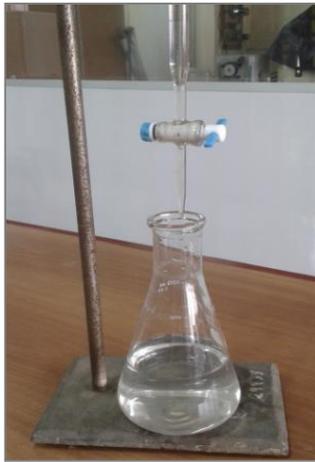
Figura 87
Adición de ácido sulfúrico a la muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura 88
Proceso de titulación de la muestra





Fuente: Elaboración propia

ANEXO N°4: Análisis para la determinación de la DQO

Figura 89

Adición de reactivos para determinación de la DQO



Fuente: Elaboración propia

Figura 90
Digestión de la muestra y lectura de la DQO



Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 5: Análisis para la determinación de Fosfatos

Figura 91
Preparación de Solución emético



Fuente: Elaboración propia

Figura 92
Preparación de Molibdato de amonio



Fuente: Elaboración propia

Figura 93
Preparación de Ácido ascórbico



Figura 94
Preparación de Ácido ascórbico



Fuente: Elaboración propia

Figura 95
Lectura de Fosfato en la muestra de agua residual antes del tratamiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 96
Lectura de Fosfato en las muestras después del tratamiento en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 6: Análisis para la determinación de Amonio

