



**UNSAM**

UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

**3iA**

Instituto de Investigación  
e Ingeniería Ambiental

# Proyecto Final Integrado de Ingeniería Ambiental

“Diseño de un Humedal Construido a Escala  
Piloto para el tratamiento de las aguas  
contaminadas del Arroyo Morales”

**Autor:** Juan Pedro Sajoux

**Legajo:** CYT-7346



## Agradecimientos

El presente trabajo representa la culminación de un largo camino de esfuerzo y aprendizaje sumamente importante para mí. Son muchas las personas que formaron parte de este camino, en diferentes momentos y circunstancias, a las cuales quiero dejarles estas palabras para expresar mi más sentido agradecimiento:

A mi papa y mama, Luis y Marta, por su apoyo y acompañamiento infinito para que pueda estudiar desde tan lejos de mi pueblo natal. A mis hermanas, Luz, Ine, Sofi y Prisci por su cariño y acompañamiento.

A mis amigos de toda la vida; Luli, Lua, Julián y Manu, por su valiosa amistad y por enseñarme tanto.

A mis compañeros y sobre todo amigos que la universidad me regaló; Mariano, Facundo, Francisco y Pedro.

A mi Tutora, Vera Mignaqui, por proponerme un tema tan interesante para el Proyecto Final Integrador, y darme la oportunidad de llevarlo a cabo en el marco de una Beca Universitaria. Por su confianza, seguimiento y consejo durante todo el proyecto.

A los docentes de la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) y profesionales del Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental (3iA) quienes brindaron su tiempo para ayudarme y asesorarme en diferentes etapas de este proyecto, ellos son; Gabriela González Trilla, Gustavo Curutchet, Cynthia Corroto, Maximiliano Schwerdtfeger, Federico Bailat, Sofía Fantoni, Elsa López Loveira y Natalia Porcionato.

Finalmente quiero agradecer a la UNSAM, por haberme brindado tanto conocimiento y oportunidades como estudiante. Un lugar muy especial para mí, donde crecí mucho en lo académico y en lo humano.



## Resumen

El Arroyo Morales se ubica en el sector alto y medio de la Cuenca Matanza Riachuelo. Al ser uno de los principales cuerpos de agua lóticos de la región, recibe de forma intensiva la contaminación asociada al aporte de nutrientes y materia orgánica generado por actividades antrópicas como la agricultura, agroindustria y efluentes cloacales. Su bajo caudal, hace de este arroyo, un sistema con baja capacidad de autodepuración. Es por ello que a lo largo de su cauce presenta claros signos de eutrofización, presencia de agentes tóxicos y patógenos.

Actualmente la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) tiene interés de investigar sistemas de humedales construidos como posible tecnología de remediación de las aguas del A. Morales

Este Proyecto Final Integrador tuvo por objetivo el diseño de un Humedal Construido a Escala Piloto (HCEP) destinado a estudiar la capacidad de remoción de los contaminantes presentes en el A. Morales. La información recopilada será de fundamental importancia para un eventual diseño a escala real. Las etapas llevadas a cabo para lograr el diseño fueron:

- 1) Estudios preliminares para diagnosticar la problemática ambiental asociada a la contaminación del A. Morales. Para ello se analizó el contexto físico, social y económico para entender las causas de contaminación. Se analizó la calidad de agua del A. Morales y su variabilidad temporal y espacial a partir del análisis estadístico de valores históricos de siete estaciones de monitoreo a lo largo de su cauce.
- 2) Análisis de alternativas: Se analizaron y seleccionaron las mejores alternativas en cuanto a: ubicación, captación y elevación de caudal a tratar, pretratamiento, diseño hidráulico, tipo de humedal, vegetación y medio filtrante. Algunos de los análisis de estas alternativas se basaron en una metodología práctica a partir de experimentación en laboratorio.
- 3) Metodología práctica: Se realizó una campaña de toma de muestra del A. Morales en el lugar seleccionado para el proyecto, y una caracterización propia de parámetros de interés, a partir del uso de una sonda multiparamétrica y determinaciones analíticas en los laboratorios del 3iA-UNSAM. Se realizó una experimentación a escala de laboratorio usando sistemas batch, para determinar la tolerancia y adaptabilidad de la vegetación seleccionada en dos medios filtrantes. Se estudió la capacidad de remoción de Nitratos y Carbono Orgánico



Total de estos sistemas para determinar constantes cinéticas de remoción relevantes para el diseño.

- 4) Dimensionamiento: Se realizó a partir de los requerimientos hidráulicos del sistema y las eficiencias de remoción deseadas. Se consultaron las bases de datos y modelos de remoción de contaminantes en humedales construidos más actualizados y completos de la bibliografía disponible.

El HCEP se diseñó y dimensionó para remover contaminantes promotores de la eutrofización en porcentajes iguales o mayores a un 80% en el escenario estacional más desfavorable (invierno). Se ubicará en el “Parque temático Batalla de Villamayor”, ex basural de Marcos Paz. El sistema funcionará únicamente a partir de energías renovables desconectado de la red eléctrica. El caudal anual medio de agua de arroyo a ser tratado será de 20 m<sup>3</sup>/d. Este será captado y elevado por una bomba hidropulsada ubicada en el A. Morales. Contará con un pretratamiento basado en una cámara de sedimentación discreta. El tratamiento primario consta de un humedal de flujo subsuperficial el cual estará compuesto por dos camas de 0,3 y 0,6 m de profundidad con un área de 255 m<sup>2</sup> cada una. El medio filtrante será de escombros triturado de obras de construcción, conformado en su mayoría por ladrillo, siendo un material 100% reciclado y de bajo costo. La vegetación utilizada será un monocultivo autóctono y perenne de *Schoenoplectus californicus*. El sistema funcionará de forma continua los 365 días del año. La cotización de materiales, construcción y mano de obra representa una inversión inicial de US\$ 27.802 (veintisiete mil ochocientos dos dólares americanos). La cotización anual de tareas de operación, mantenimiento y monitoreo representa un monto de US\$ 7.088 (siete mil ochenta y ocho dólares americanos).



# Tabla de Contenidos

.....	0
Agradecimientos .....	1
Resumen .....	2
Índice de Tablas .....	8
Índice de Figuras .....	10
Tabla de Acrónimos.....	14
1. Introducción.....	15
1.1 Preliminar.....	15
1.2 Justificación del Proyecto .....	16
1.3 Objetivos del Proyecto.....	17
1.3.1 Objetivo General .....	17
1.3.2 Objetivos específicos: .....	17
2. Estudios Preliminares y Diagnóstico .....	18
2.1 Cuenca Matanza Riachuelo .....	18
2.2 Sub-cuenca Morales.....	22
2.2.1 Medio Físico.....	22
2.2.1.1 Localización.....	22
2.2.1.2 Clima .....	22
2.2.1.3 Recursos Hídricos Superficiales .....	23
2.2.2 Medio Socioeconómico.....	25
2.2.2.1 Población.....	25
2.2.2.2 Actividades Productivas .....	25
2.3 Diagnóstico de la Problemática Ambiental: Contaminación del Arroyo Morales	
.....	27
2.3.1 Estaciones de monitoreo .....	28
2.3.2 Contaminación antrópica .....	29
2.3.3 Normativa Vigente .....	32



2.3.4 Datos Históricos de calidad de agua del A. Morales .....	33
2.3.4.1 Materia Orgánica.....	34
2.3.4.2 Nutrientes .....	38
2.3.4.3 Hidrocarburos y Otros .....	41
2.3.4.4 Cumplimiento de Uso III .....	43
2.3.5 Diagnóstico y Conclusión.....	45
2.4 Humedales Naturales .....	46
2.5 Humedales Construidos .....	48
2.5.1 Clasificación.....	48
2.5.2 Vegetación .....	51
2.5.3 Sustrato.....	53
2.5.4 Microorganismos.....	53
2.5.5 Mecanismos de remoción de contaminantes.....	54
2.5.6 Eficiencias de remoción de humedales construidos .....	55
3. Análisis de Alternativas .....	57
3.1 Ubicación del HCEP .....	57
3.2 Captación y Bombeo del Agua de Arroyo .....	59
3.3 Pre-tratamiento.....	62
3.4 Selección del tipo de Humedal .....	63
3.4.1 Factores analizados.....	63
3.4.2 Resumen y Conclusión .....	67
3.5 Vegetación.....	69
3.6 Sustratos .....	72
3.7 Conclusiones .....	77
4. Metodología Practica.....	78
4.1 Resumen .....	78
4.2 Caracterización del agua del A <sup>0</sup> Morales .....	79
4.2.1 Selección de punto de muestreo. ....	79



4.2.2 Selección de parámetros de contaminación a estudiar .....	79
4.2.3 Toma de Muestras de A. Morales.....	80
4.2.4 Resultados y discusión de la caracterización de las aguas del A. Morales. .....	81
4.3 Experimentación a escala de laboratorio .....	82
4.3.1 Extracción de <i>S. californicus</i> (Junco) de medio natural. ....	83
4.3.2 Adaptación de <i>S. californicus</i> a nuevos sustratos .....	84
4.3.3 Bioaumentación de Biofilm .....	86
4.3.4 Evaluación de sustratos seleccionados como medio soporte de biofilm.	88
4.3.5 Experimentación en configuración Batch para la obtención de parámetros de diseño de un sistema continuo .....	89
4.3.5.1 Configuración experimental Batch .....	89
4.3.5.2 Selección de parámetros de contaminación a estudiar y realización de Solución Simuladora .....	90
4.3.5.3 Esquema y metodología de experimentación .....	90
4.3.6 Resultados y Conclusiones.....	94
4.3.6.1 Tolerancia y Adaptación de <i>S. californicus</i> a escombros y leca como sustratos .....	94
4.3.6.2 Remoción de Nitratos y Materia Orgánica .....	97
5. Memoria Descriptiva.....	101
5.1 Localización.....	101
5.2 Captación y elevación del agua de Arroyo .....	102
5.3 Pretratamiento .....	103
5.4.1 Objetivos .....	105
5.4.2 Etapas, Componentes y diseño .....	105
5.4.3 Hidráulica .....	111
5.4.4 Mecanismos de remoción .....	113
5.4.4.1 Materia Orgánica.....	113
5.4.4.2 Nitrógeno.....	115



5.4.4.3 Fósforo .....	118
5.4.5 Eficiencia de Remoción esperables .....	119
5.5 Operación y Mantenimiento (O&M) .....	125
6. Dimensionamiento y Memoria de Cálculo .....	133
6.1 Pre-tratamiento.....	133
6.2 Tratamiento Primario .....	137
6.2.1 Dimensionamiento y Cinética de Remoción .....	137
6.2.2 Metodología de cálculo, simulación y resultados.....	141
6.2.3 Diseño Hidráulico.....	146
7. Análisis Económico .....	152
7.1 Inversión Inicial.....	153
7.2 O&M .....	157
7.3 Propuestas de Financiamiento .....	157
8. Evaluación de Impacto Ambiental .....	161
9. Planos.....	165
Conclusiones Finales.....	166
Conclusiones del Proyecto .....	166
Conclusiones Personales .....	167
Bibliografía.....	168
Anexo I: Especificaciones técnicas de Equipos y Materiales .....	172
Anexo II: Planos.....	178



## Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1:</b> Cobertura y uso de suelo en la CMR (Faggi, 2015).....	19
<b>Tabla 2.2:</b> Características generales del ambiente en cada cuenca (tomado de Faggi, 2015).....	20
<b>Tabla 2.3:</b> Establecimientos de seguimiento particular en la sub-cuenca Morales.....	26
<b>Tabla 2.4:</b> Coordenadas, nombre y código de las estaciones estudiadas para el diagnóstico.....	28
<b>Tabla 2.5:</b> Límites de parámetros admisibles para Uso III.....	33
<b>Tabla 2.6:</b> Determinación de biodegradabilidad de la MO.....	36
<b>Tabla 2.7:</b> Clasificación de condiciones tróficas en cuerpos de agua. NT= Nitrógeno total, PT=Fósforo total, (OECD, 1982). ....	38
<b>Tabla 2.8:</b> Funciones ecosistémico de los humedales y ejemplos de bienes y servicios asociados (tomado de Kandus et al., 2010) .....	47
<b>Tabla 2.9:</b> Contaminantes más frecuentes y mecanismos de remoción.....	55
<b>Tabla 2.10:</b> Eficiencia de remoción para distintos efluentes. El número “n” indica el número de anual de mediciones y entre paréntesis el número de sistemas analizados. Tomado de Vymazal & Kröpfelová (2008).....	56
<b>Tabla 3.1:</b> Número de humedales y constantes utilizadas para el modelo de primer orden P-k-C* .....	65
<b>Tabla 3.2:</b> Variables analizadas como factor de selección para el sistema de humedal construido.....	67
<b>Tabla 3.3:</b> Diferente materiales, granulometrías y conductividades para medios filtrantes. Tomado de USEPA (2000) .....	73
<b>Tabla 4.1:</b> Parámetros seleccionados para la caracterización de agua de Arroyo. ....	80
<b>Tabla 4.2 :</b> Resultados de la medición de parámetros para la caracterización del agua del A. Morales.....	81
<b>Tabla 4.3:</b> Contenedores utilizados en la experimentación batch.....	91
<b>Tabla 4.4:</b> Porcentajes de muertes y nacimientos para los grupos experimentales: con escombro (E) y leca (L) (triplicados) , y los duplicados de sus respectivos controles (CE, CL) y control natural (CN) (duplicados). ....	96
<b>Tabla 4.5:</b> Concentración de N-NO <sub>3</sub> - y COT de los 10 grupos experimentales. ....	97
<b>Tabla 5.1:</b> Dimensiones de Cama 1.....	107
<b>Tabla 5.2:</b> Dimensiones de cama 2.....	110
<b>Tabla 5.3:</b> Variables hidráulicas del sistema en serie de HFSS 1 y 2.....	113



<b>Tabla 5.4:</b> Resultados de la simulación de tratamiento en tres escenarios a partir del modelo P-k-C* . . . . .	120
<b>Tabla 5.5:</b> Periodo y tipo de tareas para la correcta O&M el sistema. . . . .	132
<b>Tabla 6.1:</b> Variables utilizadas para el dimensionamiento de la cámara de sedimentación: Datos y Resultados. . . . .	135
<b>Tabla 6.2:</b> Variables de entrada asociadas a la cinética de remoción para el modelo P-k-C* . . . . .	142
<b>Tabla 6.3:</b> Variables de entrada y salida para el proceso iterativos de dimensionamiento del sistema de tratamiento conformado por Cama 1 (C1) y Cama 2 (C2), utilizando el modelo P-k-C* . . . . .	144
<b>Tabla 6.4:</b> Evolución del valor de los parámetros a lo largo de los ocho tanques teóricos del sistema en serie. . . . .	144
<b>Tabla 6.5:</b> Resultados de la simulación de tratamiento de aguas del A. Morales en diferentes escenarios. . . . .	145
<b>Tabla 6.6:</b> Resultados de la simulación de tratamiento con el área final de diseño del HCEP A=510 m2 en los diferentes escenarios. . . . .	145
<b>Tabla 6.7:</b> Eficiencia de remoción en función del área superficial del humedal. . . . .	146
<b>Tabla 6.8:</b> Eficiencia de remoción en función del caudal de operación. . . . .	146
<b>Tabla 6.9:</b> Valores de variables utilizadas en el balance hídrico. . . . .	149
<b>Tabla 7.1:</b> Computo y presupuesto para la Inversión Inicial del HCEP. . . . .	154
<b>Tabla 7.2:</b> Computo y presupuesto para la Operación y Mantenimiento del HCEP. . . . .	159
<b>Tabla 9.1:</b> Descripción de planos y unidades del proyecto. . . . .	165



## Índice de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Ubicación geográfica del CMR. ....	18
<b>Figura 2.2:</b> Subdivisión de cuenca alta, media y baja. ....	19
<b>Figura 2.3:</b> Sub-cuenca Morales.....	22
<b>Figura 2.4:</b> Estaciones de monitoreo de ACUMAR sobre el A. Morales y tributarios..	24
<b>Figura 2.5:</b> Mediana del caudal de A. Morales en sus estaciones de monitoreo. ....	25
<b>Figura 2.6:</b> Agentes contaminantes, establecimientos críticos, villas y asentamientos precarios en las sub-cuenca Morales. ....	27
<b>Figura 2.7:</b> Estaciones de monitoreo sobre el A. Morales. ....	29
<b>Figura 2.8:</b> Valores historicos COT.....	35
<b>Figura 2.9:</b> Valores historicos de DQO .....	35
<b>Figura 2.10:</b> Valores historicos de DBO5 .....	36
<b>Figura 2.11:</b> Mediana estadística de DQO, DBO5, COT.: .....	36
<b>Figura 2.12:</b> Valores historicos de Coliforme Fecales. ....	37
<b>Figura 2.13:</b> Valores historicos OD.....	37
<b>Figura 2.14:</b> Valores históricos de Sulfuros. ....	38
<b>Figura 2.15:</b> Valores históricos de Nitrógeno Total.....	39
<b>Figura 2.16:</b> Valores históricos Fosforo Total. ....	39
<b>Figura 2.17:</b> Valores históricos de N-NH3 .....	40
<b>Figura 2.18:</b> Valores históricos de N-NO3 .....	40
<b>Figura 2.19:</b> Valores historicos de N-NO2. ....	41
<b>Figura 2.20:</b> Valores históricos de Hidrocarburos Totales.....	41
<b>Figura 2.21:</b> Valores históricos de Sustancias Fenólicas. ....	42
<b>Figura 2.22:</b> Valores históricos de Detergentes S.A.A.M. ....	42
<b>Figura 2.23:</b> Valores históricos de DQO, DBO5, COT.....	42
<b>Figura 2.24:</b> Valores históricos de DQO, DBO5, COT.....	43
<b>Figura 2.25:</b> Porcentaje de Incumplimiento de límites de parámetros de calidad de agua establecidos por el Uso III. ....	44
<b>Figura 2.26:</b> Tipos de Humedales construidos en función del tipo de flujo (adaptado de Kadlec & Wallace, 2009). ....	49
<b>Figura 2.27:</b> Elementos básicos de un humedal FWS (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009).....	49
<b>Figura 2.28:</b> Humedal HSSF (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009).....	50
<b>Figura 2.29:</b> Humedal de Flujo Vertical (FV). ....	51

<b>Figura 2.30:</b> Esquema del tipo de macrófitas: A) Schoeno plectus, B) Phragmites australis, C) Typha latifolia, D) Potamogeton crispus, E) Littorella uniflora, F) Nymphaea alba, G) Potamogeton gramineus, H) Hydrocotyle vulgaris, I) Eichhornia crassipes, J) Lemna mino. Tomado de Kadlec (2009) .....	52
<b>Figura 3.1:</b> Estación de Monitoreo ARROMORA- 8. ....	58
<b>Figura 3.2:</b> Estación de Monitoreo ArroMora1- 37.....	59
<b>Figura 3.3:</b> Bomba centrífuga Enertik, modelo BSQB-47-500-48V. ....	60
<b>Figura 3.4:</b> Bomba Hidropropulsada Barsha. ....	61
<b>Figura 3.5:</b> Variación en la concentración de SST en la estación ArroMora1- 37. El valor de referencia de SST de un efluente cloacal típico. ....	62
<b>Figura 3.6:</b> Distribución de tamaño (ha) para los humedales FWS (N=330) y HSSF (N=710). (tomado de Kadlec, 2009). ....	64
<b>Figura 3.7:</b> Distribución de TCH (cm/d) para los humedales FWS (N=330) y HSSF (N=710). Tomado de Kadlec,(2009). ....	64
<b>Figura 3.8:</b> Typha domingensis (Totora) tomado de Encyclopedia of Life (2019). ....	70
<b>Figura 3.9:</b> Schoenoplectus californicus (Junco). Tomado de Encyclopedia of Life (2019). ....	71
<b>Figura 3.10:</b> Zonas de conductividad hidráulica dentro de un humedal construido HSSF propuesto por la EPA (2000). ....	73
<b>Figura 3.11:</b> Escombros de construcción y demolición. Tomado de Diagne (2018). ..	75
<b>Figura 3.12:</b> Diferente granulometrías de la Leca Plástica. ....	76
<b>Figura 4.1:</b> Toma de muestra de agua de A <sup>0</sup> Morales para medición ex-situ (izq.) y medición in-situ con sonda multiparamétrica (der.) (Foto: Lucila Sandri).....	81
<b>Figura 4.2:</b> Conjunto de Schoenoplectus californicus, conformando pajonales en las costas del Río de la Plata, Buenos Aires.....	83
<b>Figura 4.3:</b> Extracción de Schoenoplectus californicus de Junqueras para posterior experimentación. ....	84
<b>Figura 4.4:</b> Sistema radicular de Juncos después de ser lavados, listos para implantación en nuevos sustratos. ....	84
<b>Figura 4.5:</b> Sustratos utilizados para la experimentación batch: Lecas plásticas (izq.) y escombros de obra (der.) .....	85
<b>Figura 4.6:</b> Juncos en los nuevos sustratos (izq.) y triplicados + controles en aclimatación para futuras experimentaciones batch (der.).....	86
<b>Figura 4.7:</b> Cultivo compuesto de medio LB y sedimento del A. Morales como inóculo bacteriano, en el momento de la inoculación (izq.) y después de dos días en agitación (der.).....	87



Figura 4.8: Experimentación con escombros y leca plástica como medio soporte de biofilm. ....	88
<b>Figura 4.9:</b> Esquema de experimentación batch: Contenedores con Juncos + sustratos y solo sustratos. ....	91
<b>Figura 4.10:</b> Sistemas batch para experimentación y controles ....	92
<b>Figura 4.11:</b> Extracción de muestras de sistemas batch en planta piloto de 3iA (Foto: Diego Rodríguez).....	93
<b>Figura 4.12:</b> Aforo para el control de volumen de agua y extracción de muestras con pipeta. ....	94
<b>Figura 4.13:</b> Estado de los Juncos a lo largo de Experimentación.....	95
<b>Figura 4.14:</b> Concentración de Nitratos a lo largo del tiempo.....	98
<b>Figura 4.15:</b> Concentración de COT a lo largo del tiempo. ....	99
<b>Figura 5.1:</b> Localización de humedal construido a escala piloto. ....	101
<b>Figura 5.2:</b> Bomba hidráulica “Barsha” construida por aQysta. ....	102
<b>Figura 5.3:</b> Componentes de la bomba Barsha. ....	103
<b>Figura 5.4:</b> Cámara de sedimentación discreta. Tomado de Ramalho (1996). ....	104
<b>Figura 5.5:</b> Esquema de tratamiento para las aguas del A. Morales.....	106
<b>Figura 5.6:</b> Sistema de distribución homogénea de caudal. Tomado de Kadlec (2009) .....	106
<b>Figura 5.7:</b> Humedal de Flujo sub-superficial con estructuras de distribución, colección y nivelación de agua. Tomado de Kadlec (2009) .....	108
<b>Figura 5.8:</b> Disposición de geomembrana. Tomado de Kadlec (2009) .....	109
<b>Figura 5.9:</b> Cámara de nivelación de altura de agua (Tomado de Vymazal, 2008 y Kadlec, 2009).....	110
<b>Figura 5.10:</b> Esquema del balance hídrico del HCEP: Caudal de ingreso ( $Q_i$ ), Caudal de salida ( $Q_s$ ) Precipitaciones ( $P$ ), Evapotranspiración ( $ET$ ), velocidad de flujo ( $u$ ), área ( $A$ ), longitud ( $L$ ), pendientes ( $S$ ) y altura de nivel de agua ( $h(x)$ ). Tomado de Kadlec (2009). ....	112
<b>Figura 5.11:</b> Micro-región aeróbica alrededor generada por el sistema radicular de la planta dentro un entorno anaeróbico.....	116
<b>Figura 5.12:</b> Eficiencias de remoción del HCEP en condiciones de invierno, verano y críticas estimadas a partir del Modelo P-k-C* .....	121
<b>Figura 5.13:</b> Concentraciones de TP y TN de las diferentes condiciones tróficas en un cuerpo de agua y Concentración inicial y final de dichos contaminantes tratados mediante el HCEP. ....	123



<b>Figura 5.14:</b> Eficiencia de remoción (E%) vs Área de HCEP (m <sup>2</sup> ) en escenario de invierno. ....	124
<b>Figura 5.15:</b> Eficiencia de remoción (E%) vs caudal de operación (Qs) en escenario de invierno. ....	125
<b>Figura 5.16:</b> Respuesta del nivel de agua en un humedal con y sin clogging. Adaptado de Wallace (2006).....	127
<b>Figura 5.17:</b> Correcto nivel de agua para la irrigación y buen desarrollo de la vegetación. ....	129
<b>Figura 5.18:</b> Sub-conjunto de Juncos con rizoma en común utilizado en la etapa experimental. ....	130
<b>Figura 5.19:</b> Proceso de plantación de vegetación en el medio filtrante. ....	130
<b>Figura 6.1:</b> Zona de sedimentación de largo (L), ancho (W), altura (H), área superficial (A) y área de sección vertical (A')......	134
<b>Figura 6.2:</b> Relación entre velocidad de sedimentación y diámetro de partícula .Tomado de Ramalho (1996) .....	134
<b>Figura 6.3:</b> Vertedero en forma de “V”. .....	136
<b>Figura 6.4:</b> Modelización de tanques es serie para modelo P-k-C*. Tomado de Kadlec (2009). ....	138
<b>Figura 6.5:</b> La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diaria con las bandas de los percentiles 25 <sup>o</sup> a 75 <sup>o</sup> , y 10 <sup>o</sup> a 90 <sup>o</sup> . Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes... ..	142
<b>Figura 6.6:</b> La lluvia promedio (línea sólida) acumulada en un periodo móvil de 31 días, con las bandas de percentiles del 25 <sup>o</sup> al 75 <sup>o</sup> y del 10 <sup>o</sup> al 90 <sup>o</sup> . .....	149
<b>Figura 6.7:</b> Balance hídrico.....	150
<b>Figura 7.1:</b> Porcentaje de gasto de los distintos rubros para la inversión inicial. ....	156
<b>Figura 7.2:</b> Porcentaje de gasto de los distintos rubros para la inversión inicial. ....	160



## Tabla de Acrónimos

<b>ACUMAR</b>	Autoridad de la cuenca Matanza Riachuelo
<b>APHA</b>	American Public Health Association
<b>BDH</b>	Base de Datos Hídricos
<b>CMR</b>	Cuenca Matanza Riachuelo
<b>CONICET</b>	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda Biológica de Oxígeno
<b>FWS</b>	Free Water Surface
<b>HC</b>	Humedal Construido
<b>HCEP</b>	Humedal Construido a Escala Piloto
<b>HLR</b>	Hydraulic Loading Rate
<b>HSSF</b>	Horizontal Subsurface Flow
<b>MO</b>	Materia Orgánica
<b>MOD</b>	Materia Orgánica Disuelta
<b>MR</b>	Matanza Riachuelo
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amoníaco
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	Amonio
<b>N<sub>org</sub></b>	Nitrógeno Orgánico
<b>NO<sub>3</sub></b>	Nitrato
<b>OD</b>	Oxígeno Disuelto
<b>O&amp;M</b>	Operación y Mantenimiento
<b>PISA</b>	Plan Integral de Saneamiento Ambiental
<b>PMI</b>	Plan Integral de Saneamiento
<b>TP</b>	Fósforo Total
<b>VF</b>	Vertical Flow
<b>3iA</b>	Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental



# 1. Introducción

## 1.1 Preliminar

Desde principios del siglo XX, la Cuenca Matanza Riachuelo (CMR) ha tenido un acelerado crecimiento poblacional, al igual que una continua expansión de actividad productivas como la agricultura, ganadería y producción industrial.