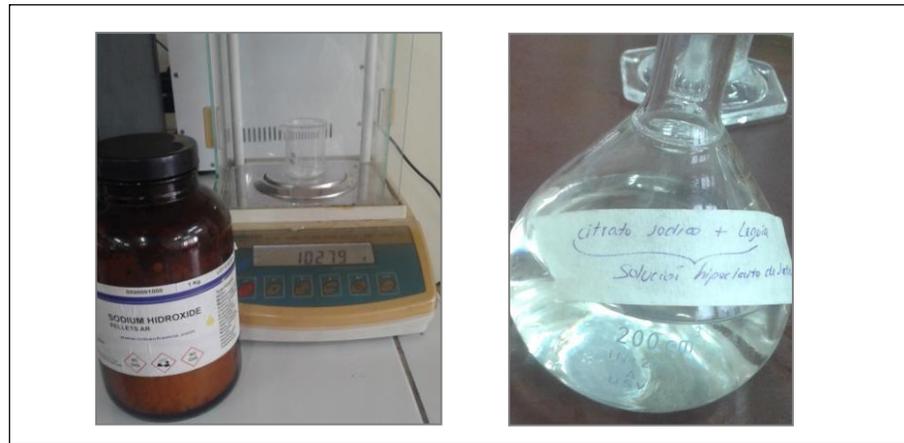
Figura 97

Preparación de solución fenol y nitroprusiato



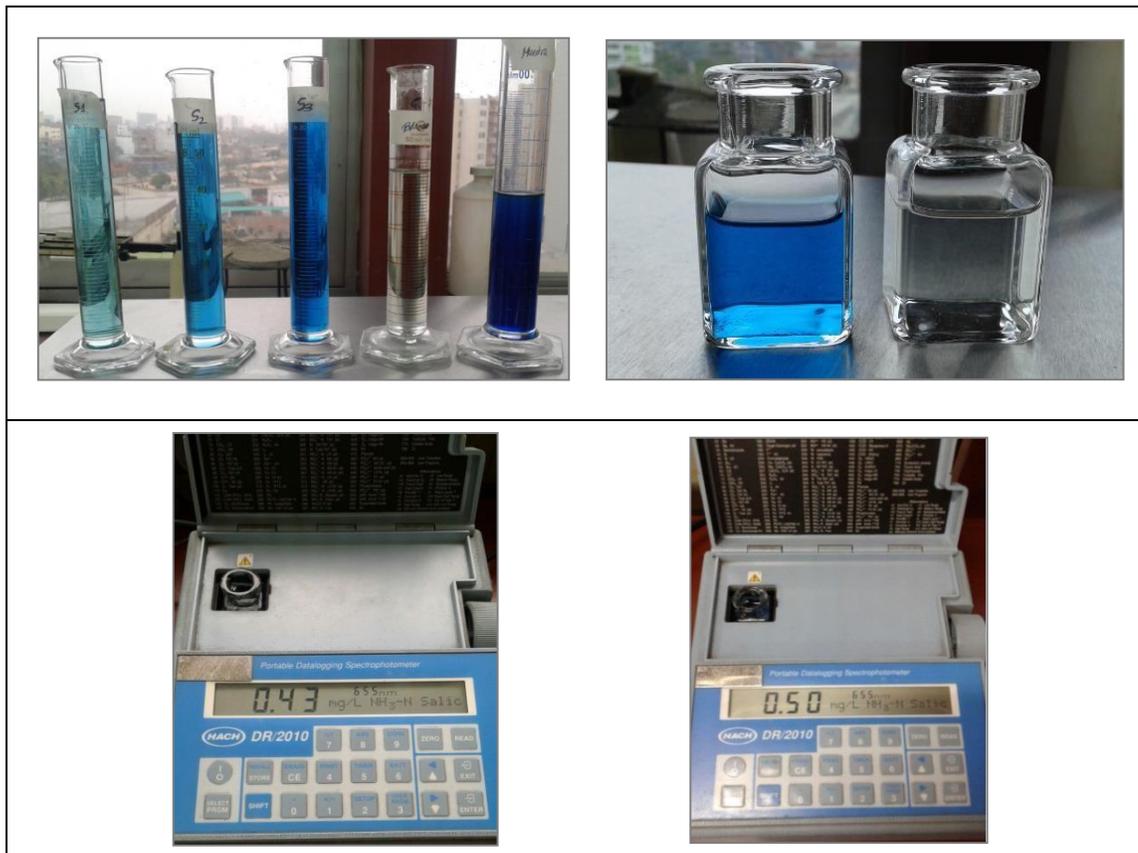
Fuente: Elaboración propia

Figura 98
Preparación de solución oxidante



Fuente: Elaboración propia

Figura 99
Lectura de Amonio en la muestra de agua residual antes del tratamiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 100
Lectura de Amonio en las muestras después del tratamiento en los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 7: Análisis para la determinación de Aceites y grasas

Figura 101

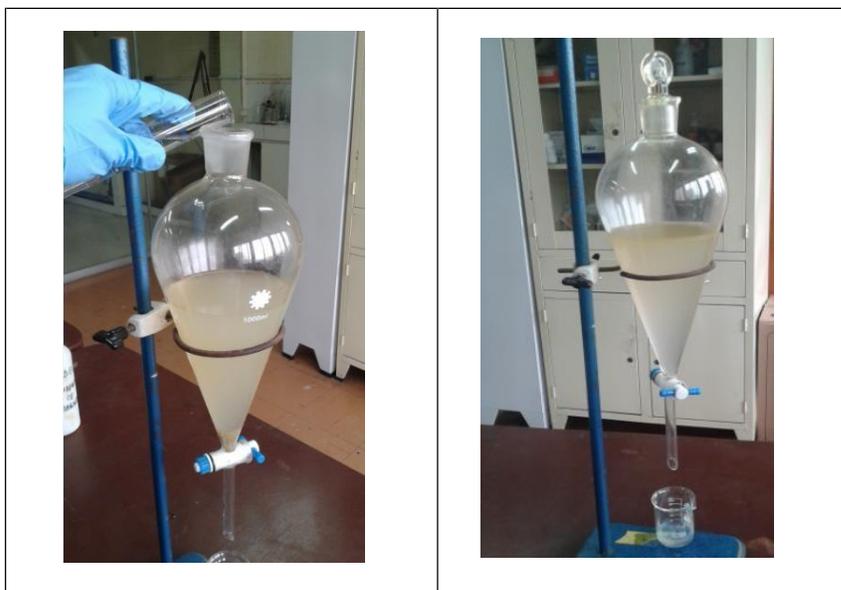
Preparación de la muestra y armado de pera de decantación



Fuente: Elaboración propia

Figura 102

Adición de Hexano, HCl y separación de fases



Fuente: Elaboración propia

Figura 103
Extracción de los aceites y grasas presentes en la muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura 104

Aceites y grasas obtenidos de la muestra secados en la estufa



Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 8: Análisis para la determinación de los Sólidos Suspendidos Totales

Figura 105

Pesaje del papel filtro seco y armado del sistema de bomba al vacío



Fuente: Elaboración propia

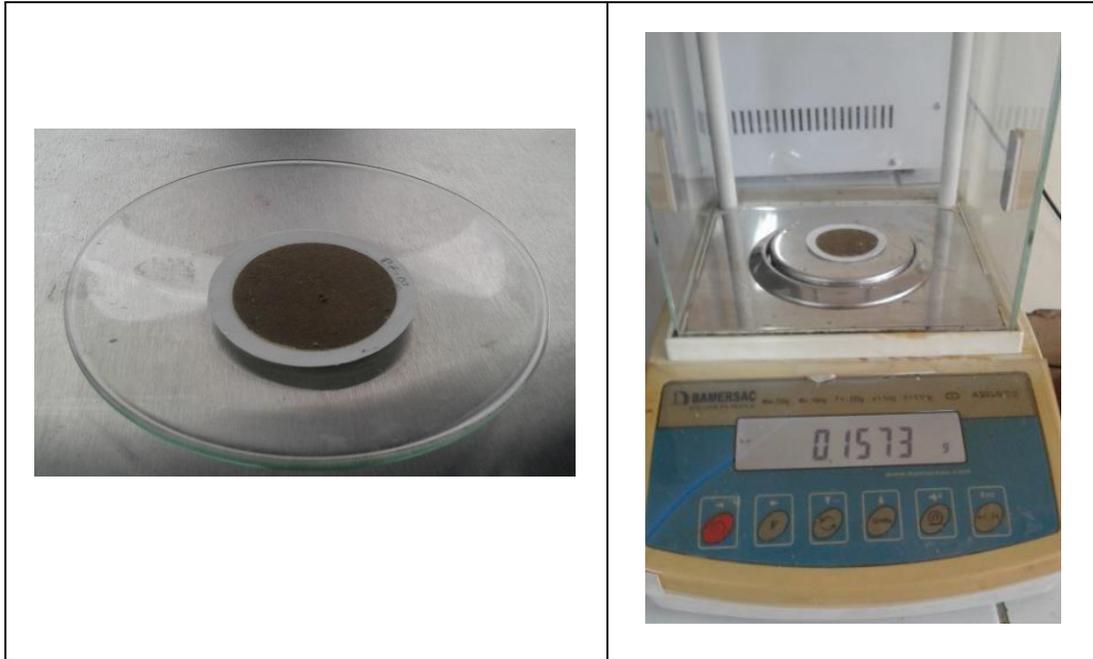
Figura 106

Paso de la muestra de agua por el sistema de bomba al vacío





Figura 107
Pesaje de los SST obtenidos de la muestra de agua antes del ingreso a los sistemas piloto



Fuente: Elaboración propia

Figura 108
Pesaje del papel filtro sin y con muestra de SST después del tratamiento



Fuente: Elaboración propia

**ANEXO N° 9: Desarrollo morfológico y mediciones de crecimiento de las especies
macrófitas empleadas**

Figura 109

*Medición de las raíces de la especie Phragmites australis antes del tratamiento e
instalación en el sistema*





Fuente: Elaboración propia

Figura 110
Medición de las raíces de la especie Phragmites australis (carricillo) después del tratamiento





Fuente: Elaboración propia

Figura 111
Mediciones de crecimiento de la especie Phragmites australis (carricillo) y desarrollo morfológico