Las precarias o nulas políticas ambientales de control y saneamiento, hizo de la CMR uno de los escenarios de contaminación más complejos y alarmantes de la Argentina en el último siglo. Esto se ha manifestado en el constante deterioro de la matriz suelo, aire y agua y en el perjuicio a la biota y salud humana dentro de la cuenca.

En este escenario, los cuerpos de agua lénticos y lóticos, son sensiblemente afectados por una combinación factores: Reciben de forma directa e indirecta la contaminación antropogénica a través del vertido de efluentes industriales y cloacales (con o sin tratamiento previo y muchas veces de forma clandestina); aportes por la escorrentía de aguas de lluvia, las cuales drenan hacia las zonas más bajas arrastrando consigo contaminantes presentes en el suelo como fertilizantes y plaguicidas utilizados por la agroindustria, hidrocarburos, metales, entre otros; muchas de las características naturales de los cuerpos de agua superficiales de la cuenca, como su cauce, caudal, ribera y vegetación fueron modificadas a partir de rectificaciones, canalizaciones y entubamiento. En estas condiciones los ríos y Arroyos pierden en gran medida su capacidad de autodepuración, convirtiéndose en cursos de agua eutrofizados con elevada concentración de agentes tóxicos y patógenos.

La falta de ordenamiento territorial dentro de la cuenca ha provocado el asentamiento de un importante sector de la población en villas de emergencia sobre las riberas, siendo estas las afectadas por el contacto directo con las aguas y suelo contaminado.

Ante esta compleja situación socio-ambiental, se creó en el 2006, la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR), ente autónomo, autárquico e interjurisdiccional con las facultades de gestión, control y ejecución de planes de saneamiento cuyos objetivos apuntaran a mejorar la calidad de vida de los habitantes de la cuenca y recuperar el ambiente en todos sus componentes (agua, aire y tierra).



## 1.2 Justificación del Proyecto

Actualmente ACUMAR tiene interés de investigar sistemas de Humedales Construidos (HC) como tecnología de remediación de las aguas del Arroyo Morales ubicado en el sector medio de la CMR. Al ser uno de los principales cuerpos de agua lóticos de la región, recibe de forma intensiva la contaminación antrópica asociada principalmente a la agro-industria y efluentes cloacales. El bajo caudal del A. Morales y sus tributarios hace que sus capacidades de autodepuración se vean sobrepasadas haciendo que este sistema se encuentre en un estado eutrófico y contaminado.

A diferencia de los Humedales Naturales (pantanos, ciénagas, mallines, marismas etc.), los cuales forman parte del medio natural debiendo ser conservado y protegidos por su importancia ecosistémica, los HC son obras de ingeniería destinadas al tratamiento de aguas residuales a partir de procesos naturales de depuración.

Desde hace aproximadamente cuarenta años, estos sistemas se están aplicando de forma creciente en todo el mundo, para tratar aguas residuales de diferentes tipos, entre ellas las aguas residuales domésticas, industriales, drenajes ácidos de minas, desechos agrícolas y ganaderos, lixiviados de rellenos sanitarios, así como también la degradación de compuestos orgánicos persistentes. (Alarcón, Zurita, Lara, & Vidal, 2018). Los bajos costos de inversión, Operación y Mantenimiento (O&M) con eficiencias de tratamiento comparables a sistemas de tratamientos mucho más costosos, hacen de los HC sistemas cada vez más atractivos. Sin embargo, existe una variedad muy amplia de metodologías de diseño y dimensionamiento, lo que puede representar una dificultad y/o incorrecta selección en las metodologías adoptadas, dando como resultado HC sub o sobre dimensionados, con fallas hidráulicas y eficiencias de tratamiento por debajo de lo esperado.

Un enfoque estratégico para el diseño de HC en condiciones y lugares puntuales comienza por caracterizar el agua residual a tratar. Esto incluye tanto la medición de parámetros de calidad de agua, como la determinación de la cantidad a partir de balances hídricos. Este paso es seguido o acompañado por la identificación y selección de objetivos de tratamiento que se quiere alcanzar. Luego, se seleccionan las variables teóricas de diseño específicas para generar las condiciones físicas, químicas y biológicas que promuevan los procesos de remoción deseados. El próximo paso es el diseño y puesta en marcha del HC a una escala piloto para obtener información del rendimiento real de tratamiento y la funcionalidad hidráulica del sistema. Finalmente, en



base a la información recopilada, es posible dimensionar el sistema a escala real. (Rodgers & Castle, 2008).

## **1.3 Objetivos del Proyecto**

### **1.3.1 Objetivo General**

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar un Humedal Construido a Escala Piloto (HCEP) destinado al estudio y evaluación del tratamiento de las aguas contaminadas del A. Morales a partir de esta tecnología.

### **1.3.2 Objetivos específicos:**

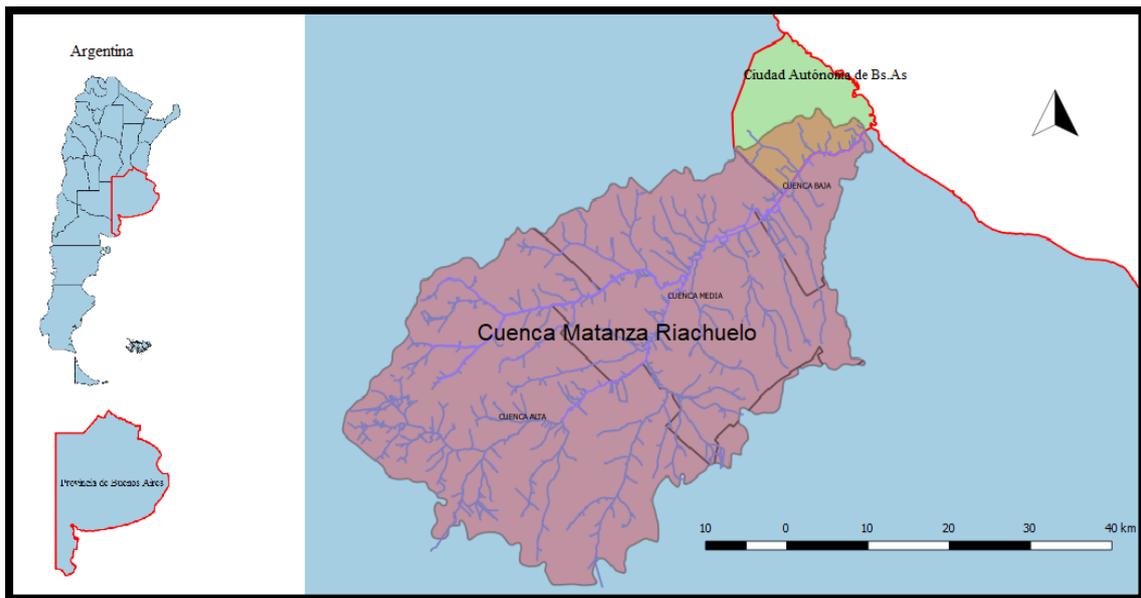
- a) Toma de muestra y caracterización in-situ y ex-situ del agua del A. Morales.
- b) Experimentación a escala de laboratorio con sistemas batch con el fin de obtener información de relevancia para el diseño de un sistema continuo.
- c) Diseño de un sistema que funcione únicamente a partir de energías renovables desconectada de la red eléctrica.
- d) Utilización de vegetación autóctona y materiales locales accesibles
- e) Aplicación de un modelo matemático a partir del cual pueda dimensionarse el HCEP en base a los objetivos de tratamiento propuestos, así como también, simular en diferentes escenarios de tratamiento, la remoción y transformación de contaminantes para el dimensionamiento de eventuales sistemas de humedales construidos a escala real, basándose en la información recopilada del tratamiento en el HCEP.

## 2. Estudios Preliminares y Diagnóstico

En esta sección se analiza la información relacionada a variables espaciales, sociales y ambientales para poder generar un diagnóstico fundamentado de la problemática asociada a la contaminación de cuerpos de agua superficiales en la CMR, particularmente en el A. Morales. De esta forma se podrá evaluar si un sistema de HC representa una tecnología de tratamiento adecuada para este contexto.

### 2.1 Cuenca Matanza Riachuelo

La cuenca Matanza-Riachuelo CMR se ubica al Este de Argentina y al NE de la provincia de Buenos Aires. Sus cuencas limítrofes son las de los ríos Salado, Reconquista, Samborombón, Río de la Plata y Arroyos Maciel y Pereyra (Figura 2.1)

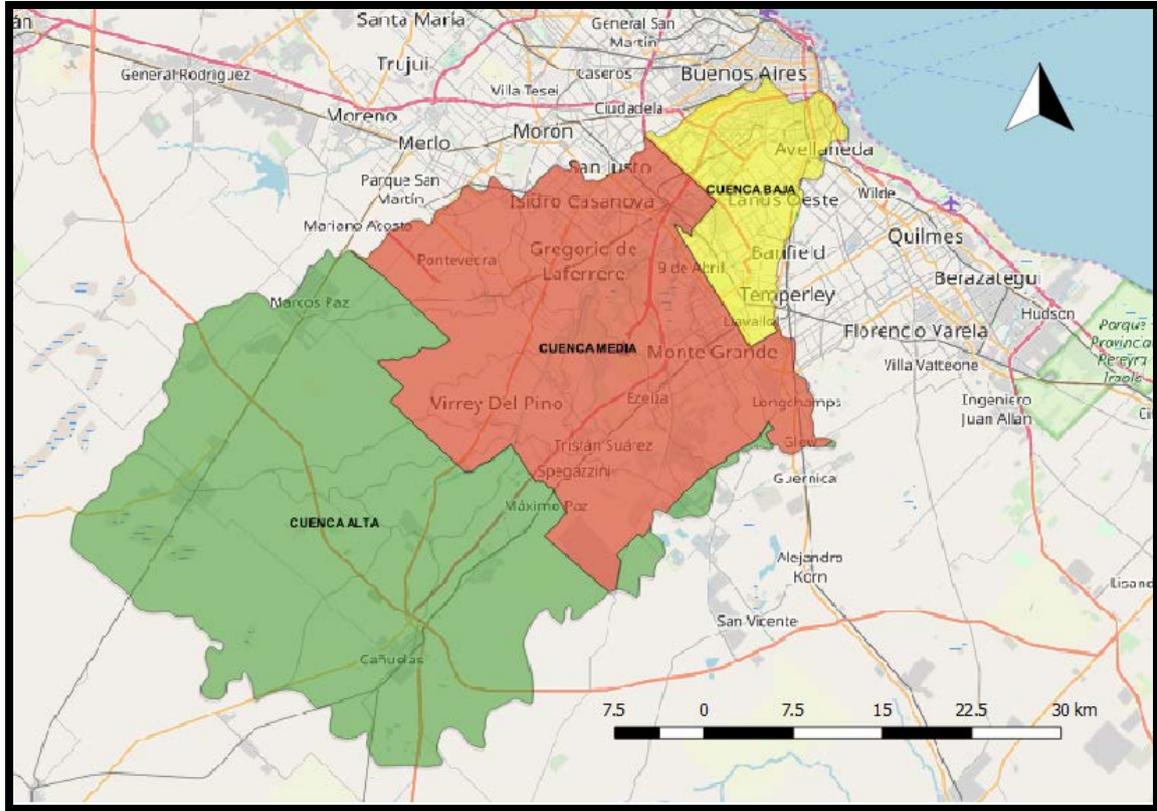


**Figura 2.1:** Ubicación geográfica del CMR.

La misma abarca parte de catorce municipios de la provincia: Lanús, Avellaneda, Lomas de Zamora, Esteban Echeverría, La Matanza, Ezeiza, Cañuelas, Almirante Brown, Morón, Merlo, Marcos Paz, Presidente Perón, San Vicente y General Las Heras. En la Ciudad de Buenos Aires, la Cuenca atraviesa toda la Comuna 8 y parcialmente las Comunas 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9 y 10.

Para el estudio y abordaje de problemáticas socioambientales, la CMR se divide en función de sus características urbanas: una zona altamente urbanizada (cuenca baja), otra periurbana o urbana en vías de expansión (cuenca media) y un área rural (cuenca

alta) donde el impacto ambiental todavía es bajo en comparación a las otras dos (Figura 2.2).



**Figura 2.2:** Subdivisión de cuenca alta, media y baja.

En el año 2015 la Universidad de Flores realizó un estudio del estado ecosistémico de la CMR, el cual describe la cobertura y uso de suelos (Tabla 2.1) y las características ambientales de cada sector (Tabla 2.2)

**Tabla 2.1:** Cobertura y uso de suelo en la CMR. Tomado de Faggi (2015).

Cobertura / uso del suelo	Área (ha)	Área (%)
Urbano	45.305	22,14
Periurbano	18.901	9,24
Suburbano	14.476	7,07
Rural	111.631	54,55
Forestación	5.828	2,85
Anegado	7.815	3,82
Cuerpo de agua	700	0,34
TOTAL	204.656	100

**Tabla 2.2:** Características generales del ambiente en cada cuenca. Tomado de Faggi (2015).

<b>Características Ambientales de cada sector</b>		
<b>Cuenca Alta</b>	<b>Cuenca Media</b>	<b>Cuenca Baja</b>
Muy buena conectividad	Buena conectividad	Escaso espacio. Sin conectividad
Riberas, canales y cauces casi naturales: pocos montículos de tierra y estructuras artificiales, poca rectificación y pocos cursos secos	Riberas, canales y cauces con pocas modificaciones: montículos de tierra y estructuras artificiales, erosión y algunos cursos secos	Riberas impermeabilizadas, canalización y rectificación
Algo de basura	Mucha basura dispersa y sitios donde se acumula basura	Dragado. Mala calidad del agua. Olor desagradable
Presencia de descargas de efluentes: espuma y materia fecal	Presencia de descargas de efluentes: espuma y materia fecal	Gran descarga de efluentes domésticos e industriales
Urbanización periurbana y rural	Urbanización periurbana y rural, focos periurbanos densos	Urbanización densa con asentamientos precarios
Ganadería y agricultura	Ganadería y avicultura intensivas	-
Poca industria extractiva	Industrias extractivas (ladrilleras y tosqueras)	Industria pesada (curtiembre, frigoríficos, productos químicos)
Pocas especies leñosas; bastantes pastos pero muchos exóticos	-	Árboles plantados, varios nativos. Presencia de plantas palustres

El Matanza Riachuelo (MR) es un río de llanura de escasa longitud (80 km), caudal medio (8 m<sup>3</sup>/s) y pendiente (0,35%) que atraviesa la planicie pampeana, con un cauce suavemente ondulado con modelado fluvial. Recorre el sur del área metropolitana de Buenos Aires y desemboca en el Río de la Plata. Recibe aguas arriba el aporte de aproximadamente 232 tributarios, aunque sólo tres son principales; Rodríguez, Morales y Cañuelas. Conforman así, una cuenca de forma irregular de 204.768 ha con un ancho máximo de 40 km que alberga el 12% de la población argentina.

El 22,14% del área de esta cuenca es urbana y el 54,55%, rural. En el tramo superior el río es poco profundo (0,3-0,5 m) y corre sin mayores dificultades, si bien existen algunos canales para orientar el escurrimiento. Al ingresar a la planicie baja, el cauce pierde sus características naturales. El curso inferior del río se encuentra canalizado y rectificado con la denominación de “Riachuelo” en sus últimos 15 km antes de su



desembocadura en el estuario del Río de la Plata, donde alcanza su mayor profundidad (7 m). Además, terraplenes ferroviarios y carreteros, dispuestos transversalmente a los cursos de agua, alteran el funcionamiento natural de la cuenca. El curso en la cuenca media está menos modificado, si bien se observan algunos Arroyos cortados, profundización del cauce y acumulación de tierra en las márgenes (Faggi, 2015).

La causa que el MR sea el río más contaminado de la Argentina se remonta desde la fundación de la Ciudad de Buenos Aires a orillas de una desembocadura de un río en aquel entonces limpio y en estado natural. En la época colonial (siglo XIX) hubo una instalación de saladeros en los márgenes del río, y durante el siglo XX la contaminación se debió principalmente a la intensiva producción agrícola-ganadera en la cuenca alta y los efluentes industriales y domésticos en la cuenca media y baja, acompañado de la ausencia prolongada en el tiempo de una política de control e inspección por parte de la autoridad de aplicación.

En la década de los noventa, la medición de parámetros de contaminación puso en evidencia el severo estado del río, despertando preocupación y tomando conciencia de lo que esto representaba para la salud y bienestar social, así como también el grave impacto ambiental.

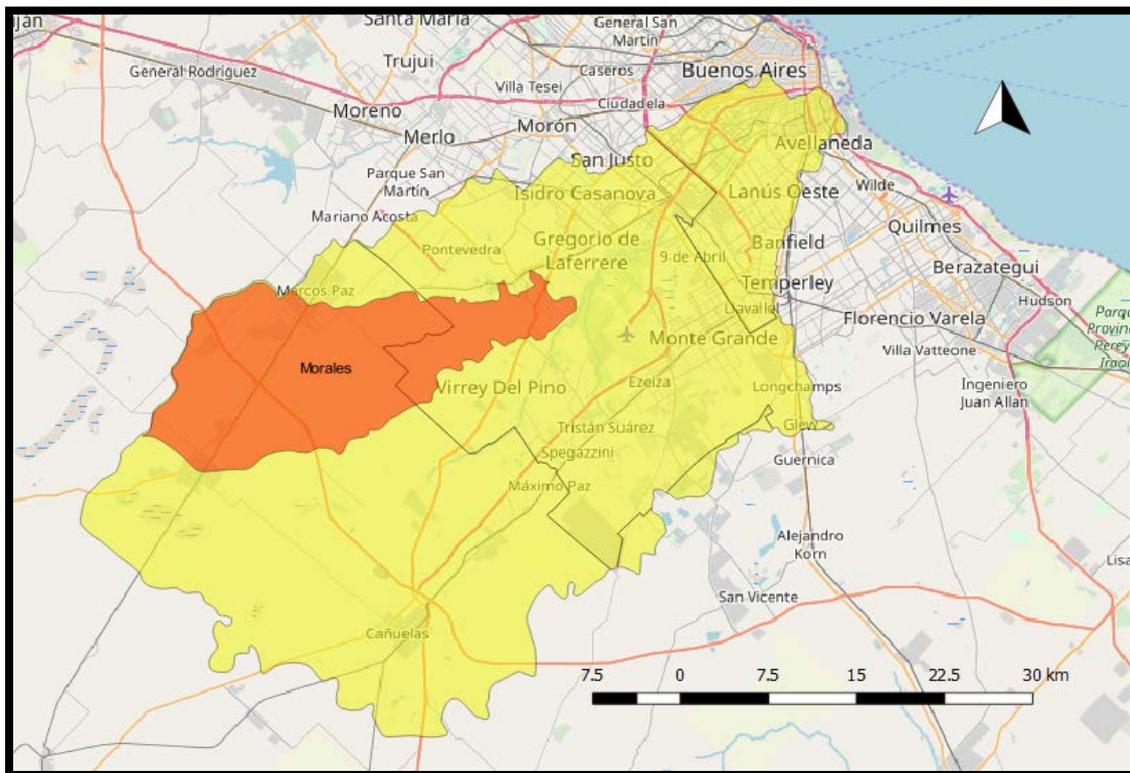
El enfoque a la solución de esta problemática comenzó a partir del 2006 con la creación de la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) como respuesta a la intimación de la Corte Suprema de Justicia de la Nación, iniciada por una causa judicial de un grupo de vecinos de la cuenca baja, comenzando por la extracción de barcos abandonados, realización de un camino de sirga, limpieza y forestación, reubicación de personas viviendo en la ribera en condiciones marginales. A partir del 2009 El Plan Integral de Saneamiento Ambiental (PISA) es el documento que guía el trabajo de la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR). Este coordina los profesionales de distintas áreas encargados de resolver las problemáticas de la cuenca. Está organizado en 14 líneas de acción con eje en: control, prevención, transparencia y gestión. El PISA es un proyecto flexible y dinámico, que se adapta a las complejidades del territorio.

## 2.2 Sub-cuenca Morales

### 2.2.1 Medio Físico

#### 2.2.1.1 Localización

La sub-cuenca Morales se ubica en el tramo medio y alto de la CMR. Los partidos que forman parte de ella son; Las Heras, Marcos Paz y La Matanza, cubriendo una superficie de 343,63 Km<sup>2</sup>. Dentro de su geografía se destacan varios cuerpos de agua superficiales como el Arroyo Morales, El Piojo, La Paja, y Chaves (Figura 2.3)



**Figura 2.3:** Sub-cuenca Morales.

#### 2.2.1.2 Clima

La región se caracteriza por tener un clima del tipo sub-húmedo-húmedo, con una media pluviométrica de alrededor de 1100 mm anual, con una temperatura media anual de 16.9°C [...] inviernos suaves y veranos bastante cálidos, atemperados en los sectores cercanos al Río de la Plata. Las precipitaciones son abundantes y de distribución bastante regular. En general todos los meses del año tienen lluvias, sin embargo, son los valores excepcionales de lluvias los que tienen relación directa con las inundaciones,



siendo la distribución de lluvias la siguiente: Los meses de otoño (28,2 %), los de verano (27,6 %) y los del invierno (17,9 %). El mes más lluvioso es marzo (11,3 % del total anual) y los meses de junio y julio (5 y 7 % respectivamente). Dada esta distribución, las precipitaciones no son de tipo estacional.

Las tormentas son predominantemente de tipo ciclónicas y ocurren, sobre todo, durante los meses de marzo, abril, mayo y agosto, septiembre, octubre. Las de tipo convectivo, en cambio, son de menor duración y ocurren en verano. El excedente hídrico es del orden de los 200 mm anuales.

La humedad relativa ambiente es elevada en la zona, variando de una media de 62 % en diciembre a 83 % en junio, siendo el valor medio anual de 72 % (período 1921-1980).

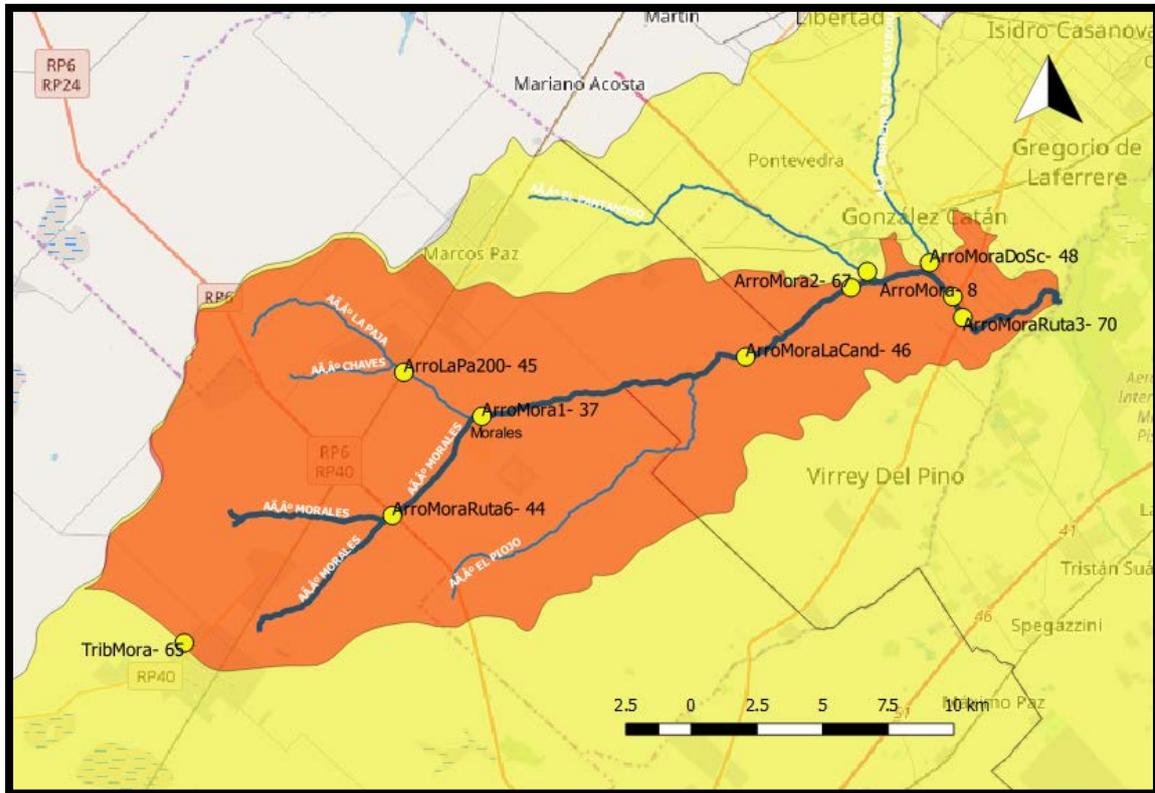
La incidencia del rocío, aunque pequeña en el ciclo del agua, es trascendente en su relación con la humedad del suelo. La condensación de vapor de agua de la atmósfera se produce en su gran mayoría en los meses de otoño y como rocío y escarcha en los de invierno. Este fenómeno incide sobre la humedad del horizonte a de las áreas bajas, manteniendo los fumigados a nivel del suelo, lo que facilita su incorporación al mismo.

La temperatura media anual es de 16.9 °C (promedio 1901-1990). El mes más frío es julio (10.4 °C) y el mes más cálido enero (23.9 °C). Los días con heladas son frecuentes desde el mes de mayo a septiembre y excepcionalmente en octubre. Sin embargo, son menos frecuentes que las registradas en las estaciones de igual latitud, pero que se hallan a mayor distancia del Río de la Plata (efecto amortiguador). Se registran vientos de superficie de todas las direcciones y en todas las épocas del año. Sin embargo, son dominantes los del sector N y E. El viento menos frecuente es del O. Los días de calma son aproximadamente 60 por año (Malpartida, 2004)

### **2.2.1.3 Recursos Hídricos Superficiales**

El cauce principal de la sub-cuenca Morales es el A. Morales. Este tiene origen en el área cercana a la estación de monitoreo "TribMora- 65", en el partido de las Heras, tramo alto de la CMR. En su nacimiento, el caudal es bajo, de cauce lento y poco profundo. Discurre de oeste a este, y divide al partido de Marcos Paz en dos áreas de similar superficie. Las áreas urbanas de la ciudad de Marcos Paz, están cerca de su cauce y de sus tributarios (A. Chaves, A. La Paja, A. El Piojo, A. Pantanoso y A. Barreiro) recibiendo de manera directa e indirecta las descargas de las plantas de tratamiento de efluentes de la ciudad, vuelcos cloacales clandestinos de asentamientos precarios sin servicio de cloaca, efluentes industriales y agrícolas autorizados y no autorizados.

ACUMAR cuenta con una importante base de datos hídricos (BDH) de la CMR. Con valores históricos de parámetros hidráulicos y de calidad de agua. Se consultaron los valores históricos obtenidos a lo largo de 40 campañas en el periodo 2013-2018 en las estaciones de monitoreo sobre el A. Morales (Figura 2.4)



**Figura 2.4:** Estaciones de monitoreo de ACUMAR sobre el A. Morales y tributarios.

Puede observarse en la Figura 2.5 que el caudal aumenta progresivamente a lo largo de las estaciones de monitoreo gracias al aporte de los tributarios. En la estación más próxima a la naciente (ArroMoraRuta6- 44) la caudal ronda entre los 0,13 - 0,26 m<sup>3</sup>/s, mientras en la última estación antes de la confluencia con el río Matanza (ARROMORARuta3- 70), el caudal ronda los 1,26-2,39 m<sup>3</sup>/s.

El análisis estadístico de valores de caudal para cada estación, permite apreciar que los periodos de mayor caudal corresponden a las estaciones de primavera, seguido por las estaciones de invierno, otoño y verano.

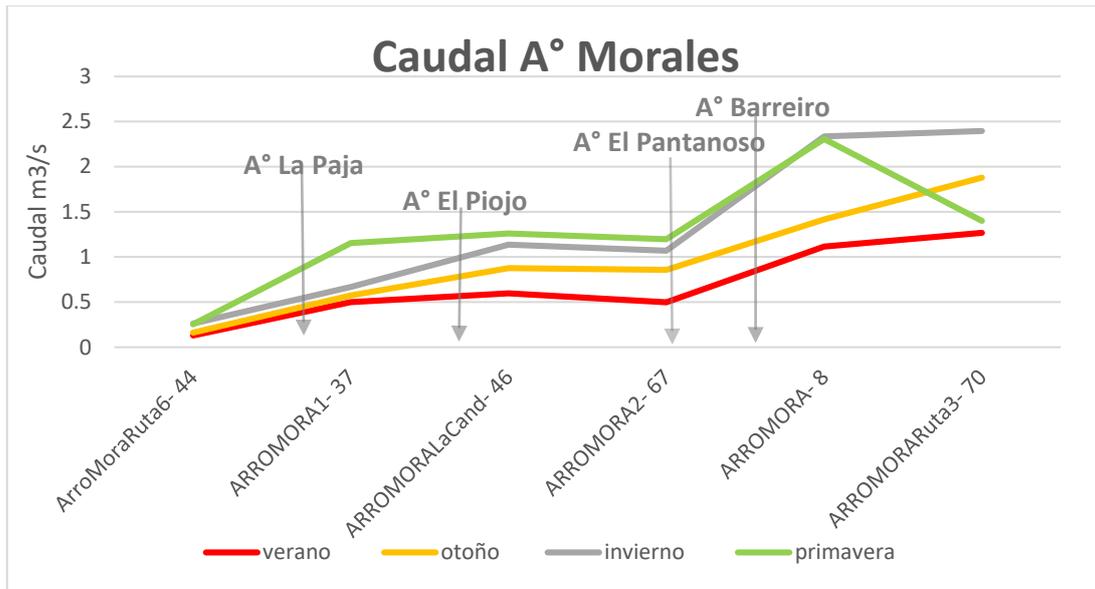


Figura 2.5: Mediana del caudal de A. Morales en sus estaciones de monitoreo.

## 2.2.2 Medio Socioeconómico

### 2.2.2.1 Población

La sub-cuenca Morales, se caracteriza por ser una zona rural-urbana. La población total es de 162.876 personas de las cuales el 25% vive en Villas y Asentamientos. A la fecha de 2018 se registraron aproximadamente 52200 personas sin servicio de cloacas (ACUMAR, 2018).

### 2.2.2.2 Actividades Productivas

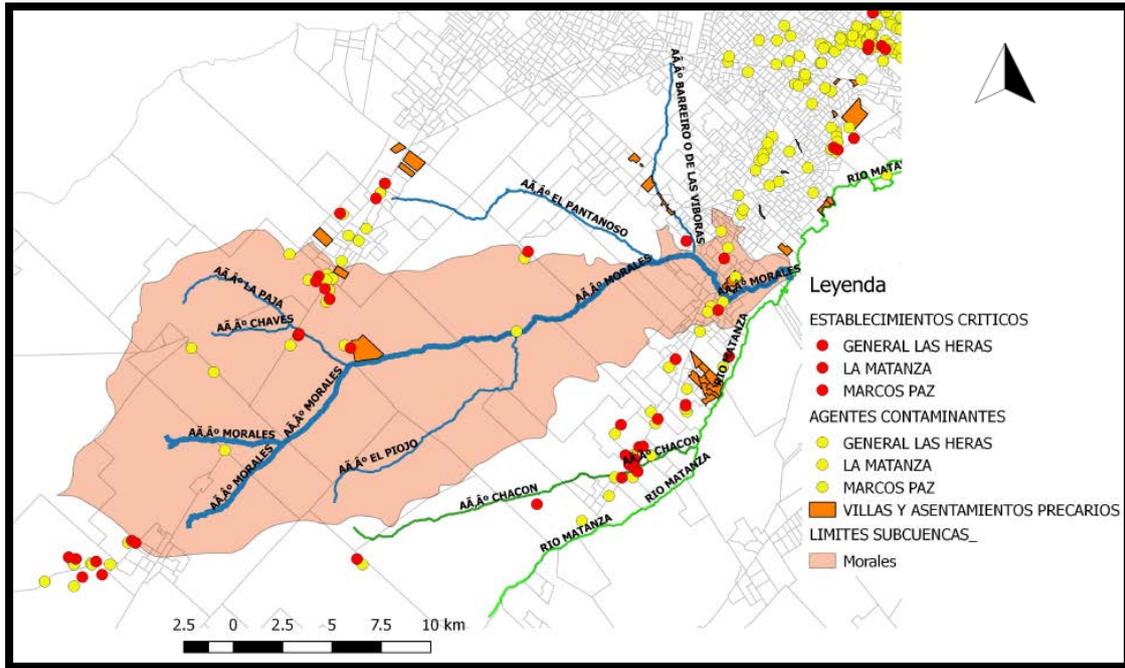
Las principales actividades productivas son las asociadas a la agroindustria, como los establecimientos de cría de aves de corral y ganado, cabañas y granjas avícola, frigoríficos, chacinados, e industrias alimenticias.

ACUMAR ha identificado los establecimientos generadores de contaminación ambiental dentro de la CMR, declarándolos "Agentes Contaminantes" realizando un posterior seguimiento y control para que cumplan progresivamente los límites de vuelco establecidos por la normativa vigente. A su vez se diferencian las empresas industriales y/o de servicios, las cuales tienen una relevancia ambiental crítica. Se los denomina "Establecimientos de seguimiento particular" y se detallan en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3:** Establecimientos de seguimiento particular en la sub-cuenca Morales.

<b>RAZÓN SOCIAL</b>	<b>RUBRO</b>	<b>PARTIDO</b>
CABAÑA AVICOLA JORJU	PRODUCCIÓN DE HUEVOS	MARCOS
CABAÑA AVICOLA JORJU SA	AGRICOLA-GANADERAS	MARCOS
C.SUD DE ENVASES	TRANSP. Y TRATADORES	LA MATANZA
ECOTRANS SA	TERMINAL DE TRANSPORTE	MARCOS
ECOAVE SA	HUEVOS PARA CRIA DE POLLOS	MARCOS
S.A.C.I.A.I	FEED-LOT	MARCOS
FESTA	ALIMENTICIA	LAS HERAS
S.A.C.I.F.YA.	MATADEROS	MARCOS
FRIGORIFICO PRIGIONE SRL	FIAMBRES Y EMBUTIDOS	MARCOS
MARCOS MARTINI S.A.	TRANSP. Y TRATADORES	MARCOS
MONDALEZ	ALIMENTICIA	LAS HERAS
NOREN PLAST SA	RESINAS SINTETICAS	LA MATANZA
NUTROVO S.A.	ALIMENTICIA	MARCOS
OILLATAGUERRE G. A .	ALIMENTICIA	MARCOS
O. PEDRO JOSE	ALIMENTICIA	MARCOS
EL ARTESANO S.A.	FRIGORIFICO	MARCOS
R.CRESPI E HIJOS SRL	ELABORACIÓN DE ROLITO	LAS HERAS
RUNFO S.A.	MATADEROS	LA MATANZA
SARGENTO CABRAL SAT	TRANSPORTE URBANO	MARCOS

En la Figura 2.6 se observa la georreferenciación de los agentes contaminantes y establecimientos críticos, en los partidos de Marcos Paz, Las Heras y La Matanza, a lo largo de la sub-cuenca Morales. También se representan las villas y asentamientos precarios, generalmente ubicados en las riveras de Arroyos y ríos, siendo los principales afectados en eventos de inundación. El 100% de los efluentes cloacales generados en estos asentamientos no recibe ningún tipo de tratamiento previo a su vuelco en cuerpos de aguas o fosas sépticas. Puede observarse que los Arroyos tributarios presentan agentes contaminantes en su cercanía, siendo los cuerpos receptores y transportadores hacia el A. Morales. La densidad de industrias y tejido urbano aumenta en la zona anterior a la confluencia con el Río Matanza.



*Figura 2.6: Agentes contaminantes, establecimientos críticos, villas y asentamientos precarios en las sub-cuenca Morales.*

## 2.3 Diagnóstico de la Problemática Ambiental: Contaminación del Arroyo Morales

Uno de los principales impactos ambientales generados por el elevado grado de antropización de la CMR es el deterioro de calidad de cursos y cuerpos de agua. La hidrología de los ríos y Arroyos produce fenómenos de transporte de contaminantes de diferentes características a través de sus cauces, los cuales están en contacto con tejido urbanos, generando así, frecuentes exposiciones humanas a agentes tóxicos, además de un deterioro constante del recurso hídrico y el ambiente en general.

A partir de esta realidad, ACUMAR tienen la necesidad y responsabilidad de generar monitoreo constante a partir de los lineamientos definidos en el Programa de Monitoreo Integrado (PMI) incluido en el Plan Integral de Saneamiento Ambiental de la Cuenca Matanza Riachuelo (PISA). Este se desarrolla desde el año 2008 ininterrumpidamente y se lleva a cabo a partir de campañas de monitoreo, las cuales incluyen, desde fines del año 2013, la medición de variables hidráulicas como el caudal, profundidad, velocidad de flujo, etc., hasta variables y analitos fisicoquímicos y biológicos para la determinación de calidad de agua superficial, subsuperficial y sedimentos.

Actualmente las campañas son trimestrales y la toma de muestras se lleva a cabo en las 67 estaciones de monitoreo a lo largo de toda la cuenca. En el momento de la

toma de muestra se analizan datos cualitativos como, color, olor, estado general del sitio y cuantitativos; pH, temperatura, turbidez, conductividad, oxígeno disuelto, variables hidrológicas, analitos que permiten una caracterización completa a nivel fisicoquímico, biológico y microbiológico como presencia de metales pesados; materia orgánica disponible, compuestos nitrogenados, fósforo, microorganismos e hidrocarburos.

A partir de la información recopilada se hace un informe de dicha campaña, en el cual se analiza, entre otras cosas, la evolución del estado de los cuerpos de agua superficial.

Todos los parámetros medidos en campañas desde el 2008 e informes correspondientes se encuentran disponibles en la BDH. La descripción de la problemática asociada a la contaminación del A. Morales, se basó en la búsqueda y análisis de un gran volumen de datos provistos por la BDH.

### 2.3.1 Estaciones de monitoreo

Las estaciones de interés para este trabajo, son las ubicadas a lo largo del cauce del A. Morales. Se analizaron siete estaciones, las cuales evidencian datos de parámetros de calidad de agua diferentes entre sí.

La Tabla 2.4 detalla las coordenadas y código de las estaciones estudiadas. Las mismas se encuentran en la sub-cuenca Morales, situada a su vez en la cuenca media del Matanza-Riachuelo.

**Tabla 2.4:** Coordenadas, nombre y código de las estaciones estudiadas para el diagnóstico.

Estación	Código	Latitud	Longitud	Arroyo
MORALES Aguas abajo de la descarga del Arroyo La Paja	ARROMORA1- 37	-34,838683	-58,833247	Morales
MORALES. Aguas arriba de la confluencia con Arroyo Pantanoso	ARROMORA2- 67	-34,791867	-58,671061	Morales
MORALES (antes de su desembocadura en el río Matanza)	ARROMORA- 8	-34,797083	-58,63635	Morales
Arroyo las Víboras y Calle Domingo Scarlatti	ARROMORADoSc- 48	-34,785411	-58,646034	Morales
MORALES y Calle Querandies	ARROMORALaCand- 46	-34,818105	-58,723596	Morales
MORALES – cruce con Ruta 3.	ARROMORARuta3- 70	-34,803877	-58,632803	Morales
MORALES y Ruta 6	ArroMoraRuta6- 44	-34,872911	-58,870672	Morales

La georreferenciación de las estaciones estudiadas se observa en la Figura 2.7. Puede observarse la cercanía y consecuente interacción de centros urbanos, asentamientos, tributarios e industrias con el A. Morales.

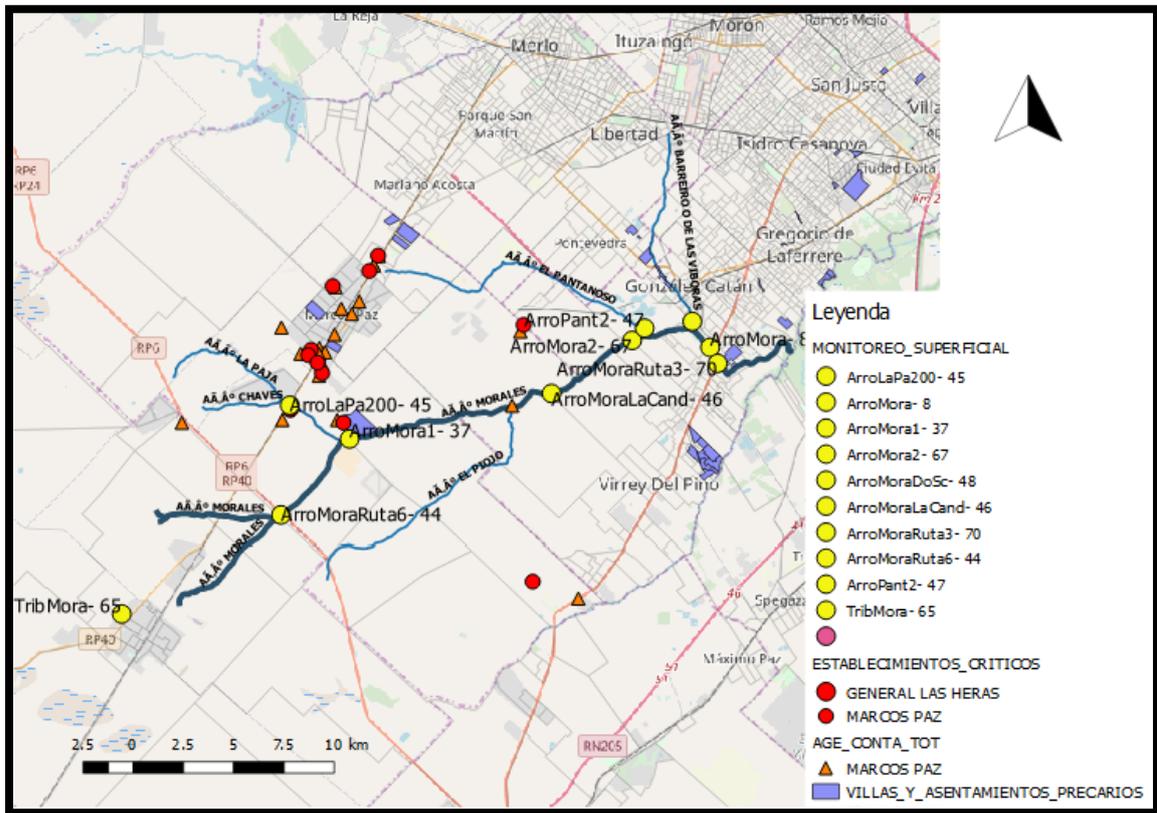


Figura 2.7: Estaciones de monitoreo sobre el A. Morales.

### 2.3.2 Contaminación antrópica

Los ríos y Arroyos de la CMR, han sido usados durante décadas como cuerpos receptores de las aguas residuales generadas por la actividad antropogénica, sin haber considerado su capacidad de autodepuración, pasando por alto el negativo impacto ambiental y social. A continuación, se describen los contaminantes más relevantes y sus fuentes asociadas para la interpretación de calidad de aguas superficiales, particularmente para el A. Morales. Luego, en la sección 2.3.4 se analizarán valores históricos de parámetros de calidad de agua en las siete estaciones de monitoreo estudiadas.



## **Materia Orgánica**

La materia orgánica disuelta (MOD) es una compleja mezcla heterogénea de macromoléculas, cuyos principales componentes en las aguas dulces son sustancias húmicas, carbohidratos y aminoácidos. La MOD en las aguas naturales puede ser originada por la descomposición del material biológico procedente de animales, plantas y microorganismos. La contaminación del agua por materia orgánica puede generarse por vertidos urbanos, actividades ganaderas, así como por escurrimientos agrícolas e industriales. La materia orgánica se encuentra como partículas macroscópicas, coloides o macromoléculas disueltas que pueden causar color, olor, sabor, el desarrollo de microorganismos patógenos o implicar la presencia de materia no biodegradable. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son proteínas (40-60 %), carbohidratos (25- 50 %) y aceites y grasas (10 %) (Fuentes Rivas, Ramos Leal, Jiménez Moleón, & Esparza Soto, 2015)

La degradación de la materia orgánica es llevada a cabo principalmente por bacterias aeróbicas, consumiendo el oxígeno disuelto en el agua a una tasa mayor del que este puede ser incorporado por difusión desde la atmosfera. Si la cantidad de MOD es suficiente, el medio se volverá anóxico.

## **Nutrientes**

El exceso de carga de nutrientes en los cuerpos de agua más allá de los niveles naturales se conoce comúnmente como contaminación de nutrientes. Los efectos de la contaminación por nutrientes son diversos y de gran alcance. Entre los efectos más significativos y generalizados de la contaminación por nutrientes están la eutrofización acelerada y los impactos resultantes en la calidad del agua.

El nitrógeno y el fósforo se transportan a los cuerpos de agua por escorrentía superficial, incluido el drenaje de aguas subterráneas urbanas y agrícolas, y las aguas residuales municipales e industriales. Una vez en un cuerpo de agua, el nitrógeno o el fósforo pueden aparecer en formas orgánicas disueltas, inorgánicas disueltas o en forma de partículas con transformaciones que ocurren entre estas formas. El exceso de nitrógeno y fósforo en el agua hace que el fitoplancton y las algas crezca de forma exacerbada, llamada florecimiento o alterando el equilibrio ecológico del medio acuático. Un aumento significativo en la cantidad de alga deteriora la calidad del hábitat acuático reduciendo parcial o completamente la concentración de oxígeno que los peces y otras especies acuáticas necesitan para vivir. Las proliferaciones de alga son llamadas florecimientos y pueden reducir en gran medida o eliminar el oxígeno presente en el agua. Como consecuencia, los peces se enferman y muchos de ellos mueren. Algunos



florecimientos de algas son perjudiciales para los humanos, ya que producen cantidades elevadas de toxinas y crecimiento bacteriano. Una persona podría enfermarse si entra en contacto con agua contaminada, la bebe o si consume pescado o moluscos contaminados (USEPA, 2019).