Fuente: Elaboración propia

Figura 112
Medición de las raíces de la especie Typha domingensis (totora) antes del tratamiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 113
Mediciones de crecimiento de la especie Typha domingensis (totora) y desarrollo morfológico





Fuente: Elaboración propia

Figura 114
Medición de las raíces de la especie Typha domingensis (totora) después del tratamiento





Fuente: Elaboración propia

Figura 115

Medición de las raíces de la especie Schoenoplectus americanus (junco) antes del tratamiento y desarrollo morfológico



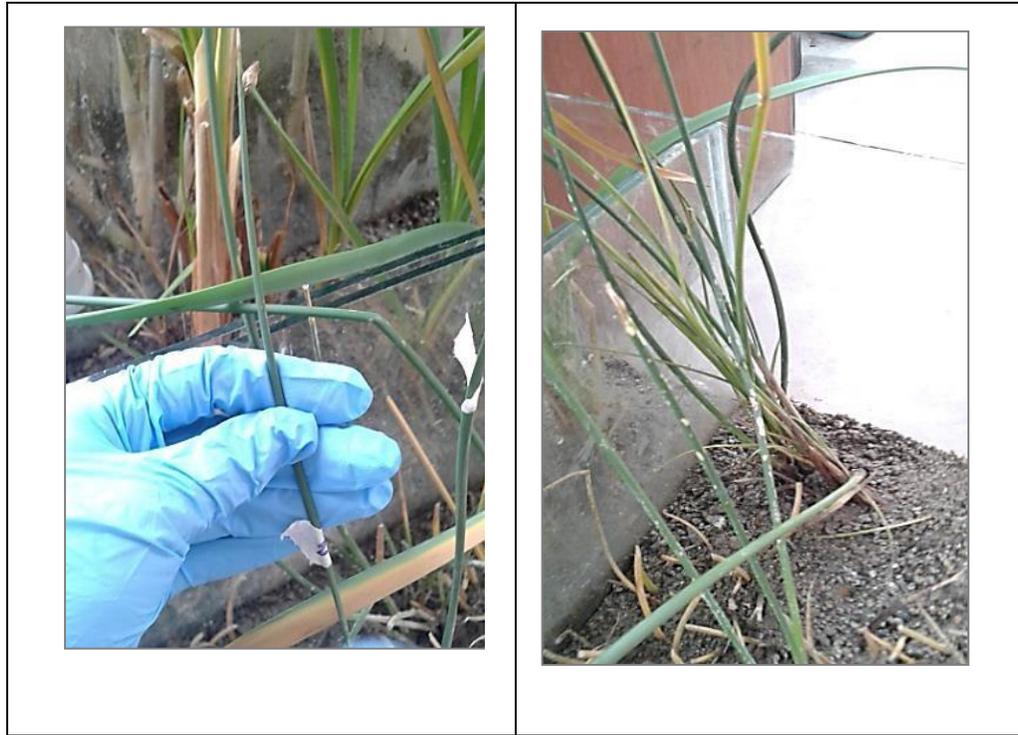
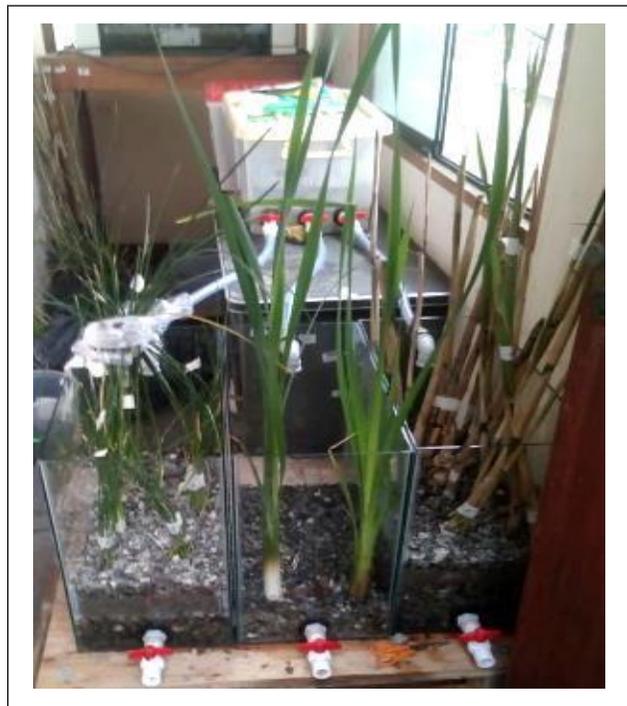