### **Hidrocarburos alifáticos**

Son compuestos orgánicos que tienen cadena abierta, también llamados acíclicos o alifáticos. Aunque su existencia en aguas no se encuentra regulada por normas, las distintas fracciones de su composición total pueden arrojar idea de su origen e indirectamente del origen de otros compuestos que sí son considerados como tóxicos. Estos compuestos son normalmente sustrato metabólico de diversas bacterias y hongos. (Malpartida, 2004)

### **Hidrocarburos aromáticos**

Son compuestos orgánicos que tienen cadena cerrada, también llamados cíclicos o aromáticos, su prototipo es el benceno. La existencia de estos compuestos sí se encuentra regulada por la legislación vigente y algunos compuestos de este grupo son causa de preocupación debido su comprobado efecto citotóxico y potencial mutagénico. Una fuente natural de hidrocarburos aromáticos son los incendios forestales, donde por combustión incompleta de la materia orgánica se forman compuestos aromáticos que, de hecho, es el mismo que ocurre con el humo del cigarrillo. La fuente antropogénica está directamente vinculada a los polos industriales. La mayoría de estos compuestos son degradados por bacterias y hongos. En el caso de los mamíferos (incluidos los humanos) su proceso de oxidación con posterior transformación a productos hidrosolubles que se excretan por orina, depende del complejo enzimático citocromo p450 hepático. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos, es decir aquellos que tienen muchos anillos bencénicos en forma angular o ramificada, son los más persistentes y tienen una conocida carcinogenicidad y mutagenicidad. Dentro de este grupo se encuentran: naftaleno, acenafteno, antraceno, fenantreno, fenoranteno, pireno, benzoantraceno, benzopireno. De todos ellos, los dos últimos son los de mayor peligrosidad (Malpartida, 2004)

### **Metales**

Los Metales son elementos químicos cuyas propiedades comunes tienen que ver con su buena conductividad eléctrica y térmica, la ductilidad y la maleabilidad entre otras. Tanto en las aguas, los sedimentos como en los organismos, los metales se



encuentran en forma aislada o formando parte de moléculas más complejas. Los metales que se buscan en los estudios referidos a contaminación involucran generalmente al manganeso (Mn), hierro (Fe), cromo (Cr), zinc (Zn), plomo (Pb), cobre (Cu), cadmio (Cd), níquel (Ni), mercurio (Hg), aluminio (Al), arsénico (As) y cobalto (Co) entre otros. Los metales condicionan su toxicidad a partir de varios factores como:

- a) la toxicidad propia de cada metal
- b) la concentración en la que se encuentra en el medio u organismo que se trate
- c) el tiempo de acción y biodisponibilidad
- d) tipo de compuesto en el que se presenta (orgánico u inorgánico)
- e) forma de dispersión
- f) interacciones

El proceso de biomagnificación tiene mucha importancia con los metales porque al igual que con otras sustancias persistentes como los BPCs y los organoclorados, son acumulados por algunos organismos, generando así un alto riesgo para la salud humana en tanto se los utilice para consumo en cualquier forma (Malpartida, 2004)

### 2.3.3 Normativa Vigente

Al agua superficial se le pueden asignar diferentes objetivos o metas de calidad a los que se aspira alcanzar “usos”. El objetivo o meta de calidad de agua es una expresión cuantitativa o narrativa de un parámetro de calidad, involucrada en un plan de manejo específico para preservar el uso asignado a un cuerpo de agua (ACUMAR, 2019). Mediante la Resolución N° 46/2017, la ACUMAR estableció usos para cada sub-cuenca, definiendo el valor de diferentes parámetros de calidad de agua superficial, basados en estándares internacionales. Estos son:

**Uso I a:** Apta para protección de biota y uso recreativo c/contacto directo;

**Uso I b:** Apta para protección de biota;

**Uso II:** Apta para actividades recreativas c/contacto directo;

**Uso III:** Apta para actividades recreativas s/contacto directo;

**Uso IV:** Apta para actividades recreativas pasivas.

El uso establecido para la sub-cuenca Morales corresponde al Uso III. En la Tabla 2.5 se resumen los límites de los parámetros fisicoquímico, orgánicos e inorgánicos, biocidas y microbiológicos del Uso III. Los valores históricos de los mismos será analizados en la próxima sección

**Tabla 2.5:** Límites de parámetros admisibles para Uso III.

Parámetros	Relación	USO III	Unidades
DBO5	<	15	mg/l
Detergentes (S.A.A.M.)	<	5	mg/l
Fosforo Total	<	5	mg/l
Nitrógeno de Nitratos	<	10	mg/l
OD	>	4	mg/l
pH	(intervalo)	6,5-9	upH
Temperatura	<	35	°C
Sulfuros	<	0,05	mg/l
Sustancias Fenólicas	<	0,1	mg/l
Hidrocarburos Totales	<	0,2	mg/l
Coliformes fecales	<	1000	UFC/100ml

### 2.3.4 Datos Históricos de calidad de agua del A. Morales

Se realizó un extenso análisis de los valores históricos de parámetros de calidad de agua del A. Morales a partir de la BDH de ACUMAR. Se analizaron datos de campañas de monitoreo desde el 2008 hasta 2018 en las siete estaciones a lo largo del Arroyo. El objetivo de este análisis fue estudiar los valores históricos de los parámetros regulados por el USO III, para determinar el grado de cumplimiento respecto a los valores máximos establecidos según la Resolución N° 46/2017. Además, se analizaron otros parámetros relacionados a la calidad de agua, para profundizar la interpretación de las características fisicoquímicas del Arroyo a lo largo del espacio y el tiempo.

Debido al gran número de datos utilizados en este análisis, se utilizaron herramientas estadísticas para la interpretación de los mismos. Los resultados se presentan mediante grafico de cajas, pudiendo apreciar la dispersión de los datos a partir de los cuartiles, media, mediana, extremos inferiores, superiores y puntos atípicos.

Primero se hará un análisis de los parámetros como indicadores de sustancias antropogénicas y su impacto en la calidad de agua. Al final de esta sección se compararán los valores históricos respecto a los valores límites establecidos por el USO



III para determinar el grado de cumplimiento con la normativa vigente. También se analizarán ciertos parámetros respecto a los valores de calidad de agua establecidos por USEPA (2001).

Se aclara que el número (N) de campañas de monitoreo no es la misma a lo largo de las 7 estaciones, siendo algunas monitoreadas durante bastantes años más y con frecuencias de monitoreo mayores que otras

#### 2.3.4.1 Materia Orgánica

En las Figuras 2.8, 2.9 y 2.10 se observan los valores históricos de: carbono orgánico total (COT), como determinación directa de cantidad de materia orgánica en el agua; la demanda química de oxígeno (DQO) como medida de cualquier sustancia, orgánica o inorgánica susceptible a ser oxidada por un oxidante fuerte; y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) medida de la materia orgánica biodegradable.

En la mayoría de los casos  $DBO_5 > COT$ . Esto probablemente se deba a la presencia de especies biodegradables distintas a la materia orgánica, como el Amonio que, al ser oxidado por los microorganismos, genera un mayor valor de  $DBO_5$

Se relacionaron los tres parámetros para obtener información acerca de la biodegradabilidad la cual es una característica de los compuestos orgánicos relacionada a la susceptibilidad de que éstos sean degradados por microorganismos y por lo tanto condiciona en gran medida la viabilidad de tratar biológicamente un efluente que contenga un determinado compuesto (Osorio & Peña, 2012). En general, las sustancias provenientes de industrias son más complejas y menos biodegradables que las de origen natural.

Para determinar la biodegradabilidad, se calculó el cociente de  $DQO/DBO$  y el estado de oxidación medio (EOM). Cuando  $(DQO/DBO_5) < 2.5$  se trata de un efluente o el agua residual biodegradable. Valores mayores indican una reducción de la biodegradabilidad. (Hernandez, 1992). El (EOM) se calculó a partir de la ecuación 1:

$$EOM = 4 - 1,5 \cdot \frac{DQO}{COT} \quad (2-1)$$

Este varía entre +4 (para el  $CO_2$ , el estado del carbono más oxidado posible), y -4 (para el  $CH_4$ , su estado más reducido). Los resultados se resumen en la Tabla 2.6. Los cálculos se hicieron en base a la mediana estadística de cada estación de monitoreo (Figura 2.11).

En general, los valores de  $DQO$  son bastante mayores respecto a  $DBO_5$ . Por los valores de  $(DQO/DBO_5)$  se deduce la presencia de materia orgánica poco biodegradable ( $DQO/DBO > 2,5$ ). Además, el valor de EOM de la estación ARROMORA1- 37 (bastante

menor a -4 correspondiente al estado de oxidación más reducido del carbono), sugiere la presencia de aportes puntuales de sustancias inorgánicas susceptibles a ser oxidadas. Este tipo de sustancias es común de efluentes industriales y agrícolas. La estación ARROMORA1- 37 y ARROMORA- 8 presentan puntos atípicos de DQO y DBO con valores cercanos a los de un efluente cloacal. Nuevamente, es evidente el aporte de materia oxidable orgánica e inorgánica proveniente de industrias y agricultura

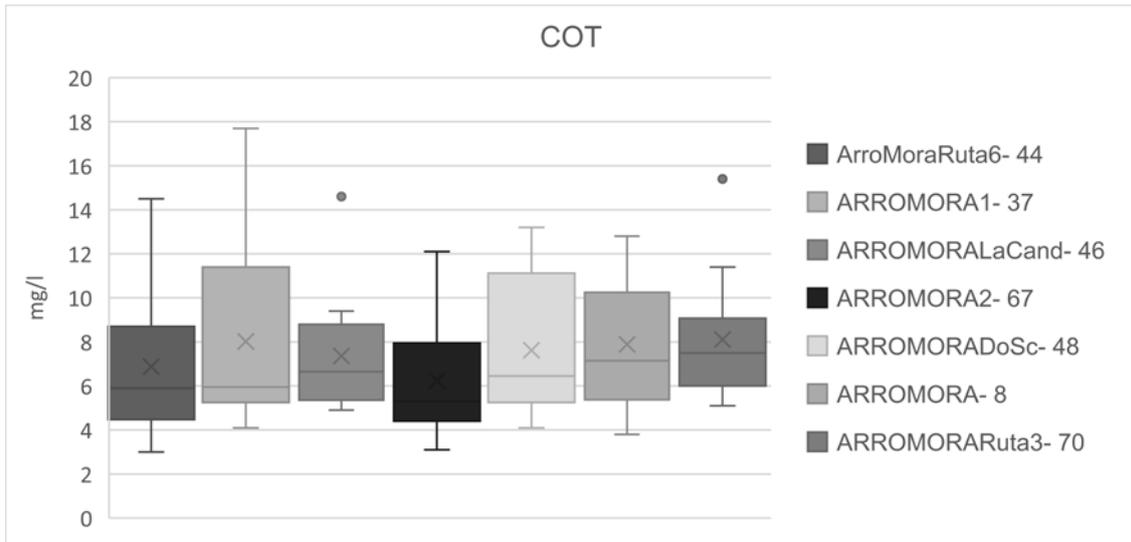


Figura 2.8: Valores historicos COT.

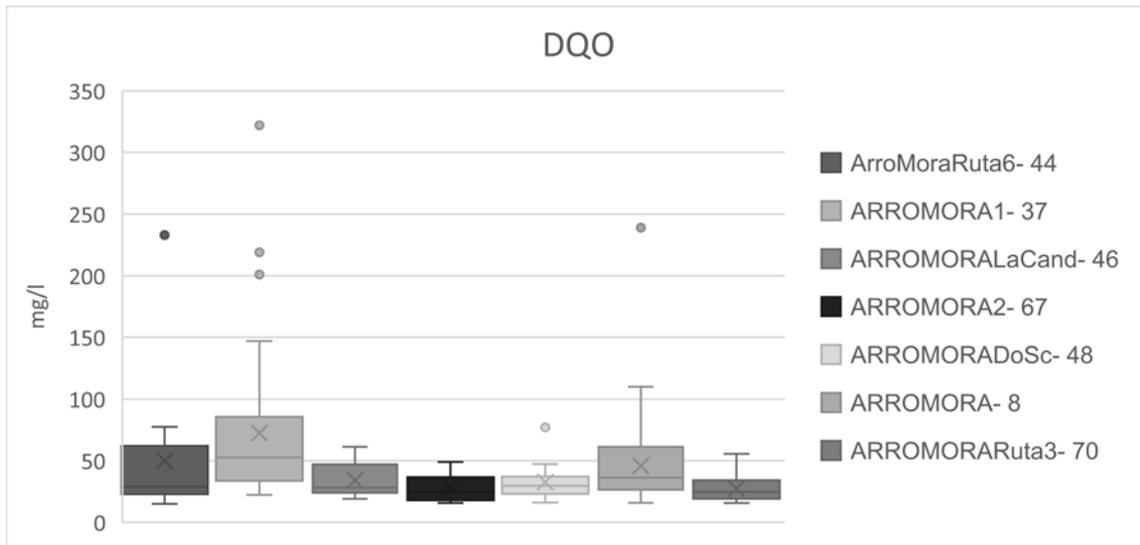
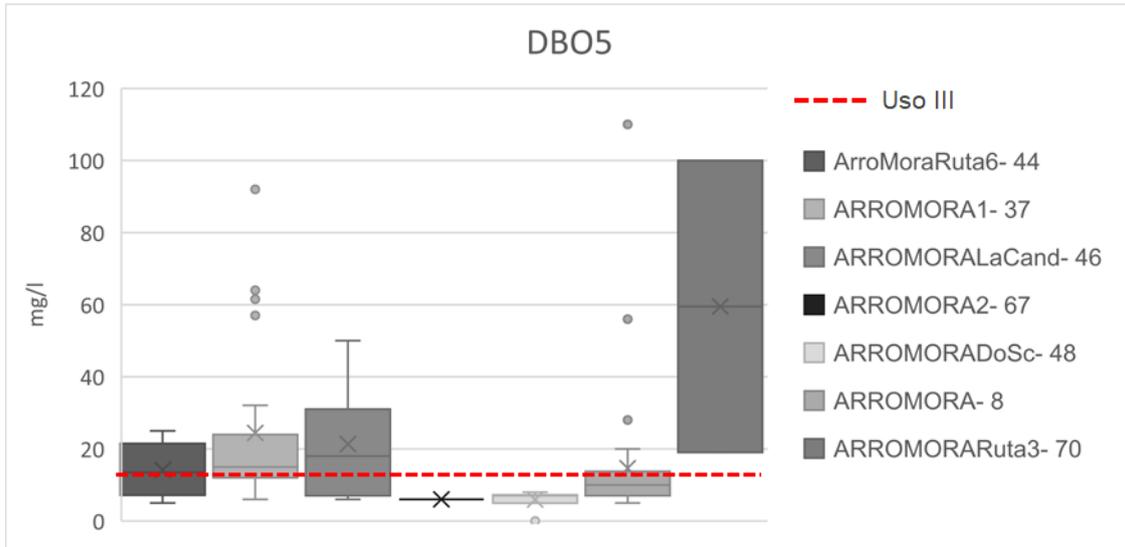


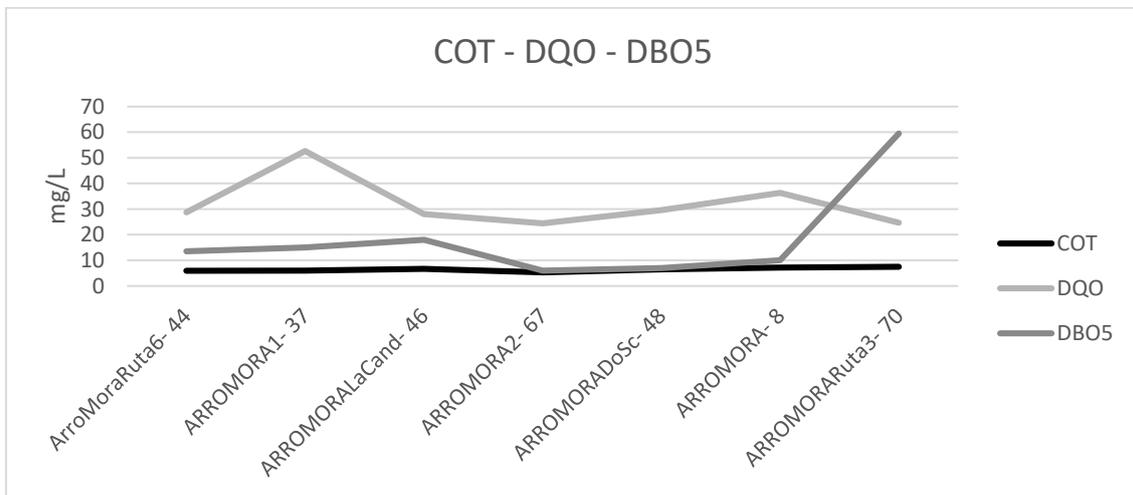
Figura 2.9: Valores historicos de DQO



**Figura 2.10:** Valores históricos de DBO5

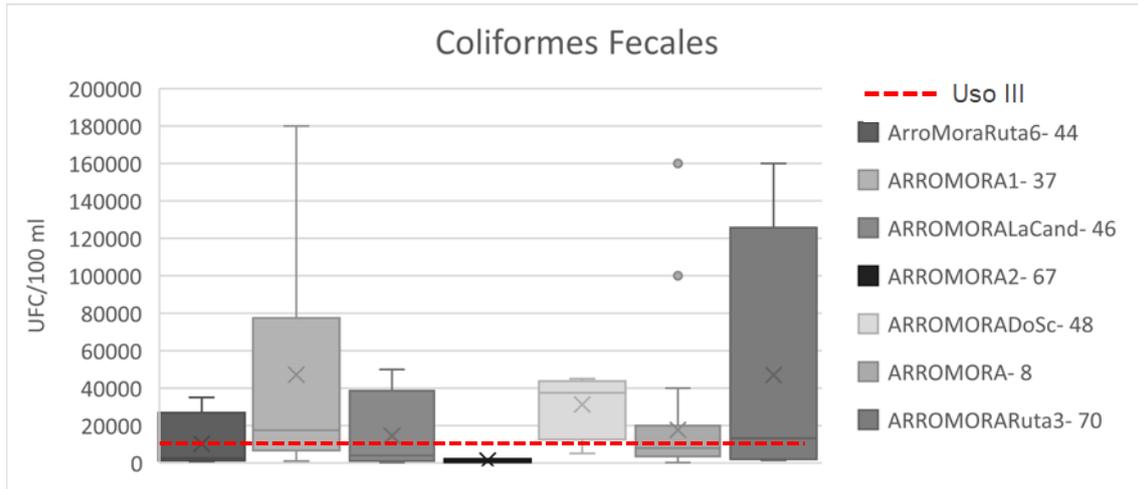
**Tabla 2.6:** Determinación de biodegradabilidad de la MO.

	ARRO- 44	ARRO1- 37	ARRO- 46	ARR- 67	ARRO- 48	ARR- 8	ARRO- 70
<b>DQO/DBO</b>	2,13	3,51	1,56	4,07	4,23	3,63	0,41
<b>EOM</b>	-3,30	-9,26	-2,33	-2,91	-2,88	-3,62	-0,93



**Figura 2.11:** Mediana estadística de DQO, DBO5, COT.:

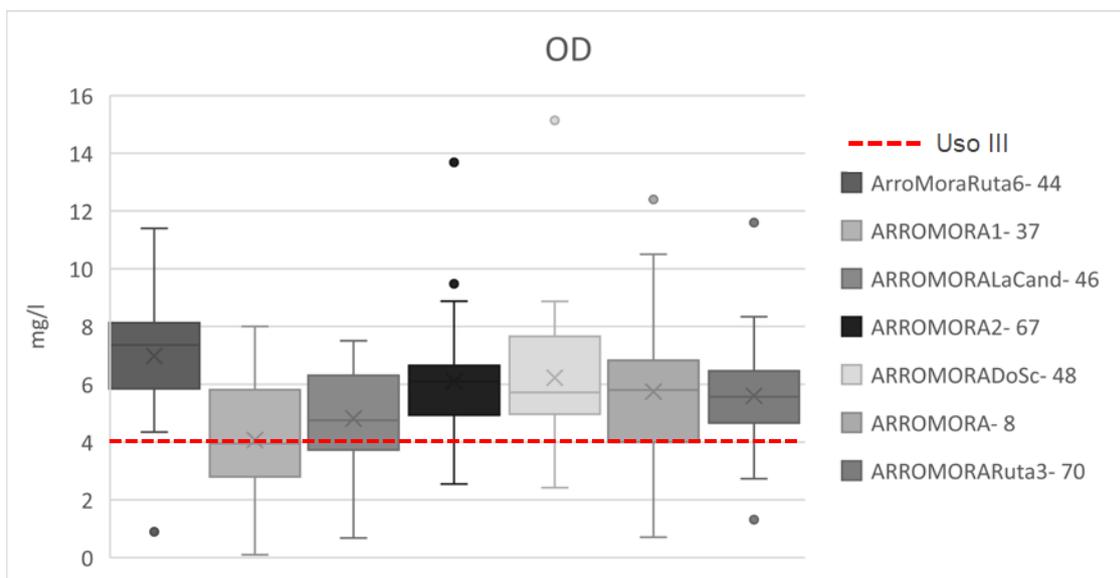
Los valores de Coliformes totales (Indicadores de materia fecal) son altos a lo largo de todo el cauce, indicando un aporte continuo de materia fecal a través de vultos clandestinos, efluente cloacal, animales, etc. (Figura 2.12). Estos son máximos en las estaciones ARROMORA1- 37 y ARROMORA- 8



**Figura 2.12:** Valores históricos de Coliforme Fecales.

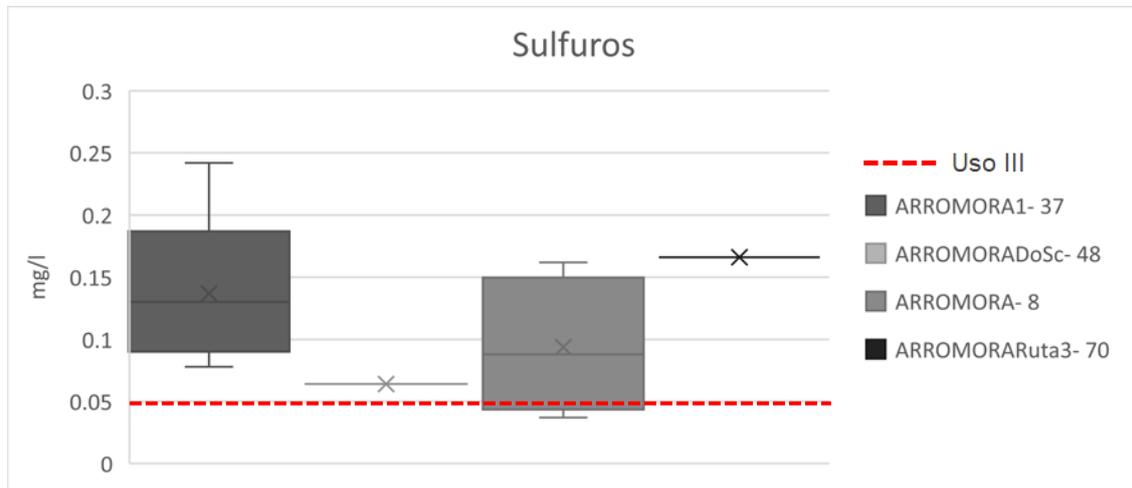
Una manera de interpretar el impacto de las concentraciones de materia orgánica e inorgánica a lo largo del cauce es estudiar las concentraciones de Oxígeno Disuelto (OD) La descomposición bacteriana de la materia orgánica agregada será un proceso aeróbico: las bacterias se multiplicarán, degradando los desechos y utilizando el OD a medida que lo hacen. Si la cantidad de desechos presentes es lo suficientemente grande, la tasa de absorción bacteriana de oxígeno superará a la cantidad de OD que se repone de la atmósfera y de la fotosíntesis, y finalmente el agua receptora se volverá anaeróbica, generando productos tóxicos para el ecosistema como sulfuros de hidrogeno (USEPA, 2001).

Teniendo en cuenta que la solubilidad del OD a 20°C es de 9,2 mg/L USEPA (2001) casi todas las estaciones presentan bajas concentraciones de OD. Se observa que los de las medianas rondan entre los 4 y 8 mg/L.



**Figura 2.13:** Valores históricos OD.

El N de campañas de monitoreo de Sulfuro es bastante menor que otros parámetros, habiendo información solo para cuatro estaciones de monitoreo. A partir de las concentraciones de Sulfuro puede deducirse escenarios anaeróbicos en las cuatro estaciones de la Figura (2.14).



**Figura 2.14:** Valores históricos de Sulfuros.

### 2.3.4.2 Nutrientes

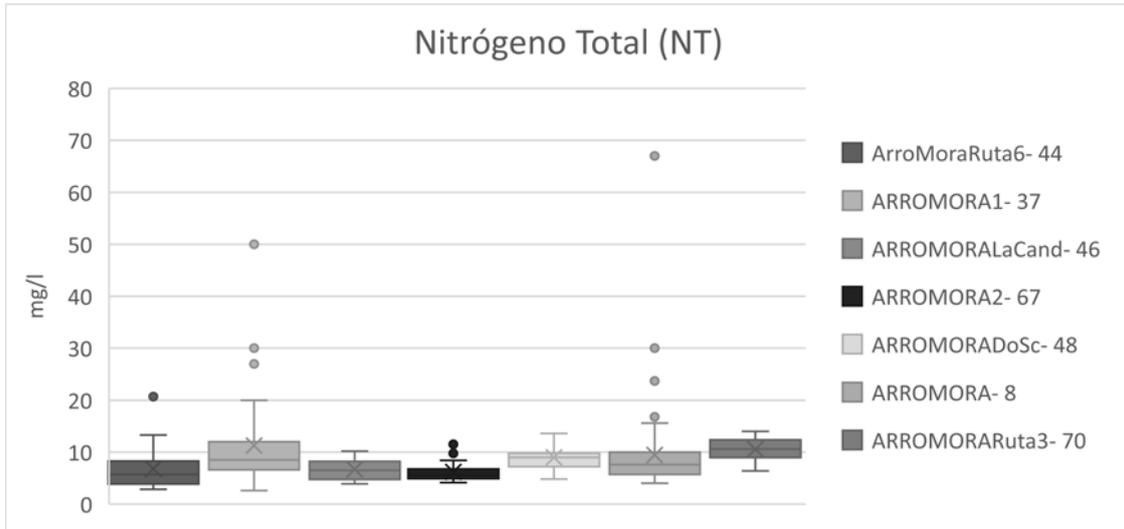
Como se explicó anteriormente la presencia de nutrientes en determinadas concentraciones como Nitratos, Nitritos, Amonio y Fosfatos son claros indicios de contaminación antropogénica en cuerpos de agua asociados principalmente a actividades agrícolas, uso de fertilizantes, pesticidas y detergentes. Los altos niveles de nitrato son más propensos a indicar una escorrentía significativa de las tierras agrícolas que cualquier otra cosa (USEPA, 2001).

La Tabla 2.7 muestra las concentraciones de los nutrientes limitantes para diferentes condiciones tróficas.

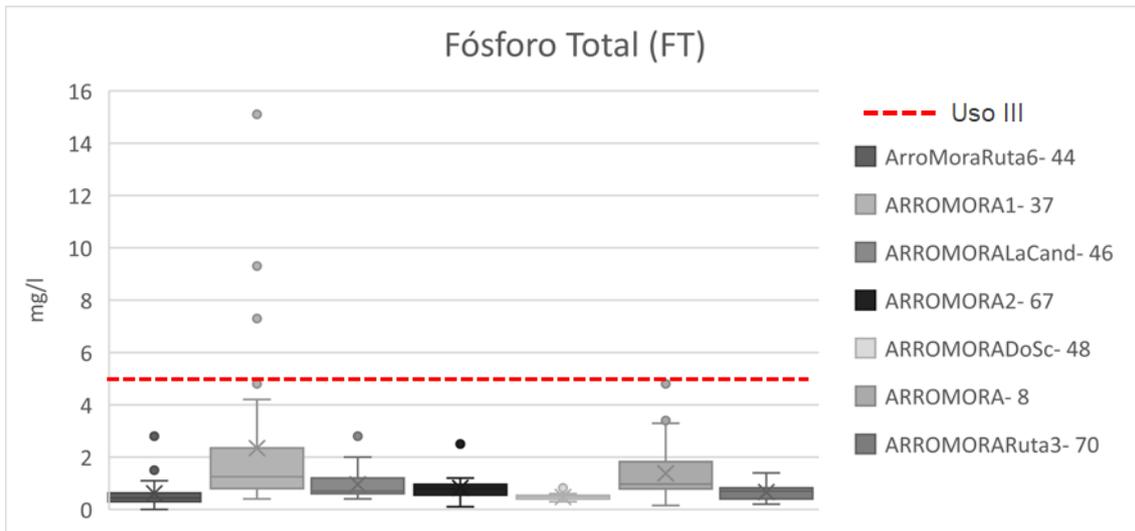
**Tabla 2.7:** Clasificación de condiciones tróficas en cuerpos de agua. NT= Nitrógeno total, PT=Fósforo total, (OECD, 1982).

Estadio Trófico	NT (µg/L)	FT (µg/L)
Oligotrófico	661	8
Mesotrófico	753	26,7
Eutrófico	1875	84,4

La Figura 2.15 y 2.16 muestran los valores de NT y FT. Los valores medios para NT son aproximadamente cinco veces mayores a los valores limitante para un estado Eutrófico y los valores medios de FT son tres órdenes de magnitud superiores, poniendo de manifiesto las claras condiciones eutróficas a lo largo de las siete estaciones estudiadas.



**Figura 2.15:** Valores históricos de Nitrógeno Total.



**Figura 2.16:** Valores históricos Fosforo Total.

El amoníaco está generalmente presente en aguas naturales, aunque en cantidades muy pequeñas, como resultado de la actividad microbiológica que causa la reducción de los compuestos que contienen nitrógeno. Cuando está presente en niveles superiores a 0.1 mg/L, se pueden indicar aguas residuales o contaminación industrial (USPA, 2001). En las Figuras 2.17 se observan que las estaciones ARROMORA1- 37 y ARROMORA-8 tiene valores atípicos sumamente alto respecto a las otras estaciones.

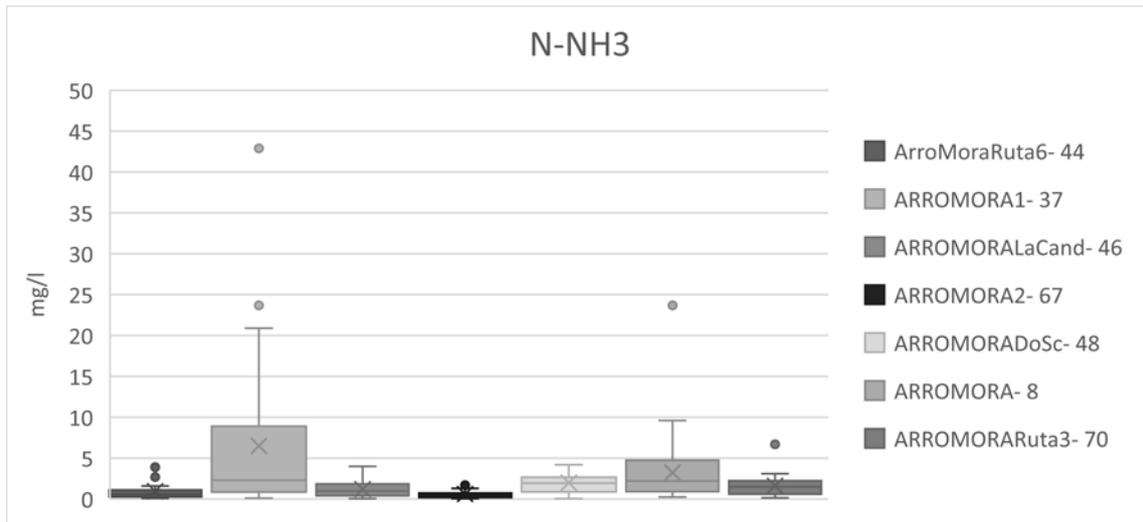


Figura 2.17: Valores históricos de N-NH3

Los valores medios de Nitratos aumentan cauce abajo (Figura 2.18). Los valores de Nitrito en aguas naturales sin contaminación no suelen superar el 1-2% del valor de Nitratos. Sin embargo, en la Figura 2.19 se observan que las concentraciones medias a lo largo del todo el Arroyo son bastante mayores a este porcentaje. Los Nitritos tenderán a estar en su forma reducida ( $\text{NH}_3$ ) u oxidada ( $\text{NH}_4$ ), por lo tanto, su detección es sinónimo de recientes aportes de contaminación.

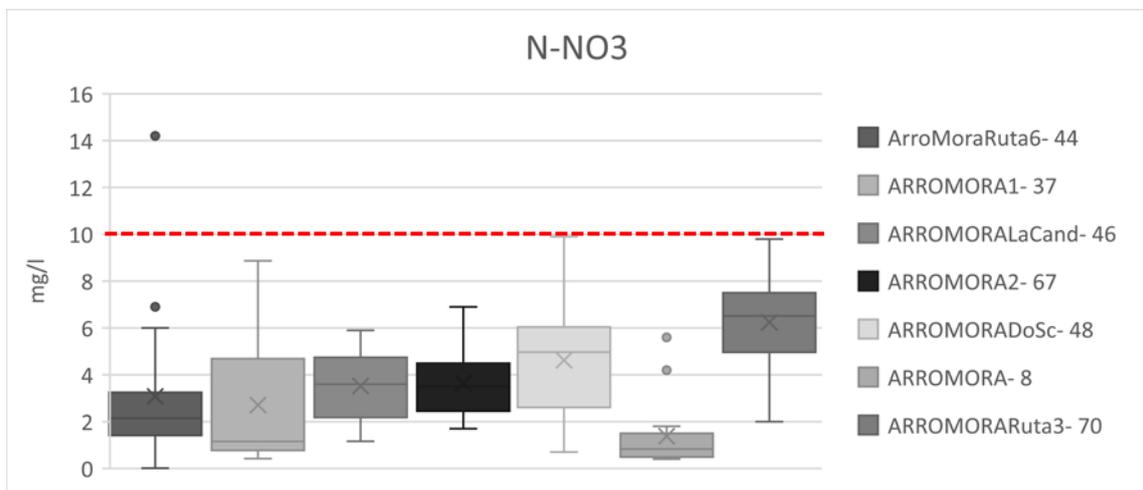


Figura 2.18: Valores históricos de N-NO3

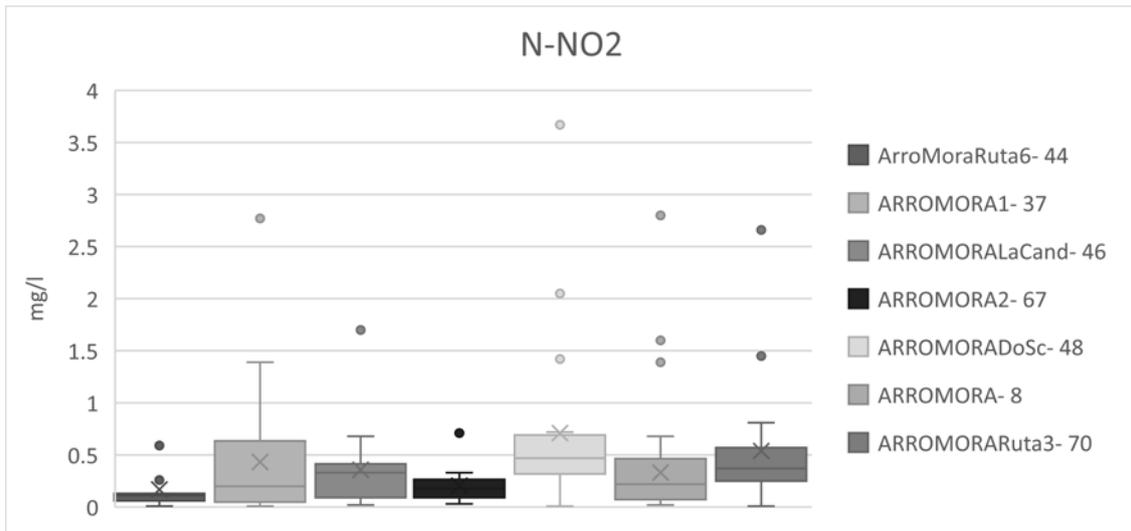


Figura 2.19: Valores históricos de N-NO2.

### 2.3.4.3 Hidrocarburos y Otros

Los parámetros presentados en esta sección son inudables indicadores de contaminación industrial. Por su parte los hidrocarburos pueden incluir, entre muchos otros; petróleo, aceite, grasa y materiales relacionados. Son causantes de interferencia con la transferencia de oxígeno del aire al agua. En la Figura 2.20 y 2.21 se ven dos claros focos de mayores concentraciones de Hidrocarburos Totales, Sustancias Fenólicas y Detergentes S.A.A.M: las estaciones ARROMORA1- 37 y ARROMORA-8. Se deduce el vuelco de efluentes industriales con hidrocarburos y detergentes en la cercanía de estos dos puntos.

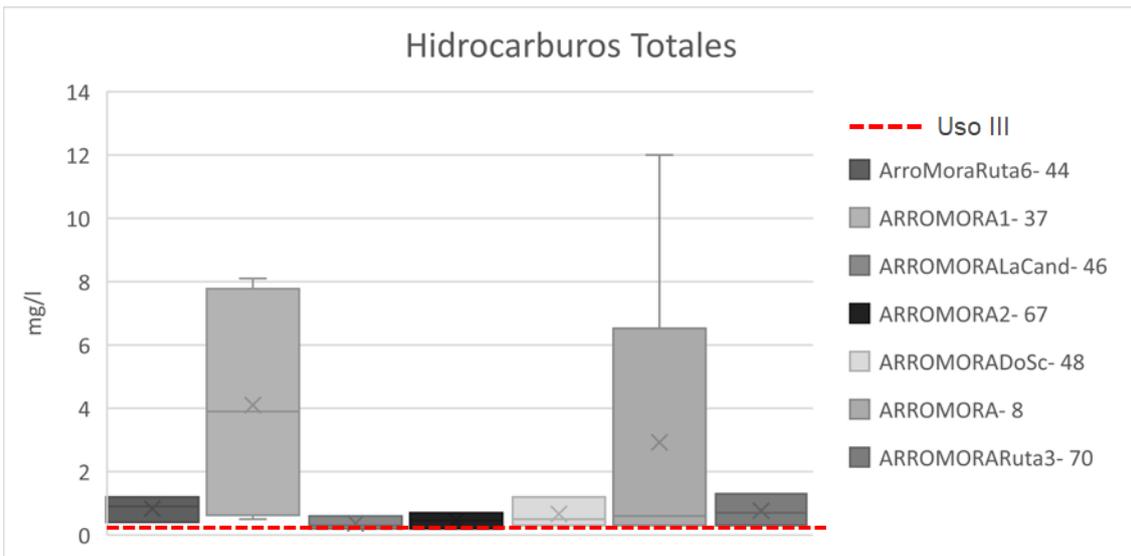


Figura 2.20: Valores históricos de Hidrocarburos Totales.

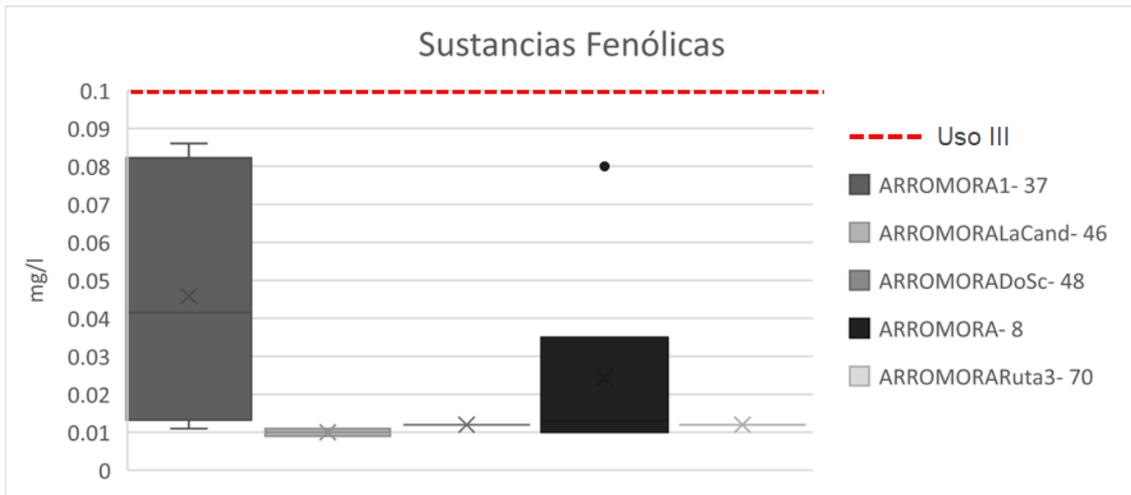


Figura 2.21: Valores históricos de Sustancias Fenólicas.

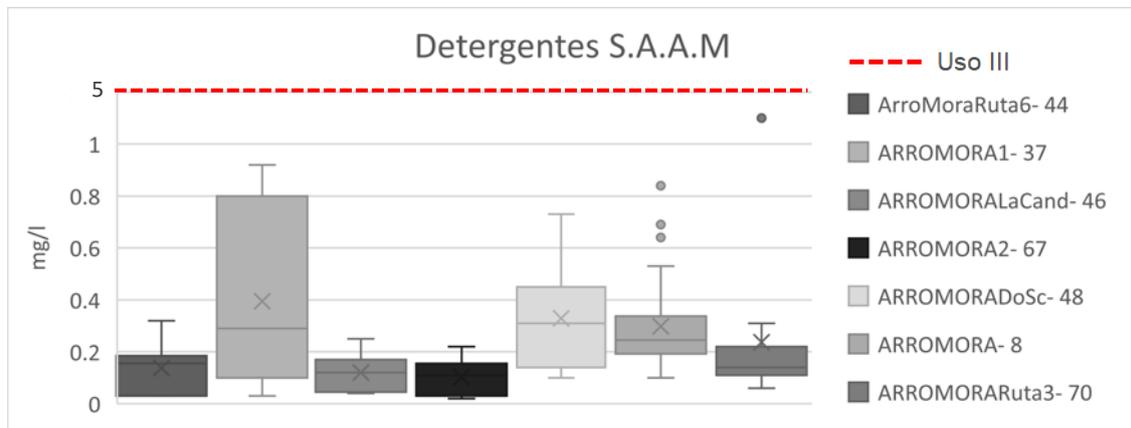


Figura 2.22: Valores históricos de Detergentes S.A.A.M.

Los Valores de Temperatura no muestran valores atípicos que puedan hacer sospechar de un vertido constante a altas temperaturas. Presentan una distribución propia de los cambios de estación anual.

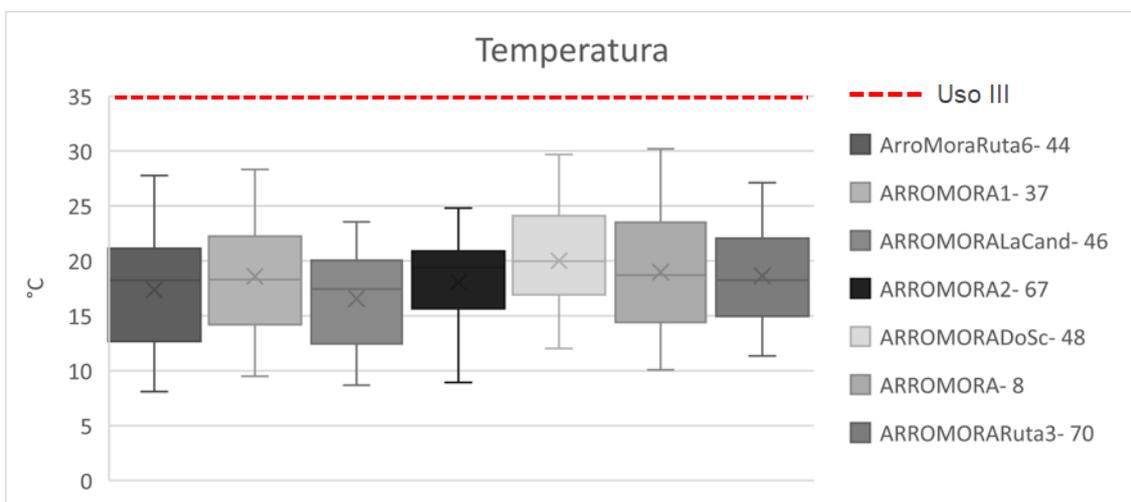


Figura 2.23: Valores históricos de DQO, DBO5, COT.

Los valores de pH presentan relativamente poca dispersión, excepto en la estación ARROMORA1- 37 y ARROMORA-8, lo que podría deberse a vuelcos ácidos y/o básicos generados por actividades industriales.

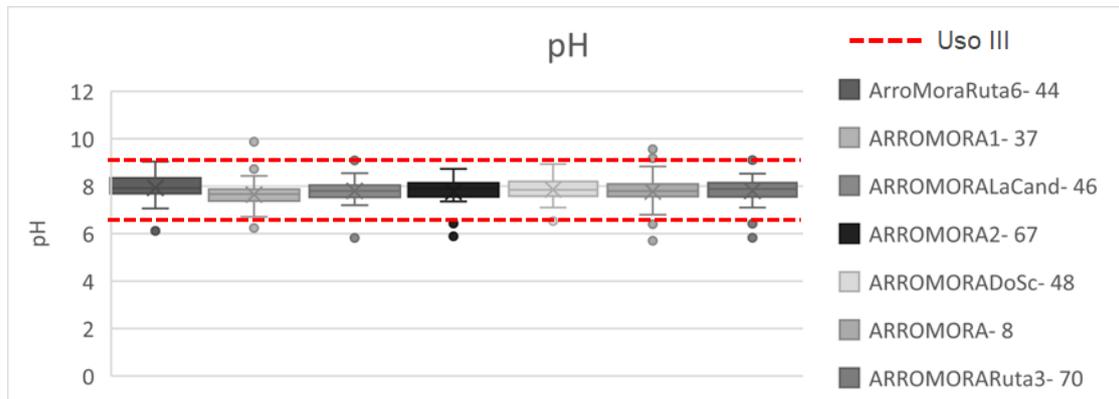


Figura 2.24: Valores históricos de DQO, DBO5, COT.

#### 2.3.4.4 Cumplimiento de Uso III

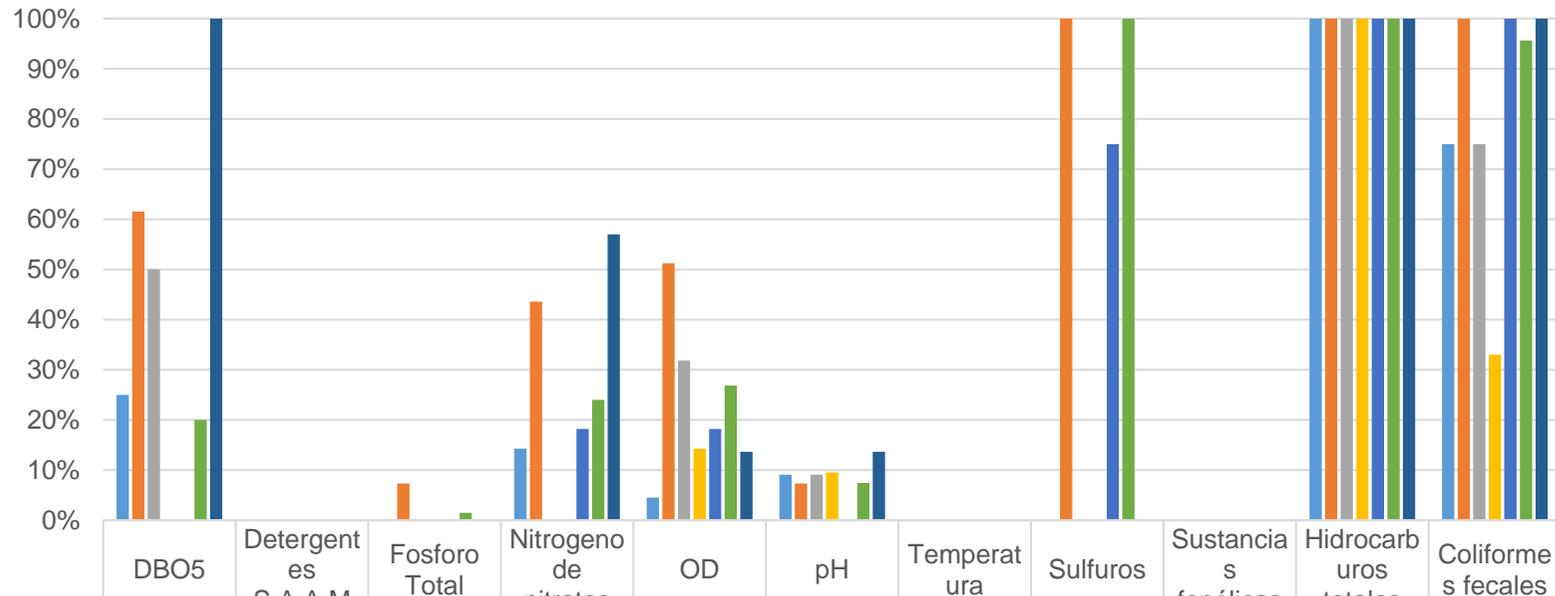
Se analizó el porcentaje de incumplimiento de los valores límites de los parámetros contemplados en el Uso III en las siete estaciones estudiadas, desde el 2008 hasta la fecha. A modo de síntesis se presenta la Figura 2.25 que presenta el porcentaje de incumplimiento para cada parámetro regulado a lo largo del A. Morales. Los datos faltantes en la tabla para las estaciones ArroMoraRuta6- 44 y ARROMORA2- 67 se deben a una ausencia de monitoreo de dicha variable para esa estación.

Comenzando desde un análisis espacial, se observa que las estaciones, cauce abajo; ARROMORA2- 67, ARROMORADoSc- 48, ARROMORA- 8, ARROMORARuta3- 70, presentan en general porcentajes de incumplimiento bastante mayores para la mayoría de los parámetros analizados respecto a las estaciones cauce arriba. Esto es coherente, por el hecho de que cauce abajo, hay más aportes de; tributarios con potenciales cargas de contaminantes; efluentes cloacales, industriales, etc.

Analizando los diferentes parámetros, resulta evidente la presencia de vuelcos cloacales debido a los elevados valores de concentraciones y porcentaje de incumplimiento de parámetros como Coliformes Fecales, DBO5 y Nitrógeno.

La estación ARROMORA1- 37, justo después de la confluencia con los tributarios ARROYO Chaves y La Paja, presenta valores de parámetros, muy superiores al límite de Uso III, como Sulfuros, Nitratos e Hidrocarburos Totales. Esto sugieren la posible presencia de actividad industrial y vuelcos clandestinos cercanos a esta estación.