Figura 116 *Instalación de los sistemas de humedales artificiales*



Fuente: Elaboración propia

Figura 117
Vista general de los sistemas de humedales artificiales



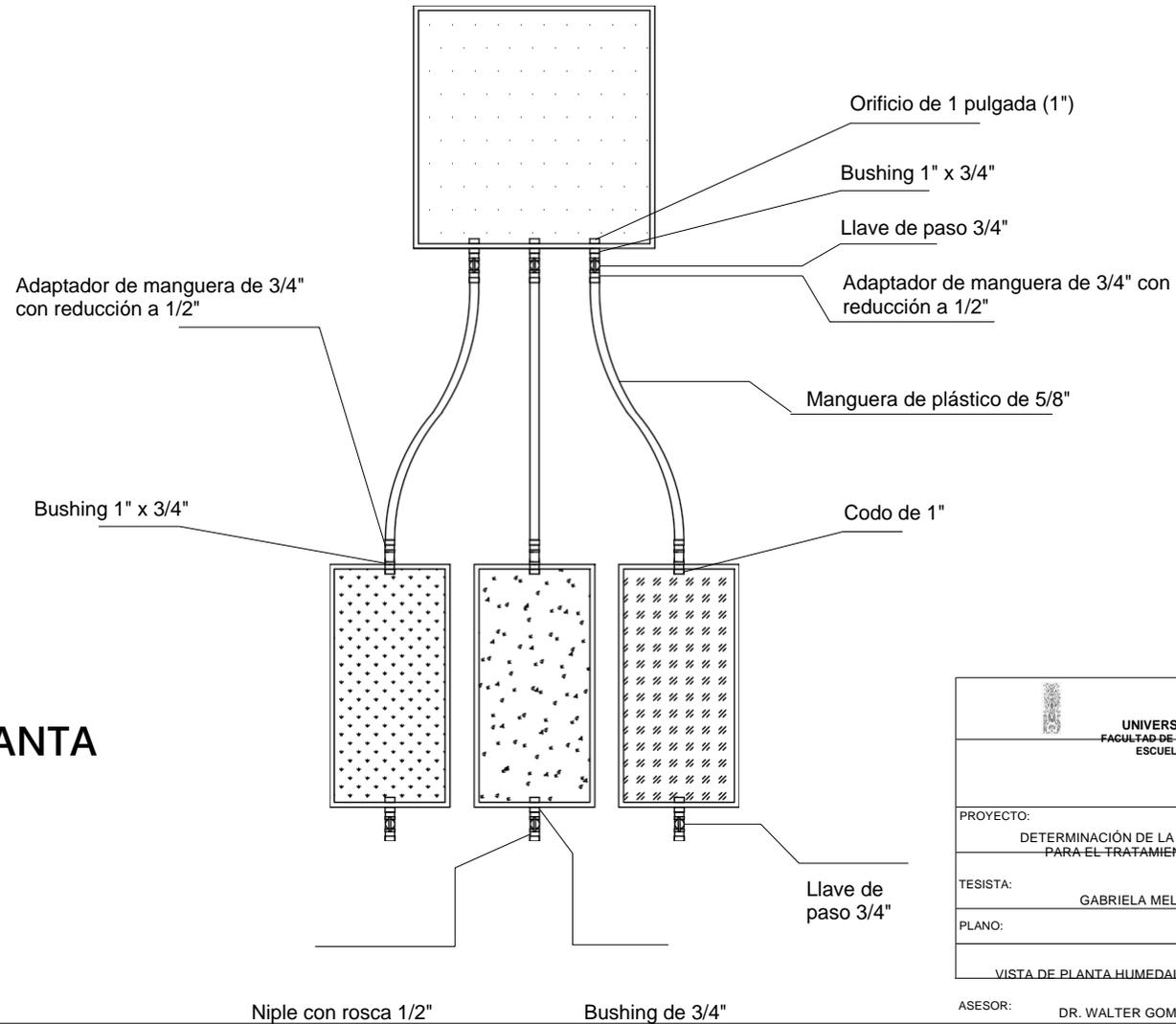
Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 10: Planos de los Humedales Artificiales