**Porcentaje de incumplimiento Uso III**



	DBO5	Detergentes S.A.A.M	Fosforo Total	Nitrogeno de nitratos	OD	pH	Temperatura	Sulfuros	Sustancias fenólicas	Hidrocarburos totales	Coliformes fecales
■ ArroMoraRuta6- 44	25%	0%	0%	14%	5%	9%	0%			100%	75%
■ ARROMORA1- 37	62%	0%	7%	44%	51%	7%	0%	100%	0%	100%	100%
■ ARROMORALaCand- 46	50%	0%	0%	0%	32%	9%	0%	0%	0%	100%	75%
■ ARROMORA2- 67	0%	0%	0%	0%	14%	10%	0%			100%	33%
■ ARROMORADoSc- 48	0%	0%	0%	18%	18%	0%	0%	75%	0%	100%	100%
■ ARROMORA- 8	20%	0%	2%	24%	27%	7%	0%	100%	0%	100%	96%
■ ARROMORARuta3- 70	100%	0%	0%	57%	14%	14%	0%	0%	0%	100%	100%

**Figura 2.25:** Porcentaje de Incumplimiento de límites de parámetros de calidad de agua establecidos por el Uso III.

### 2.3.5 Conclusión

El caudal de información proporcionado por las campañas de monitoreo de ACUMAR es una valiosa herramienta. A partir de un tratamiento estadístico de los datos se pudo tener una interpretación temporal y espacial detallada de la calidad de las aguas de la CMR lo que permite tener un mejor criterio para la toma de decisiones respecto a eventuales estrategias de remediación. Además, se realizó una caracterización propia, determinando la mayoría de los parámetros estudiados en este análisis, la cual se detalla en la sección 4.2. Esta caracterización permitió comparar los resultados actuales con los históricos.

A partir del análisis histórico se concluye que el A. Morales es un curso de agua, que ha recibido y recibe el aporte de contaminantes de origen industrial, agrícola y cloacal, lo que genera concentraciones de materia orgánica y nutrientes suficiente para hacer de este Arroyo un cuerpo de agua eutrofizado. La presencia de parámetros indicadores de vuelcos industriales, sugiere la presencia de sustancias tóxicas para la biota y salud humana. Las estaciones ARROMORA1- 37 y ARROMORA-8 presentaron los valores de parámetros de calidad de agua más alarmantes, probablemente por la cercanía con tejidos urbanos y actividades agro-industriales. Ocho de los once parámetros regulados por el Uso III no cumplen con los valores límites establecidos.

En base al evidente deterioro ambiental y social generado por la contaminación del A. Morales, junto a la necesidad de ACUMAR de una búsqueda de estrategias para el saneamiento del mismo, se justifica y propone el uso de Humedales Construidos (HC) como tecnología de tratamientos de las aguas del A. Morales. Los mismos tienen atractivas ventajas frente a sistemas de tratamiento convencional, asociados principalmente a:

- Afrontabilidad económica por sus bajos costos de inversión, operación y mantenimiento.
- Sistemas capaces de funcionar íntegramente a partir de energías limpias desconectados de la red eléctrica
- Adaptabilidad del tratamiento frente a diferentes escenarios de operación.

En base al estado actual del Arroyo Medrano, el tratamiento más estratégico consiste en la remoción de contaminantes promotores de la eutrofización. De esta forma mejoraría integralmente todos los parámetros de calidad de agua, aumentando la capacidad de autodepuración del arroyo. Respecto a esto, autores como Kadlec (2009), Vymazal (2008) reporta abundante y actualizada evidencia acerca de la eficiencia de



remoción de una gran variedad de contaminantes mediante la utilización de HC, particularmente los presentes en las aguas del A. Morales.

Por último, es menester dejar en claro que la aplicación de sistemas de Humedales Construidos no es la solución total a la problemática ambiental en torno al A. Morales, sino que debe ser acompañada por una estrategia integral de saneamiento del Arroyo, que aborde la problemática desde la dimensión sociales, económica, legal y política.

A continuación se desarrollan los conceptos generales sobre humedales naturales y construidos, para sentar las bases teóricas de los próximos capítulos abocados al diseño y dimensionamiento de un Humedal Construido a Escala Piloto (HCEP) destinado al estudio de eficiencia de tratamiento de las aguas del A. Morales, como etapa previa y estrictamente necesaria a un dimensionamiento a escala real.

## 2.4 Humedales Naturales

La Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), de la cual la República Argentina es Parte Contratante por la Ley N° 23.919, define a los humedales como las extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporarias, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros. Aun cuando esta definición es inclusiva por su amplitud, su carácter enumerativo no permite identificar de forma inmediata cuál es la esencia de estos ecosistemas. De un modo más conceptual, en el marco del Inventario Nacional de Humedales de nuestro país, un humedal es un ambiente en el cual la presencia temporaria o permanente de agua superficial o subsuperficial causa flujos biogeoquímicos propios y diferentes a los ambientes terrestres y acuáticos. Rasgos distintivos son la presencia de biota adaptada a estas condiciones, comúnmente plantas hidrófitas, y/o suelos hídricos o sustratos con rasgos de hidromorfismo. Esta definición emergió por consenso de los participantes del Taller “Hacia un Inventario Nacional de Humedales” organizado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación el 14 y 15 de septiembre de 2016 (Quintana et al., 2017)

Las funciones, bienes y servicios ecosistémico de los humedales naturales fueron descritas por Kandus, Quintana, Minotti, Oddi, et al (2010) y se resumen en la Tabla 2.8:



**Tabla 2.8:** Funciones ecosistémico de los humedales y ejemplos de bienes y servicios asociados (tomado de Kandus et al., 2010)

<b>Función genérica</b>	<b>Funciones específicas</b>	<b>Bienes y servicios ecosistémico (ejemplos)</b>
Regulación hidrológica	Desaceleración de los flujos y disminución de la turbulencia del agua	Estabilización de la línea de costa / Disminución del poder erosivo
	Regulación de inundaciones	Disminución de la intensidad de los efectos de las inundaciones sobre los ecosistemas vecinos
	Retención de agua Almacenaje a largo y corto plazo	Presencia de reservorios de agua para consumo y producción
	Recarga de acuíferos	Reserva de agua dulce para el hombre para consumo directo y actividades productivas
	Retención y estabilización de sedimentos	Mejoramiento de la calidad del agua
	Regulación de procesos de evapotranspiración	Atemperación de condiciones climáticas extremas
Regulación biogeoquímica	Ciclado de nutrientes (nitrógeno, carbono, fósforo, etc.) Almacenaje/retención de nutrientes (ej. fijación/ acumulación de dióxido de carbono)	Retención de contaminantes / Mejoramiento de la calidad del agua / Acumulación de carbono orgánico como turba / Regulación climática
	Transformación y degradación de contaminantes	Mejoramiento de la calidad del agua / Regulación climática
	Exportación	Vía agua: sostén de las cadenas tróficas vecinas/ Regulación climática: emisiones de metano a la atmósfera
	Regulación de la salinidad	Provisión de agua dulce/ Protección de suelos / Producción de sal
Ecológicas	Producción primaria	Secuestro de carbono en suelo y en biomasa / Producción agrícola (ej. arroz) / Producción de forraje para ganado doméstico y especies de fauna silvestre de interés / Producción apícola Producción de combustible vegetal y sustrato para cultivos florales y de hortalizas (turba)
	Producción secundaria	Producción de proteínas para consumo humano o como base para alimento del ganado doméstico (fauna silvestre, peces e invertebrados acuáticos) / Producción de especies de interés para caza deportiva, pesca deportiva y comercial, turístico-recreacional
	Provisión de hábitat	Ambientes de interés paisajístico / Oferta de hábitat para especies de interés comercial, cinegético, cultural, etc. / Provisión de hábitats críticos para especies migratorias (particularmente aves) y para la reproducción de especies animales (particularmente aves, tortugas acuáticas, peces e invertebrados acuáticos)
	Mantenimiento de interacciones biológicas	Mantenimiento de cadenas tróficas de los ecosistemas vecinos / Exclusión de especies invasoras
	Mantenimiento de la diversidad tanto específica como genética	Producción de productos animales y vegetales alimenticios / Producción de productos vegetales para la construcción Producción de productos animales y vegetales no alimenticios (cueros, pieles, plumas, plantas y peces ornamentales, mascotas, etc.) Producción de productos farmacológicos y etnobiológicos (para etnomedicina, con fines religiosos, rituales, etc.)

## 2.5 Humedales Construidos

Los (HC), también llamados “artificiales”, son sistemas creados por el ser humano, los cuales desde un enfoque biomimético buscan emular los fenómenos físico-químico-biológicos de depuración de contaminantes propios de los ecosistemas de humedales naturales.

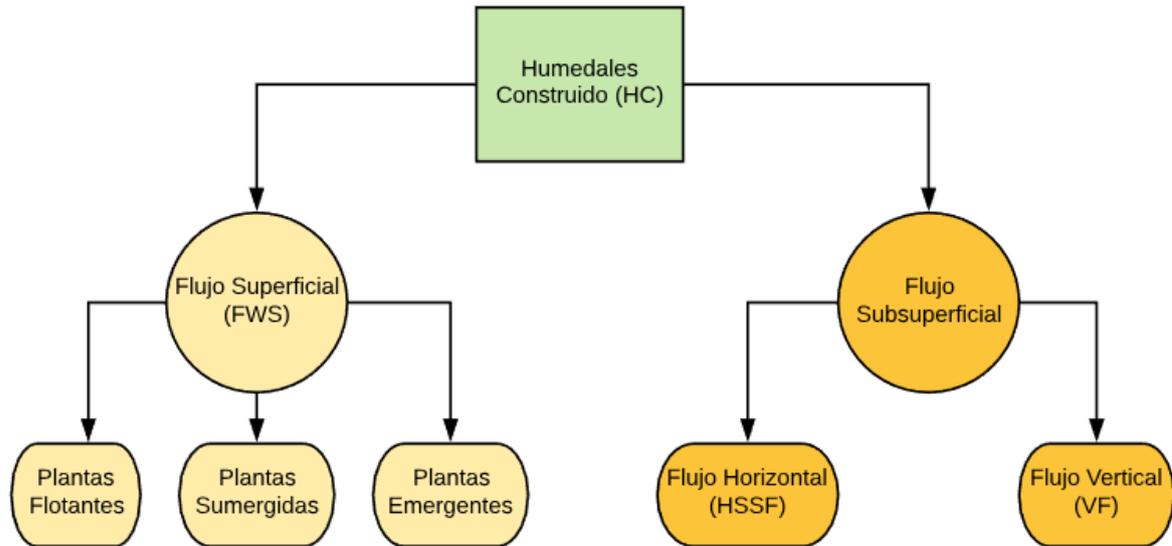
Las primeras aplicaciones de lo HC fueron para aguas residuales domésticas y municipales. Actualmente se siguen estudiando aplicaciones de HC para este tipo de efluentes, pero también, desde hace algunas décadas, el interés por el desarrollo y uso de esta tecnología de tratamiento ha tomado relevancia en el tratamiento de efluentes industriales y animales, efluentes mineros, aguas pluviales urbanas y agrícolas, remediación de aguas subterráneas, entre otras.

Existen una gran variedad de diseños, el cual dependerá del tipo de tratamiento y efluente a tratar. En rasgos generales estos consisten de una canalización con membrana impermeable, o reactor, donde se controla el caudal, dirección y tiempo de retención del efluente a tratar. Están conformados por cuatro elementos constitutivos: efluente, sustrato, vegetación y microorganismos.

Son varias las razones por las que los HC han cobrado relevancia e interés en el campo de tratamiento de efluentes contaminados. Esto radica, principalmente, en el diseño y funcionamiento relativamente sencillo, bajo costo de construcción, operación y mantenimiento respecto a otras tecnologías, y la importante evidencia científica de la eficiencia de depuración de muchos tipos de efluentes, que se ha registrado en países desarrollados como en vía de desarrollo a lo largo de décadas.

### 2.5.1 Clasificación

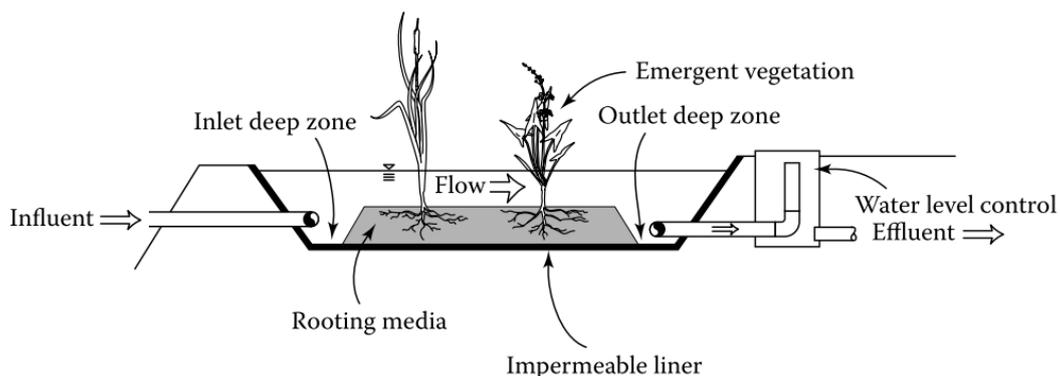
Actualmente los humedales construidos tienen más de un criterio de clasificación. Algunos de ellos son en función del tipo de vegetación y tipo de flujo dentro del humedal (Figura 2.26). Este último es el presentado por Kadlec (2009) y va a ser el adoptado en este trabajo, por ser mayoritario en la bibliografía consultada.



**Figura 2.26:** Tipos de Humedales construidos en función del tipo de flujo (adaptado de Kadlec & Wallace, 2009).

### ➤ Humedales de Flujo Superficial (FWS)<sup>1</sup>

Son similares a los humedales naturales por su ocupación de superficie con aguas abiertas, vegetación flotante y emergente. Ofrecen beneficios de hábitat similares a los humedales naturales atrayendo a una gran variedad de vida silvestre. Estos humedales generalmente se usan para pulir efluentes de procesos de tratamiento secundarios como lagunas, filtros de goteo o sistemas de lodos activos. Rara vez se utilizan como un proceso de tratamiento secundario independiente debido a su tamaño y requerimientos de amortiguación. Son la opción más elegida para el tratamiento de aguas pluviales y efluentes de origen animal (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009)

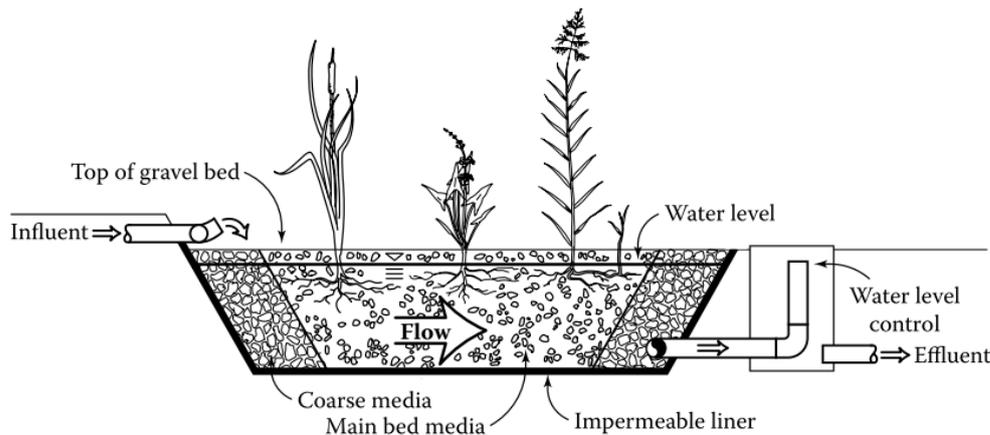


**Figura 2.27:** Elementos básicos de un humedal FWS (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009).

<sup>1</sup> Traducido al Inglés: Free Water Surface (FWS) wetlands.

➤ **Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial (HSSF)<sup>2</sup>**

A diferencia de los humedales FWS, el efluente a tratar se mantiene debajo de la línea de sustrato. Están compuestos por una vegetación de tipo emergente, enraizada en un sustrato como grava u otro lecho filtrante. Las aguas residuales se tratan a medida que fluyen a través del sustrato y alrededor de las raíces y rizomas de las plantas. Debido a que el efluente está por debajo del sustrato, no hay riesgo de exposición a patógenos y sustancias peligrosas. Su uso más común es el tratamiento primario de efluentes para un posterior tratamiento secundario (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009).



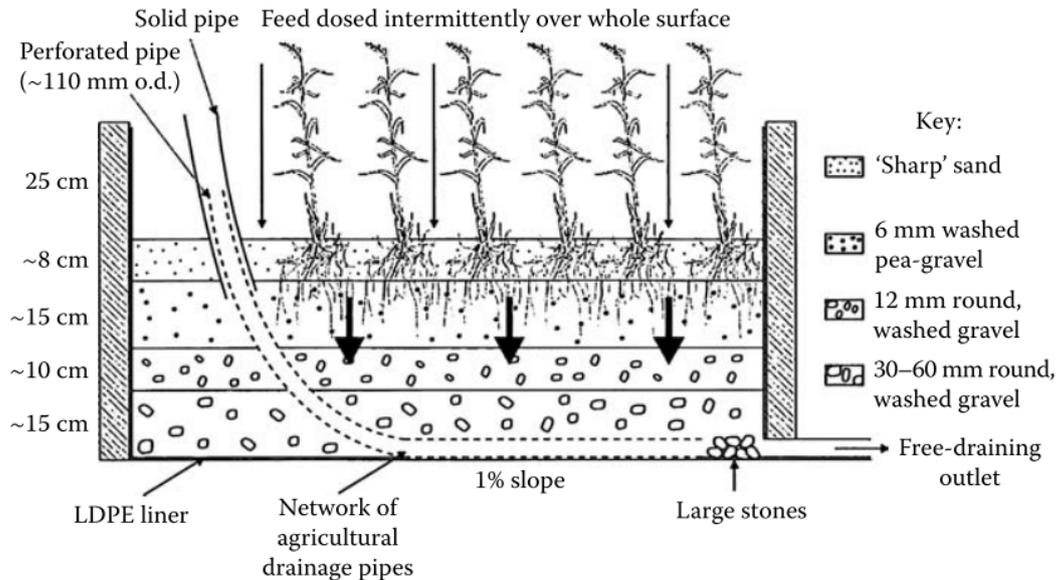
**Figura 2.28:** Humedal HSSF (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009).

➤ **Humedal de Flujo Vertical (VF)<sup>3</sup>**

Estos humedales han tenido más amplia en Europa, donde el objetivo del diseño es la oxidación del Nitrógeno presente en el efluente. Debido a que acumulan biosólidos en la superficie del lecho, pueden ser incompatibles con los estándares regulatorios norteamericanos, que generalmente prohíben la exposición a la superficie de material fecal. Sin embargo, los sistemas de FV se utilizan cada vez más en un contexto global (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009).

<sup>2</sup> Horizontal Subsurface Flow (HSSF) wetlands.

<sup>3</sup> Vertical Flow (VF) wetlands.



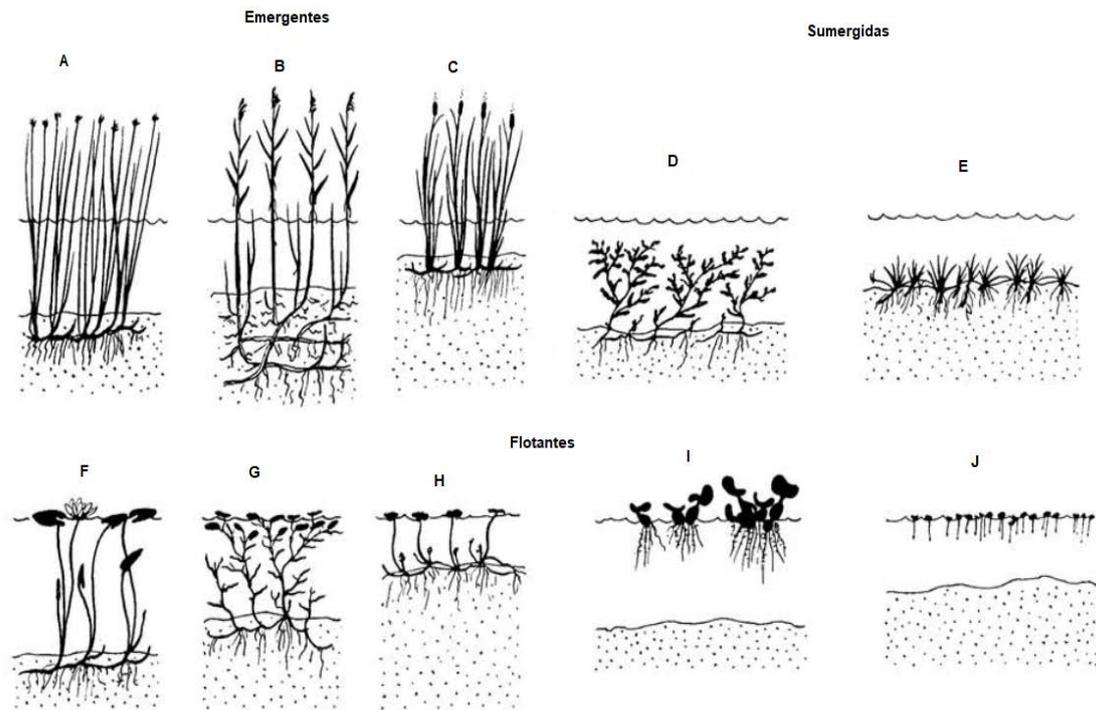
**Figura 2.29:** Humedal de Flujo Vertical (FV).

## 2.5.2 Vegetación

Las plantas propias de ecosistemas de humedales naturales, comúnmente conocidas como macrófitas acuáticas o hidrófitas, son organismos capaces de realizar un desarrollo reproductivo y vegetativo en un medio acuático o suelo inundado. Las plantas seleccionadas para un tratamiento con humedales construidos deben cumplir esencialmente tres requerimientos:

- Tolerancia a las condiciones climáticas predominantes en la región.
- Alta tolerancia al efluente a tratar.
- Eficiencia y eficacia en la remoción de contaminantes que quieren ser tratados

Las macrófitas pueden ser flotantes, sumergidas o palustres (Figura 2.30). Éstas últimas también se denominan helófitos, plantas emergentes o anfibas y son las que más importancia tienen en los procesos de depuración en humedales ya que tienen sus raíces hundidas en el suelo del fondo del humedal, pero que sus tallos y hojas, atraviesan la columna de agua, emergen por encima de la superficie y desarrollan las funciones propias de los vegetales (fotosíntesis, floración, reproducción, fructificación y diseminación, entre otras) en contacto con el aire atmosférico. A este grupo de plantas pertenecen los carrizos (*Phragmites spp.*), las espadañas (*Typha spp.*) y el lirio de agua (*Iris pseudacorus L.*), entre otros (Alarcón et al., 2018).



**Figura 2.30:** Esquema del tipo de macrófitas: A) *Schoeno plectus*, B) *Phragmites australis*, C) *Typha latifolia*, D) *Potamogeton crispus*, E) *Littorella uniflora*, F) *Nymphaea alba*, G) *Potamogeton gramineus*, H) *Hydrocotyle vulgaris*, I) *Eichhornia crassipes*, J) *Lemna mino*. Tomado de Kadlec (2009)

Las principales funciones de las plantas macrófitas en humedales construidos son:

- Asimilación de contaminantes como materia orgánica, nutrientes y metales en sus tejidos, por bio-adsorción y bio-absorción.
- Catalizadoras en las reacciones físico-química-biológicas de purificación.
- Transporte de oxígeno atmosférico hacia la rizósfera y sustrato produciendo un microambiente donde se favorece la degradación de materia orgánica y proliferación de microorganismos y metabolismos aeróbicos
- Sinergismo entre microorganismos (microbiota y mesofauna), proporcionando; superficies de residencia en tejidos vivos y muertos, fuentes de carbono y nutrientes
- Perdida de carga en el flujo de efluente a tratar
- Retención y acumulación de contaminantes en tejidos vivos y muertos.
- hábitat a la vida silvestre y valor paisajístico al entorno.



No hay duda de que las plantas macrófitas son esenciales para el rendimiento del tratamiento de efluentes en la mayoría de los sistemas de tratamiento de humedales. Los numerosos estudios que miden el tratamiento con y sin plantas han concluido casi invariablemente que el rendimiento es mayor cuando las plantas están presentes. Este hallazgo llevó a algunos investigadores a concluir que las plantas de humedales eran la fuente dominante de tratamiento debido a su absorción directa y el secuestro de contaminantes. Ahora se sabe que la absorción de la planta es el principal mecanismo de eliminación solo para algunos contaminantes, y solo en sistemas con poca carga. Durante periodos de rápido crecimiento, la inmovilización directa de contaminantes en plantas de humedales puede ser importante. Para muchos otros contaminantes, la absorción de la planta es generalmente de menor importancia en comparación con las transformaciones microbianas y físicas que ocurren en la mayoría de los humedales (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009)

### **2.5.3 Sustrato**

Se refiere a los materiales o medio filtrante que se colocan en el lecho del humedal y que entre sus funciones sirven de soporte para las plantas y el desarrollo del ecosistema, y puede incluir todos o algunos de los siguientes elementos: arena, grava, suelo, composta, etc. Generalmente, se incluyen varias capas de arena y grava de diferentes graduaciones, según las características del influente a tratar. El uso de arena gruesa contribuye a la eficiencia de los procesos de tratamiento, proporcionando la superficie para el crecimiento microbiano y soportando la adsorción y los procesos de filtración (Lara-Borrero, 1999)

Muchos suelos son adecuados para humedales construidos. Las propiedades del suelo que deben considerarse al seleccionar suelos incluyen la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el pH, la conductividad eléctrica (CE), la textura y la materia orgánica del suelo. (Edwards & DuPoldt, 2000)

### **2.5.4 Microorganismos**

Muchas reacciones de los humedales están mediadas por microorganismo, resultado de la actividad de bacterias levaduras, hongos y protozoarios. Muy pocos de estos organismos se encuentran flotando libremente; más bien, la gran mayoría están unidas a superficies sólidas. A menudo, los números son suficientes para formar



recubrimientos relativamente gruesos en superficies sumergidas. La transferencia de un producto químico del agua a superficies sólidas sumergidas es el primer paso en el mecanismo de eliminación microbiana general. Esas superficies contienen las biopelículas o *Biofilm* responsables del procesamiento microbiano, así como los sitios de unión para los procesos de sorción. Las raíces son el lugar para la absorción de nutrientes y químicos por parte de las macrófitas, a los que se accede mediante flujos de difusión y transpiración. Los materiales disueltos deben moverse desde la mayor parte del agua hacia la superficie sólida, luego difundirse a través de una capa de agua estancada hacia la superficie y penetrar en el biofilm mientras se realiza la transformación química. La formación de Biofilm es mayor en el extremo de entrada del humedal donde la carga orgánica es más alta. La pérdida de volumen de poros debido a la formación de biomasa reduce la conductividad hidráulica en esta zona de entrada. La materia orgánica se elimina a medida que las aguas residuales fluyen a través del humedal, lo que produce una disminución del crecimiento de biofilm. En la salida, donde los microbios solo disponen de pequeñas cantidades de materia orgánica, la formación de biofilm es despreciable (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009)

### **2.5.5 Mecanismos de remoción de contaminantes**

En la Tabla 2.9 se resumen brevemente los principales mecanismos de remoción de contaminantes en el tratamiento de efluentes con HC. Una descripción detallada de los mecanismos de remoción será desarrollada en la sección 5.4.4.

**Tabla 2.9:** Contaminantes más frecuentes y mecanismos de remoción.

Contaminante	Mecanismo de Remoción	Descripción
Materia Orgánica	Interacción de numerosos procesos físicos, químicos y bióticos	-Degradación bacteriana (Aeróbica y Anaeróbica) - Formación de biomasa, gas metano y compuestos recalcitrantes - Filtración y sedimentación - Incorporación por las plantas -Volatilización y precipitación química
Solidos Suspendidos	Procesos Físicos	Sedimentación, Filtración por medio granular Ocurre mayoritariamente en la entrada del humedal
Nitrógeno	- Reacciones bióticas y abióticas. - Reacciones de oxidación-reducción en interface aeróbica-anaeróbica	- Mineralización del N orgánico a nitrógeno amoniacal (regiones aerobias y anaerobias) - Inmovilización o asimilación del N por la biomasa microbiana y micrófitos - Nitrificación del amonio a nitrato (zonas aeróbicas) - Volatilización del amoniaco - Reducción del nitrato (Desnitrificación, reducción desasimilatoria y asimilatoria del nitrato) - Oxidación anaeróbica del amonio - Fijación biológica del N <sub>2</sub> tanto (zonas aeróbicas y anaeróbicas)
Patógenos	Muerte	- Retención causada por largos tiempos de retención hidráulicos. - Sedimentación/Filtración/Adsorción - Efecto bactericida de micrófitos - Condiciones desfavorables - depredación por protozoarios - Oxidación
Metales y metaloides	Retención en Sedimento	- Acumulación y especiación de contaminantes en el sedimento - Adsorción e intercambio catiónico Condiciones de Potencial Redox–pH del sedimento - Sedimentación - Procesos mediados por microorganismos - Adsorción y absorción de micrófitos

### 2.5.6 Eficiencias de remoción de humedales construidos

En la Tabla 2.10 se presentan las eficiencias de tratamiento de los humedales construidos de flujo sub-superficial con base en encuestas bibliográficas realizado por Vymazal & Kröpfelová (2008) . En la encuesta, solo se han incluido resultados a largo plazo de sistemas exteriores a gran escala y experimentales utilizando en la mayoría de los casos valores promedio anuales. Solo se han incluido los sistemas en los que estaban disponibles los datos de entrada y salida.

Puede observarse que al tratarse de efluentes directos las concentraciones de los parámetros presentados son bastantes mayores a los identificados en el análisis de calidad de agua del A. Morales a partir de datos históricos desarrollado en la sección 2.3.4. Esto se debe básicamente a que este es un cuerpo receptor de efluentes, con lo cual, por fenómeno de dilución, las concentraciones serán menores a efluente directos.

**Tabla 2.10:** Eficiencia de remoción para distintos efluentes. El número “n” indica el número de anual de mediciones y entre paréntesis el número de sistemas analizados. Tomado de Vymazal & Kröpfelová (2008).

<b>Todos</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>In (mg/L)</b>	<b>Out (mg/L)</b>	<b>Ef%</b>	<b>n</b>
DBO5	170	42	73,4	1143(438)
DQO	427	143	62,7	641(292)
SST	141	35,1	68,6	1076(367)
NT	63,1	36	39,7	476(208)
N org	20	9	53,7	192(93)
NH4-N	36,1	22,1	22,6	905(305)
FT	9,6	4,8	42,8	711(272)
<b>Municipal</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>In (mg/L)</b>	<b>Out (mg/L)</b>	<b>Ef%</b>	<b>n</b>
DBO5	178	32	80,7	746(261)
DQO	287	76	63,2	556(244)
SST	113	22,3	68,1	975(319)
NT	53	29,8	39,4	419(182)
N org	12,5	4,9	55,7	159(80)
NH4-N	28,4	17,1	21,1	789(254)
FT	8,7	4,4	40,9	643(247)
<b>Agrícola</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>In (mg/L)</b>	<b>Out (mg/L)</b>	<b>Ef%</b>	<b>n</b>
DBO5	464	183	68,2	43(19)
DQO	871	327	63	38(17)
SST	516	180	76,9	56(26)
NT	116	57,5	51,3	31(13)
N org	49,6	13,8	62,9	14(6)
NH4-N	71,5	39,6	33,8	45(18)
FT	19,8	8,5	54,3	44(18)
<b>Industrial</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>In (mg/L)</b>	<b>Out (mg/L)</b>	<b>Ef%</b>	<b>n</b>
DBO5	652	254	60,1	48(23)
DQO	1856	789	63,1	40(25)
SST	239	128	71,6	3 (17)
NT	138	102	27,8	18(8)
N org	1887	1558	329	11(5)
NH4-N	65,2	48,6	28	46(22)
FT	9,3	5,2	47,6	10(4)
<b>Lixiviado Relleno Sanitario</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>In (mg/L)</b>	<b>Out (mg/L)</b>	<b>Ef%</b>	<b>n</b>
DBO5	155	96	32,8	25(13)
DQO	933	698	24,9	7(6)
SST	391	86	54,5	8 (5)
NT	211	126	33,1	8(5)
N org	18,8	9,9	49,8	5(2)
NH4-N	162	98	38,7	25(11)
FT	1,7	0,29	66,1	11(3)

## 3. Análisis de Alternativas

El siguiente capítulo pretende mencionar las alternativas posibles y los criterios de selección empleados para la conformación de un Humedal Construido a Escala Piloto (HCEP) para el estudio de tratamiento de las aguas del A. Morales

Se evaluaron las mejores alternativas desde el punto de vista; económico, capacidad de remoción de los contaminantes de interés, diseño, construcción, operación y mantenimiento (O&M).

Si bien el presente proyecto se enfoca en un diseño a escala piloto, el mismo pretende estudiar la eficiencia de depuración para una eventual aplicación a gran escala.

**Es por ello que se seleccionaron las alternativas más convenientes en función de una aplicación a gran escala.**

El detalle de cada una de las alternativas seleccionadas, principios de funcionamiento y diseño final se desarrollan en la memoria descriptiva (capítulo 5)

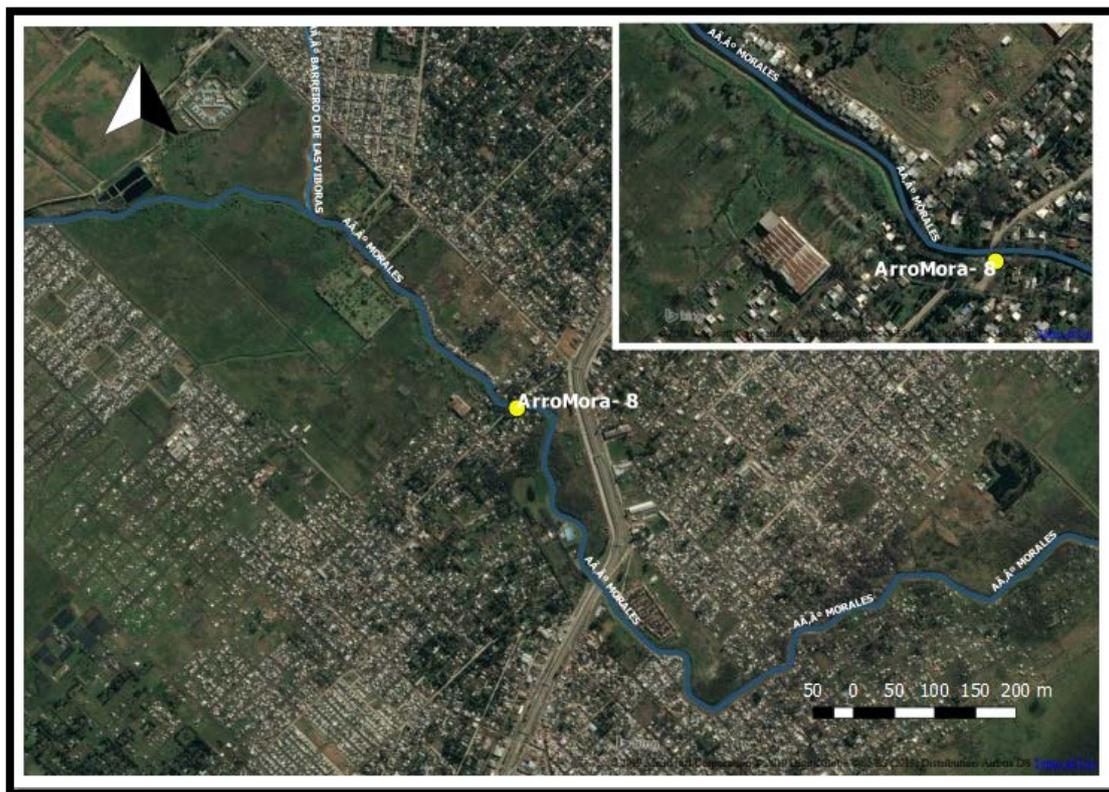
### 3.1 Ubicación del HCEP

Para la selección de posibles ubicaciones, se consideraron los sectores del A. Morales con valores de parámetros de contaminación más elevados y que a su vez presenten disponibilidad de terreno suficiente para la implementación de un HCEP.

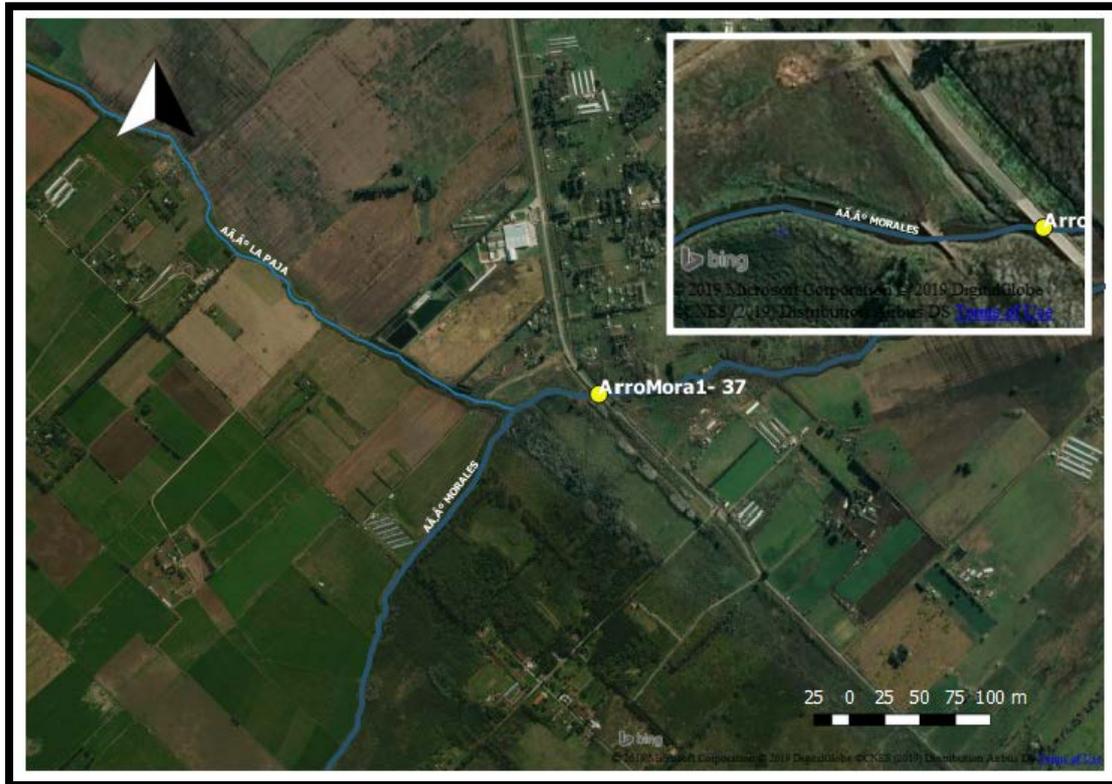
A partir del análisis de datos históricos (sección 2.3.4) se detectaron dos sectores los cuales presentaron los valores más elevados de parámetros de contaminación y el mayor porcentaje de incumplimiento del USO III, establecido por la normativa vigente. Estos corresponden a las estaciones de monitoreo: ARROMORA1- 37 y ARROMORA- 8 (Figura 3.1 y 3.2). La estación ARROMORA1- 37 tiene la particularidad de ser un punto ubicado en los primeros kilómetros cauce del Arroyo, en una zona de tipo urbano-rural, donde no abundan las industrias y tejidos urbano. Sin embargo, su calidad de agua, evidencias parámetros de contaminantes con valores similares y en algunos casos superiores a estaciones como la ARROMORA- 8, cauce abajo, donde se esperaría que, por la cantidad de tributarios y aportes de vertidos, estos tengan valores superiores. Ambos puntos, presentan valores de contaminación suficientemente altos para justificar la posible ubicación del HCEP.

Respecto al territorio disponible, ambos puntos cuentan con superficies suficientes para la construcción de un HCEP. La estación ARROMORA- 8, sin embargo, presenta tejido urbano muy próximo a la rivera, y no se encontró información de terrenos público en este sector, lo cual representa una dificultad en la adquisición o posible préstamo del mismo.

La estación ARROMORA1- 37, posee gran extensión de terreno, principalmente porque se trata de una zona urbano-rural, con tejido urbano a una distancia de 10 km. Otra particularidad es que la estación de monitoreo se encuentra dentro del ex basural de Marcos Paz, hoy conocido como “Parque temático Batalla de Villamayor” donde se desarrolla la generación de un biocorredor, proyecto que tiene como objetivo la restauración y recomposición del hábitat degradada por el antiguo basural. En el mismo participan entidades referentes como ACUMAR, CONICET, el Instituto de Limnología “Dr. Raúl A. Ringuet” (ILPLA), y la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM). De esta forma, el biocorredor, sirve como un espacio de desarrollo de investigación científica y educativo para la sociedad. Por esto último, este punto representa grandes ventajas frente a otras posibles ubicaciones. Además de su fácil acceso y la posibilidad de uso de terreno sin la necesidad de compra o alquiler, el HCEP representaría un proyecto de interés para la actividad científica que se desarrolla dentro del biocorredor.



**Figura 3.1:** Estación de Monitoreo ARROMORA- 8.



**Figura 3.2:** Estación de Monitoreo ArroMora1- 37.

### 3.2 Captación y Bombeo del Agua de Arroyo

Los HC se usan convencionalmente para efluente puntuales, comúnmente industriales o domiciliarios, donde existe una diferencia de altura entre el nivel del ingreso del efluente a tratar y su lugar de vertido. Esta diferencia de altura, proporciona la energía potencial necesaria, para que el efluente fluya a través del HC superando las pérdidas de fricción dentro del humedal. En base a esto, el tratamiento de aguas de un arroyo, representa particularmente dos dificultades en la hidráulica del sistema:

- 1) Altas cargas hidráulicas: caudales de ingreso superiores a los caudales promedio de efluentes industriales y domiciliarios tratados en HCs
- 2) Al tratarse de un arroyo de planicie, la pendiente del río es sumamente baja (aproximadamente del orden del 1%)

La primera dificultad, se resuelve con el correcto diseño y dimensionamiento del sistema, asegurando fundamentalmente una buena conductividad hidráulica. La segunda cuestión es más compleja, ya que es necesario elevar una fracción del caudal para que este tenga la energía suficiente y atravesase el HC.

Dado que los aspectos hidráulicos son críticos para los HC, se consideró adecuado realizar una entrevista al Ing. Maximiliano Schwerdtfeger para evaluar las alternativas más adecuadas para el caso de un HCEP. Se determinó que el tratamiento a gran escala de un arroyo de planicie mediante HC solo funcionaría a gravedad, si se genera el gradiente de altura a partir de un represamiento, suficiente para superar las pérdidas de carga dentro del HC. Como el HCEP contempla el tratamiento a escala piloto de un bajo caudal, el represamiento del A. Morales no sería justificable debido a los impactos ambientales negativos asociados. Al tratarse de un sistema continuo el uso de una bomba eléctrica quedó descartado debido al costo económico operacional asociado. Ante esta disyuntiva, se concluyó que para los requerimientos hidráulicos del HCEP lo más adecuado es el uso de un sistema de elevación de agua a partir de fuentes de energía renovables.

Estudiando el mercado se encontraron dos posibles opciones que mejor se adecuan a este proyecto. Estas son:

a) Bomba eléctrica abastecida por Paneles Solares (Figura 3.3):

Se trata de una bomba centrífuga de la empresa Enertik, modelo: BSQB-47-500-48V con una capacidad máxima de bombeo de 3.3 m<sup>3</sup>/h a una altura máxima 46m y una potencia de 500W, permitiendo ser instalada en lugares remotos. No requiere baterías para su funcionamiento y es de bajo mantenimiento.



**Figura 3.3:** Bomba centrífuga Enertik, modelo BSQB-47-500-48V.

b) Bomba hidropulsada (Figura 3.4)

Esta bomba de nombre comercial “Barsha” fue diseñada como una tecnología de riego continuo de cultivos, sustentable y de muy bajo mantenimiento. Funciona a partir del impulso de agua en movimiento haciendo girar un mecanismo en espiral. A partir de fenómeno de compresión de aire dentro del espiral, el agua es captada y elevada por una manguera de 1.5 pulgadas. La versión actual con 1.5 m de diámetro es capaz de bombear 1.6 m<sup>3</sup>/h, las 24 hs del día, a una altura vertical máxima de 20 metros y 2 km de distancia horizontal. Funciona independientemente de la energía eléctrica y/o combustibles. Los costos de mantenimiento son prácticamente nulos.



**Figura 3.4:** Bomba Hidropulsada Barsha.

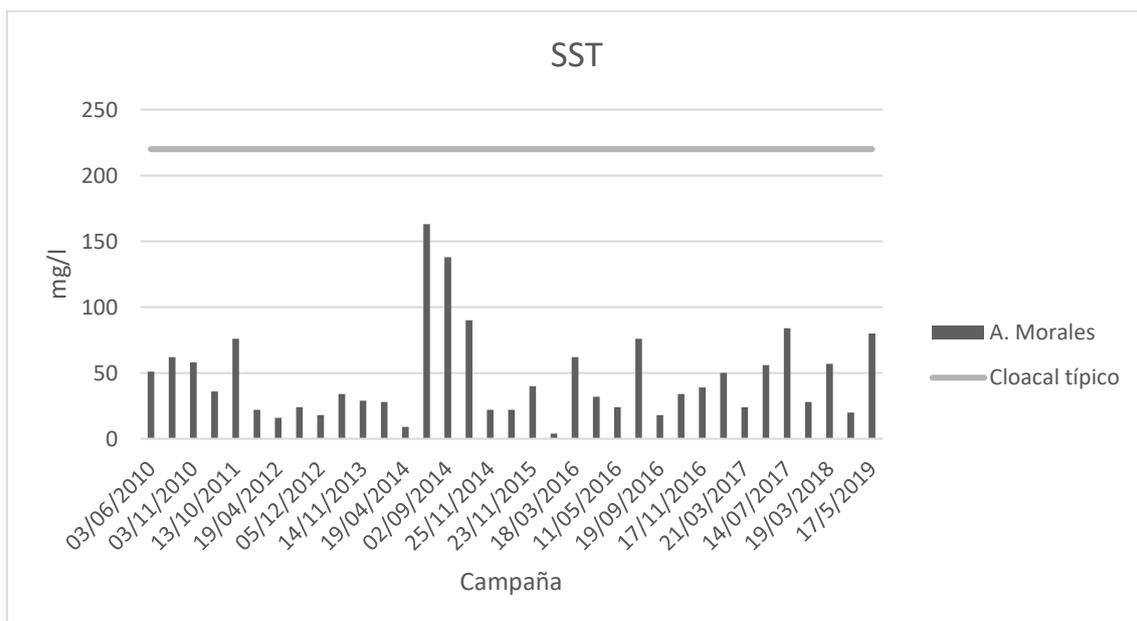
Ambas alternativas tienen una capacidad de bombeo suficiente para el sistema de HCEP que quiere diseñarse. Los costos de la bomba alimentada por energía solar, incluyendo los paneles solares necesarios, son equiparables a los de la bomba hidropulsada. Esta última, si bien tiene una capacidad menor de bombeo, tiene la gran ventaja de poder funcionar las 24 hs del día. Para un sistema de HC, esto es fundamental ya que asegurar una irrigación permanente a la vegetación del sistema. Es por ello que el caudal a tratar por el sistema de HCEP será bombeado por la bomba Barsha, utilizando la misma energía del A. Morales para el funcionamiento de la bomba. Las especificaciones técnicas de la misma se encuentran en el Anexo I

### 3.3 Pre-tratamiento

El tratamiento convencional con humedales construidos, destinado típicamente a la depuración de efluentes cloacales, contempla en la mayoría de los casos, una unidad de pretratamiento para desbaste de sólidos gruesos y sedimentación de los sólidos suspendidos. Este resulta de gran importancia para evitar complicaciones en el funcionamiento hidráulico del sistema, principalmente el “*clogging*” o taponamiento el cual se desarrollará con más detalle en sección 5.5

Al tratarse de un tratamiento de aguas de arroyo, se podría considerar a este lo suficientemente diluido para omitir un sistema de sedimentación como pretratamiento. Sin embargo, bajo circunstancias de precipitaciones o crecidas abruptas del, el arroyo incrementa considerablemente la concentración de SST, aproximándose a valores de un efluente cloacal según Metcalf & Eddy (2014) (Figura 3.5). En ausencia de un sistema de pretratamiento, las partículas finas de sedimento resuspendidas y las provenientes de la escorrentía (arena, limo, arcilla) ingresarían al humedal depositándose y acumulándose en el tiempo, favoreciendo el fenómeno de *clogging*. Es por ello, que la separación previa de dichas partículas con un sistema de sedimentación primario resulta esencial.

La separación de sólidos de mayor tamaño como ramas, materiales plásticos, hojas, etc., no será necesaria, ya que la bomba hidropulsada no permite el ingreso de dichos sólidos en el caudal elevado. Este ingresa por pequeños orificios con una fina malla metálica, evitando el paso de materiales gruesos. Esto representa una gran ventaja al evitar la construcción de un sistema de rejas o cribado fino.



**Figura 3.5:** Variación en la concentración de SST en la estación ArroMora1- 37. El valor de referencia de SST de un efluente cloacal típico.



### 3.4 Selección del tipo de Humedal

Los tres tipos básicos de sistemas de tratamiento de humedales son los de flujo subsuperficial (FWS), flujo horizontal subsuperficial (HSSF) y los humedales de flujo vertical (VF). Los dos tipos más comunes de tratamiento de humedales, especialmente durante la historia temprana de la tecnología, son los humedales FWS y HSSF. Los humedales FWS están densamente vegetados por una variedad de especies de plantas y típicamente tienen profundidades de agua del orden de 0,3. Se ha utilizado una amplia variedad de plantas sumergidas, emergentes y flotantes las cuales pueden proporcionar una optimización desde el punto de vista hidráulica y la mejora del hábitat de la vida silvestre. Los humedales HSSF usan un lecho de tierra, grava u otro material como sustrato para el crecimiento de plantas enraizadas. Las aguas residuales fluyen por gravedad, horizontal o verticalmente, a través del sustrato del lecho, donde entran en contacto con una mezcla de microbios facultativos que viven en asociación con el sustrato y las raíces de las plantas. La profundidad del lecho en los humedales de flujo HSSF es típicamente del orden de 0,6 m y la mayoría del lecho saturado se encuentra en condiciones anaeróbicas (R. H. Kadlec, 2009).