PLANTA HUMEDALES SUB SUPERFICIAL

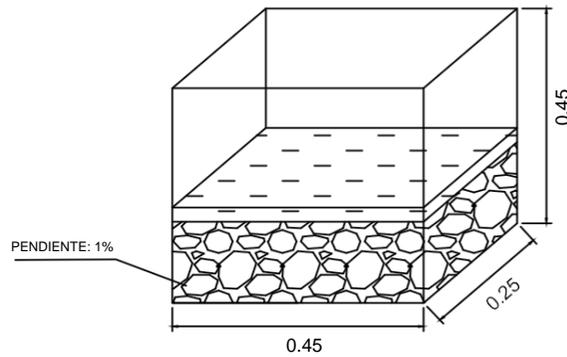
VISTA EN PLANTA



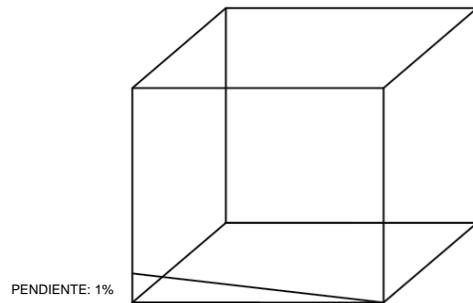
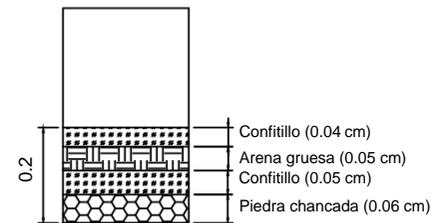
 UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA-AMBIENTAL Y ECOTURISMO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL	
PROYECTO: DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRES ESPECIES MACRÓFITAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	
TESISISTA: GABRIELA MELLADO DELGADO	PLANO: P-01
PLANO: VISTA DE PLANTA HUMEDALES SUB SUPERFICIAL	

ASESOR: DR. WALTER GOMEZ LORA

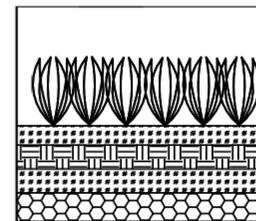
HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL



VISTA FRONTAL

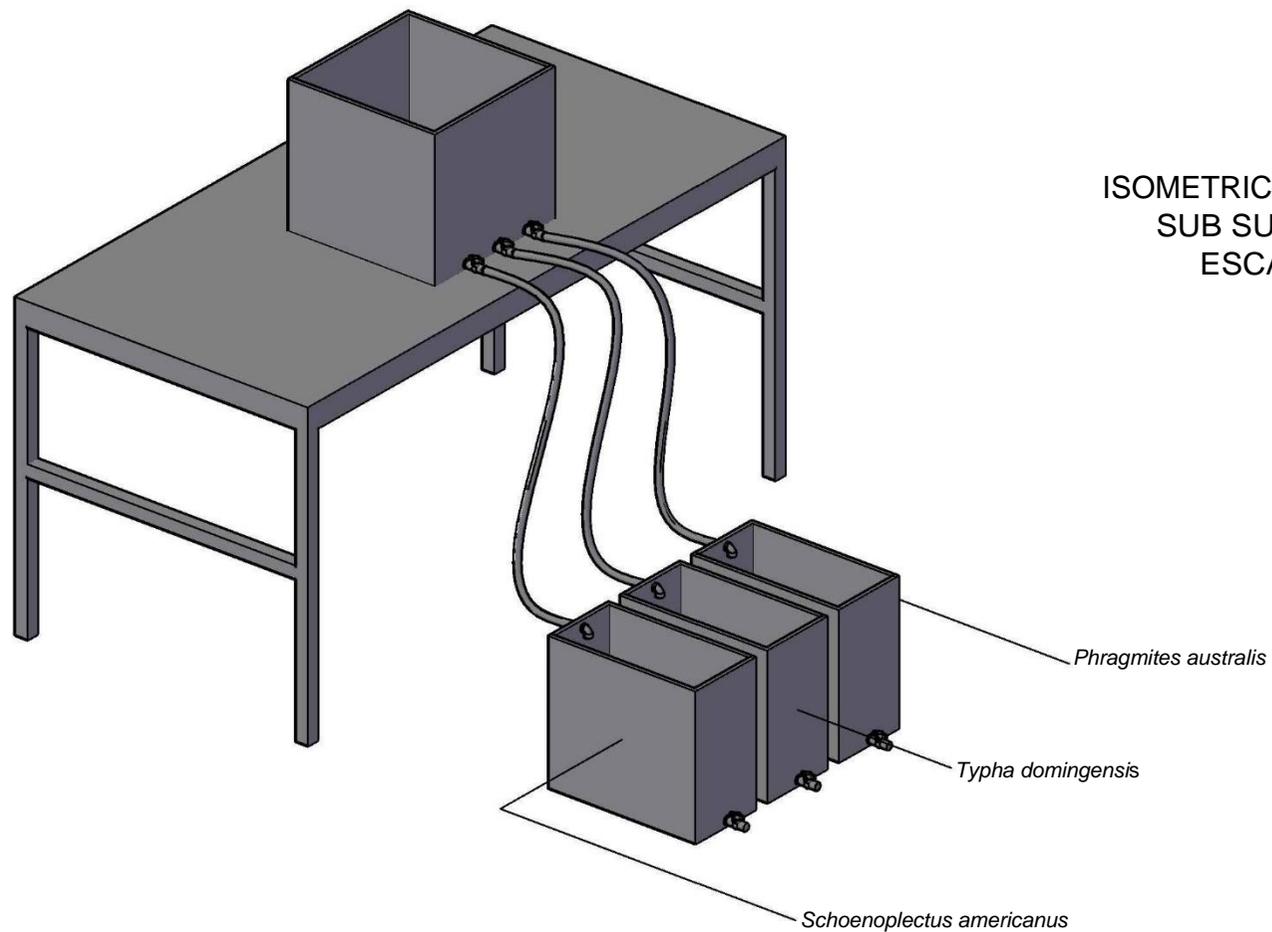


VISTA LATERAL



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL	
PROYECTO: DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRES ESPECIES MACRÓFITAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	
TESISISTA: GABRIELA MELLADO DELGADO	PLANO: P-02
PLANO: VISTA FRONTAL Y LATERAL HUMEDALES SUB SUPERFICIAL	
ASESOR: DR. WALTER GOMEZ LORA	
FECHA: 26 DE NOVIEMBRE DEL 2018	ESCALA: 1/15

HUMEDALES FLUJO SUPERFICIAL PLANTA Y CORTE



ISOMETRICO HUMEDALES
SUB SUPERFICIAL
ESCALA 1/15

		UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL	
PROYECTO:	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRES ESPECIES MACRÓFITAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS		
TESISISTE:	GABRIELA MELLADO DELGADO	PLANO:	P-03
PLANO:	HUMEDALES FLUJO SUPERFICIAL PLANTA Y CORTE		
ASESOR:	DR. WALTER GOMEZ LORA		
FECHA:	NOVIEMBRE DEL 2018	ESCALA:	1/15