Dado que los humedales construidos, son sistemas complejos y muy heterogéneos, no se puede afirmar que un tipo de sistema es superior al otro en términos de eficiencia de remoción, capacidad hidráulica, costos, operatividad, etc., sino que, hay que considerar el contexto, necesidades, objetivos y limitaciones de cada caso en particular, para poder elegir con el mejor criterio posible.

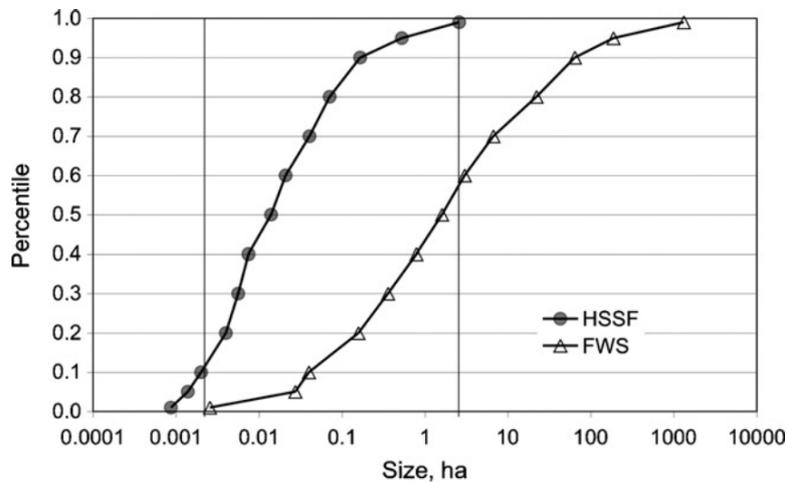
#### 3.4.1 Factores analizados

A continuación, se detalla los factores analizados para la selección de tipo de HCEP para el A. Morales. Para el análisis se contemplaron los sistemas HSSF y FWS y se fundamentó en gran medida por los resultados del documento de Kadlec (2009) el cual presenta información que deriva de tres tipos de fuentes: bases de datos, informes de proyectos y documentos publicados. Para tener una idea de la dimensión de la cantidad de información recopilada y analizada por Kadlec, por ejemplo, para la comparación de eficiencia de remoción de DBO, se estudiaron aproximadamente 400 FWS y 200 HSSF de países como Nueva Zelanda, Bélgica, Austria, República Checa, Australia, Canadá, China, Finlandia, Hungría, India, Irlanda, Italia, Japón, Marruecos, Países Bajos, Nueva Zelanda, Noruega, Perú, Polonia, Eslovenia, Sudáfrica, Suecia, Taiwán, Reino Unido, EE. UU y otros.

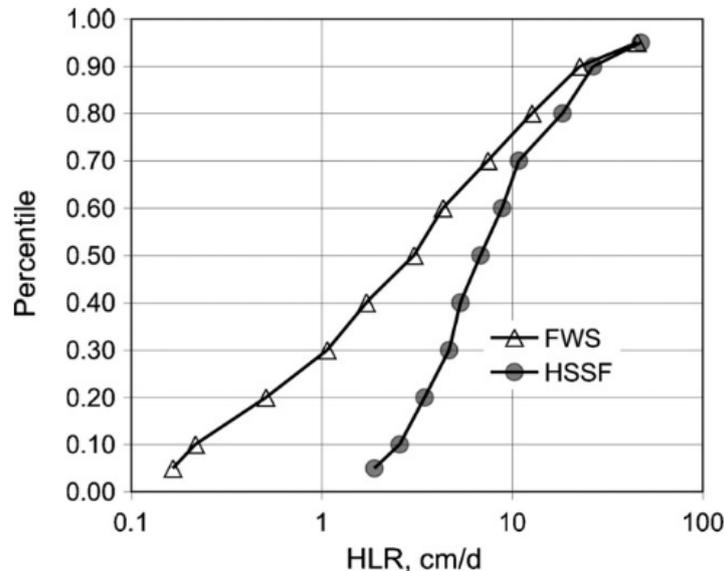
### a) Dimensión y rangos operativos

El tamaño constituye el conjunto de información más grande para ambos tipos de humedal. Los HSSF se emplean en un rango de tamaño mucho más pequeño que los humedales FWS (Figura 3.6). La mediana para FWS corresponde a 1.60 ha mientras que la mediana de los HSSF es 140 m<sup>2</sup>, aproximadamente 100 veces menor.

Los humedales de flujo subsuperficial se operan con tasas de cargas hidráulicas (TCH) más altas que los humedales FWS. Esta se define como el equivalente de lluvia de un flujo y son de aproximadamente 3 cm / d para FWS, y 7 cm / d para HSSF (Figura 3.7).



**Figura 3.6:** Distribución de tamaño (ha) para los humedales FWS (N=330) y HSSF (N=710). (tomado de Kadlec, 2009).



**Figura 3.7:** Distribución de TCH (cm/d) para los humedales FWS (N=330) y HSSF (N=710). Tomado de Kadlec, (2009).

La profundidad de funcionamiento típica para FWS es de aproximadamente 30 cm. Para HSSF, la profundidad de operación típica es de 50 cm. Los tiempos de retención

hidráulicos correspondientes son 9.3 días para FWS y 2.9 días para HSSF, o sea, tres veces menores.

## b) Eficiencia de remoción de contaminantes

Se investigó las eficiencias de remoción documentadas de diferentes sistemas de HC, con especial foco en los contaminantes de interés para el caso del A. Morales, particularmente la materia orgánica y nutrientes promotores de la eutrofización, (ver discusión de estos contaminantes en *sección 2.3.2*). Se obtuvo información de gran valor obtenida a partir modelos matemáticos para la estimación de concentración de contaminantes en los sistemas de HC que contemplan un amplio número de variables. Un estudio de Rousseau (2008) revisó y comparó los modelos utilizados hasta esa fecha, concluyendo que el modelo de primer orden “P-k-C\*” propuesto por Kadlec & Wallace (2009) era la mejor herramienta de diseño de humedales construidos disponible. Este se desarrollará con más detalle en la sección 6.2.1 y aquí se presentan las constantes de primer orden recopiladas por Kadlec y Wallace. “N” representa el número de humedales estudiados, “PTIS” es el número aparente de celdas, “C\*” la concentración de fondo y “k” la constante superficial de primer orden. El área de humedal necesaria para una reducción de un contaminante es inversamente proporcional al valor k para PTIS fijo y C\*. Con lo cual, a mayor k, se necesitará una menor área de humedal para la reducción de cierto contaminante.

Los análisis de rendimiento documentados por Kadlec (2009) muestran que los FWS son más pequeños para el tratamiento de cargas medias y altas de DBO y cargas altas de; NH<sub>4</sub>, TN, TP, mientras que HSSF son más pequeños para cargas bajas de DBO, NO<sub>x</sub> y patógenos bajos.

**Tabla 3.1:** Número de humedales y constantes utilizadas para el modelo de primer orden P-k-C\*

		FWS				HSSF			
		N	PTIS	C* (mg/L)	k (m/año)	N	PTIS	C* (mg/L)	k (m/año)
<b>DBO (mg/L)</b>	0-30	203	1	2	<b>33</b>	52	3	1	<b>86</b>
	30-100	77	1	5	<b>41</b>	53	3	5	<b>37</b>
	100-200	63	1	10	<b>36</b>	51	3	10	<b>25</b>
	>200	43	1	20	<b>189</b>	27	3	15	<b>66</b>
<b>N</b>	Nitrificación	118	3	0	<b>14,7</b>	214	6	0	<b>11,4</b>
	Desnitrificación	72	3	0	<b>27</b>	216	6	0	<b>42</b>
	TN	116	3	1,5	<b>12,6</b>	123	6	1	<b>8,4</b>
<b>Fosforo</b>	Fósforo	282	3,4	0,002	<b>10</b>	82	6	0	<b>6</b>



### **c) Exposición**

Unos de los factores de mayor peso en la elección de un sistema de humedal, es el potencial contacto que los efluentes tratados en el mismo puedan tener con personas o animales. En este sentido, los humedales FWS, al asemejarse a un humedal natural y tener superficies de efluente expuestas al aire libre, pueden generar la posibilidad de contacto humano y atraer diferentes tipos de animales como aves, anfibios, peces, mamíferos e insectos, los cuales pueden habitar y proliferar en el sistema. La proliferación de insectos, especialmente el mosquito, es muy común, pudiendo generar molestias en las comunidades cercanas. Dependerá del criterio de diseño, si lo descripto anteriormente es una ventaja o desventaja, ya que muchas veces se pretende desarrollar sistemas lo más naturales posibles, generando distintos beneficios ecosistémico.

Los humedales HSSF tienen características muy distintas en este sentido. Dado que su flujo es sub-superficial, ósea que la superficie del efluente a tratar está por debajo del lecho, no hay posibilidad de contacto o interacción con personas o animales. También se evita la proliferación de mosquitos. Esto trae ventajas operativas, evitando control de plagas y problemas asociados al contacto humano.

### **d) Costos**

Para un análisis económico, lo mejor es realizar una comparación de los costos asociados al tratamiento de una determinada cantidad de contaminante para ambos sistemas ya que, como se explicó anteriormente, los rendimientos por unidad de área de los FWS Y HSSF son distintos.

Kadlec (2009) resume que los costos de construcción de ambos tipos de humedales son esencialmente los mismos, a excepción del material utilizado para el sustrato del HSSF, que es el que determina una clara diferencia económica, elevando el costo de un sistema HSSF alrededor de tres veces más que un sistema FWS para el mismo trabajo de eliminación de contaminantes. Los costos de energía son mínimos o nulos cuando se trata de flujos impulsados por gravedad. El monitoreo de la calidad del agua es a menudo una parte principal de los costos de operación y mantenimiento.

Desde el punto de vista operativo estos suelen ser bastante bajos para ambos sistemas. El mayor costo de O&M de los humedales FWS están asociados al control de plagas animales e insectos y al control vegetal. Respecto a los humedales HSSF, el

mayor costo se asocia a la eliminación de obstrucciones en la zona de entrada del sistema, conocido como “*Clogging*”.

Tanto los FWS como HSSF tienen problemas y costo asociados a la O&M, sin embargo, estos son mucho menor a cualquier sistema convencional de tratamiento. No parece haber un factor de decisión contundente para la selección de uno u otro en función de los costos de O&M.

### 3.4.2 Resumen y Conclusión

En base al análisis de factores realizado, se determinó que tipo de sistema es el más indicado para un humedal a escala piloto en el A. Morales. A modo de resumen, se realizó la Tabla 3.2 donde se detallan las variables y valores discutidas anteriormente para una toma de decisión. Los colores verdes y rojos, representan los valores más y menos deseables respectivamente.

**Tabla 3.2:** Variables analizadas como factor de selección para el sistema de humedal construido.

Variables	FWS	HSSF
Dimensión (ha) (mediana)	1,6	0,014
Rangos operativos		
HLR (cm/d)	3	7
T retención hidráulico (d)	9,3	2,9
Eficiencia de remoción de contaminantes, expresada con k (m/año)		
[DBO] terciarias (0-30mg/L)	33	86
[DBO] secundarias (30-100 mg/L)	41	37
[DBO] primarias (100-200 mg/L)	36	25
[DBO] súper (>200 mg/L)	189	66
NH <sub>4</sub>	14,7	11,4
TN	12,6	8,4
TP	10	6
NO <sub>x</sub>	27	42
Patógenos	Baja	Alta
Exposición	Alta	Muy Baja
Costos	Bajos	Bajo

Respecto a la dimensión, lo más conveniente suele ser la utilización de la menor superficie posible debido a los costos y disponibilidad de terreno. En el caso puntual de este proyecto, el espacio no es una limitante, debido a que en la ubicación seleccionada tendría una superficie suficiente para cualquiera de los dos sistemas (sección 3.1). Sin



embargo, pensando el sistema de humedal construido como posible sistema de tratamiento a escala real, en distintas regiones de la cuenca matanza riachuelo, el espacio si sería una limitante, ya que estaríamos hablando de diseños de una superficie importante, en regiones con tejido urbano sumamente denso, propio de esta cuenca. En tal sentido, el sistema HSSF es el más conveniente.

Los rangos operativos son otro factor crítico para este proyecto. La gran mayoría de los tratamientos de humedales construidos que se describen por la USEPA (2000), Kadlec (2009) y Vymazal (2008), están destinados al tratamiento de efluentes originados por diferentes actividades industriales, efluentes cloacales, agrícolas, etc. En este proyecto, se pretende diseñar un sistema que se acople a la depuración de las aguas de un Arroyo. Para ello, el sistema debiera soportar una alta carga hidráulica y tener un tiempo de retención lo suficientemente pequeño para evitar sobredimensionamientos del sistema, y al mismo tiempo asegurar el tiempo suficiente para el tratamiento adecuado de los contaminantes que se quieren tratar. Los sistemas HSSF poseen mayor capacidad hidráulica y menores tiempos de retención que el FWS, convirtiéndolo desde este punto de vista en la mejor opción para el tratamiento de aguas de Arroyo.

A partir del análisis histórico de calidad de agua, se detectaron dos familias de contaminantes con especial necesidad y potencialidad de tratamiento: la Materia Orgánica y Nitratos. Se eligió la depuración de estos como criterio de diseño en la etapa de dimensionamiento. Las constantes superficiales de primer orden documentadas por Kadlec, permiten entender las eficiencias de remoción para contaminantes específicos. La mediana de DBO del agua del A. Morales en la ubicación elegida fue de 20 mg/L, pudiendo categorizarse como una carga “terciaria” según este autor. Para el rango de carga orgánica del A. Morales, el sistema HSSF presenta una  $k$  casi tres veces mayor al sistema FWS.

Respecto a los compuestos con Nitrógeno, como ya se mencionó en la sección 2.3, la forma mayoritaria son los Nitratos en casi todo el curso del Arroyo. Varios autores como Kadlec y Wallace, Vymazal, Knight, entre otros, y organismos como la USEPA, coinciden firmemente en que los sistemas HSSF presentan eficiencias más altas de remoción de Nitratos frente a los FWS. Esto se debe principalmente por las condiciones anaeróbicas presentes en los sistemas HSSF. Sin embargo, los mismos autores coinciden que la remoción de Fosforo, la cual es de gran interés por ser un promotor de la eutrofización de cuerpos de agua, es superior en sistemas FWS.

Por último, lo concerniente a la potencial exposición de estos sistemas frente a las personas y animales, vuelve a inclinar la balanza por los HSSF, ya que, la proliferación de especies animales y puntualmente la de mosquitos, representaría un impacto



negativo, teniendo en cuenta que una aplicación a gran escala, estaría muy cerca de cualquier tejido urbano dentro de la cuenca, generando efectos indeseados.

Por todo lo expuesto anteriormente, se evidencia las ventajas del tratamiento de las aguas del A. Morales con un sistema HSSF.

### 3.5 Vegetación

Las plantas macrófitas, son un componente esencial en los humedales construidos. Estas generan condiciones y cumplen funciones que potencian los proceso físico-químico-biológico de remoción de contaminantes. En rasgos generales, las plantas utilizadas en sistemas HSSF, deben ser tolerantes a altas cargas orgánicas y de nutrientes, tener un importante sistema radicular (raíces y rizoma) que provean sustrato para las bacterias y oxigenación en las zonas adyacentes a raíces y rizomas y tener un importante desarrollo de la biomasa aérea que favorezca la eliminación de nutrientes mediante poda de la misma.

El análisis de alternativas de la planta, comenzó a partir de la consulta bibliográfica en busca del tipo de vegetación más utilizada y recomendada para humedales de tipo HSSF.

Vymazal (2011) documenta que las plantas más utilizada y estudiadas en todo el mundo para la aplicación en sistemas HSSF son la *Phragmites australis* (caña común), especies de los géneros *Typha* (*latifolia*, *angustifolia*, *domingensis*, *orientalis* y *glauca*) y *Schoenoplectus* (*Scirpus*) (por ejemplo, *lacustris*, *validus*, *californicus* y *acutus*) spp.

Particularmente, los géneros *Typha* y *Schoenoplectus* tiene un gran desarrollo radicular en forma de rizomas y se adaptan a distintos tipos de sustratos, tolerando situaciones anaeróbicas, propias de suelos inundados por largos periodos. Esto hace que sean uno de los géneros de plantas más utilizados en sistemas de humedales construidos

#### ***Typha* spp.**

Son plantas perennes erectas de tallos sin juntas. Tienen hasta 3 m de altura con un extenso sistema de rizomas horizontales ramificados. Las hojas son planas o ligeramente redondeadas en el dorso, en sus partes basales esponjosas. Se encuentran comúnmente en bahías poco profundas, zanjas de riego, lagos, estanques, ríos y marismas de agua dulce y salobre.

Son especies con un importante desarrollo de biomasa aérea. En los humedales construidos, las plantas *Typha* se usan generalmente en sistemas FWS. El uso de *Typha* en los humedales HSSF es limitado principalmente porque las estructuras subterráneas (raíces y rizomas) son muy poco profundas.

Hay cuatro especies principales de *Typha* que se encuentran en humedales: *T. latifolia*, *T. angustifolia*, ambas cosmopolitas. *T. domingensis*; se encuentra en partes subtropicales y tropicales de América, Australia y África y *T. glauca*; un híbrido de *T. latifolia* y *T. angustifolia*, que es más común en América del Norte.



**Figura 3.8:** *Typha domingensis* (Totora) tomado de *Encyclopedia of Life* (2019).

### ***Schoenoplectus* spp.**

Las especies que pertenecen al género *Schoenoplectus* (*Scirpus*) son hierbas anuales o perennes que crecen en grandes colonias conocidas como pajonales. Los tallos son triangulares, o ligeramente redondos. Algunas especies llegan hasta los 3 metros de altura. Las raíces penetran hasta 70-80 cm dando como resultado una mayor aireación de la zona de la raíz promoviendo la nitrificación microbiana. Este género se usa principalmente en Norte y Sur de América, Australia y Nueva Zelanda. Las especies utilizadas en los humedales construidos HSSF son *S. lacustris*, *S. Palla*, *S. validus*, *S. californicus*, *S. acutus*, *S. cyperinus*, y *S. tabernaemontani*.



**Figura 3.9:** *Schoenoplectus californicus* (Junco). Tomado de *Encyclopedia of Life* (2019).

Las diferentes macrófitas que habitan en una región pueden usarse en humedales construidos ya que presentan la ventaja de estar adaptadas al clima y a las condiciones hídricas y edáficas predominantes. Pero no todas las especies presentan la misma eficiencia en la remoción de contaminantes. Las especies de plantas utilizadas en el tratamiento implicarán diferencias en la eficiencia de la remoción. Es necesario encontrar plantas regionales que en las condiciones ambientales donde se va a llevar a cabo el tratamiento, presenten alta tolerancia a las condiciones del efluente a tratar y capacidad de remoción de los contaminantes que se desean eliminar (Alarcón-Herrera, Zurita-Martínez, Lara-Borrero, & Vidal, 2018)

Para tener un mayor criterio de elección sobre especies nativas de la cuenca Matanza Riachuelo, pertenecientes a los géneros *Typha* y *Schoenoplectus*, se realizó una entrevista a la Dra. Gabriela González Trilla, Investigadora asistente de CONICET y Profesora adjunta del Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental (3iA), quien se especializa en ecosistemas con Humedales en la Argentina. A partir de dicha entrevista, se pudo determinar que las especies características de la cuenca Matanza Riachuelo son la *T. dominicensis* (Figura 3.8) y el *S. californicus* (Figura 3.9), conocidos como Totorá y Junco, y que ambas especies presentan características deseables para un sistema de humedal construido HSSF, particularmente un importante desarrollo radicular; adaptabilidad a sustratos distintos de los naturales, como grava, canto rodado, etc.; bioadsorción de metales; bioabsorción de materia orgánica y nutrientes, transporte



pasivo y también activo (en el caso de la totora) de oxígeno hacia el sustrato y tolerancia a poda.

Un punto fundamental aportado en esta entrevista, fue tener presente la fenología de estas plantas. En tal sentido se concluyó que el Junco o *S. californicus* era la mejor opción, debido a que hubo reportes y evidencia en reservas naturales dentro de la CMR, de que la Totora sufre un desecamiento de su parte aérea una vez al año en diferentes regiones de la cuenca, particularmente en los meses de invierno. Esto podría traer complicaciones en la O&M del HCEP, ya que se generaría acumulación de tejido vegetal muerto sobre el humedal. Además, este fenómeno posiblemente altere el régimen de absorción de agua y nutrientes de la planta, generando fluctuaciones indeseables en el tratamiento de contaminantes del A. Morales. El Junco por el contrario presenta un crecimiento constante de su parte aérea, evitando este problema.

### 3.6 Sustratos

Los sustratos utilizados en los humedales construidos de flujo subsuperficial cumplen funciones fundamentales en el tratamiento de efluentes:

- Son material de enraizamiento para la vegetación
- Ayudan a distribuir y recoger el flujo de manera uniforme en la entrada, salida, y a lo largo del humedal.
- Proporcionan un área de superficie para el crecimiento de *biofilms* microbianos
- Filtran y adsorben partículas y contaminantes.

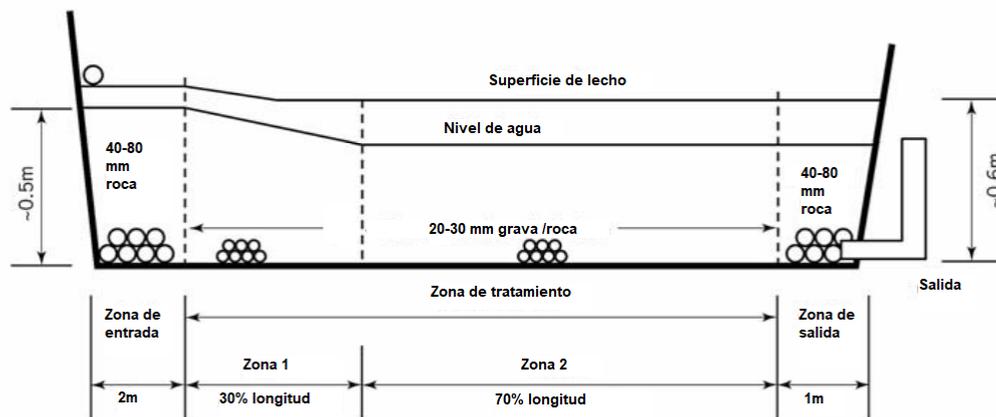
Hay una gran variedad de tipo y tamaño de sustratos. Factores como tipo de vegetación utilizada, dimensión del humedal, conductividad hidráulica y costos determinarán el tipo de sustrato a utilizar. Dependiendo las necesidades de tratamiento, puede ser deseable el uso de medios con propiedades químicas específicas, como una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) por ejemplo, para la adsorción de fósforo o amoníaco.

En la Tabla 3.3 se resumen los materiales comúnmente usados como sustratos, sus tamaños y conductividad hidráulica asociadas. Los materiales más finos tienen una mayor superficie específica, donde las biopelículas microbianas pueden dar mejores tratamientos en el efluente, pero al ser más finas son más propensos a la obstrucción o “*clogging*” y los problemas hidráulicos asociados a este. El uso de material más grueso

es más común en la zona de entrada y salida del humedal para una cumpliendo la función de una distribución homogénea del efluente a tratar. (Figura 3.10).

**Tabla 3.3:** Diferente materiales, granulometrías y conductividades para medios filtrantes. Tomado de USEPA (2000)

Fuente	Zona de tratamiento			Zona de Entrada/Salida
	Tamaño (mm)	Material	Conductividad Hidráulica	Tamaño (mm)
EC/EWPCA (1990)	3–6; 5–10	Grava	86 (m/d)	50-200
TVA (1993)	3–6	Grava	2600 (m/d) 260 (m/d)	50-100
ATV (1998)	0,2–1,0	Suelo/Arena	$k = (d^2)/100$ (m/s)	
U.S. EPA (2000a)	20–30	Grava	100000 (m/d)	40-80
	5–20	Grava	10000 (m/d)	
IWA (2000)	8–16	Grava	$k = 12600 d^{1,9}$ (m/d)	75-100
ÖNORM B2505 (2005)	0–4	Arena	-	16-32
	1–4 (efluente secundario)	Grava		
	4–8 (efluente primario)	Grava		
Wallace and Knight (2006)	>4 mm	Grava	260 (m/d)	25-50



**Figura 3.10:** Zonas de conductividad hidráulica dentro de un humedal construido HSSF propuesto por la EPA (2000).

La depuración de aguas de río o de Arroyo mediante HC de tipo HSSF presenta complejidades hidráulicas, asociadas principalmente al volumen de agua a tratar. El tratamiento mediante humedales construidos HSSF para caudales importantes de un



efluente, como lo sería el eventual tratamiento del A. Morales, requiere necesariamente de un sustrato con dos principales características:

a) **Alta conductividad hidráulica:** de esta forma podrían tratarse caudales importantes evitando la saturación hidráulica del sistema.

b) **Bajo costo:** El tratamiento de un gran caudal de agua, repercute inevitablemente en sistemas de mayores dimensiones, utilizando grandes cantidades de sustrato. Esto hace que la variable económica tenga un gran peso, teniendo que evaluar la mejor relación costo-beneficio del material.

Existe una amplia gama de materiales que evidencian tener altas conductividades hidráulicas, así como también propiedades físicas que permiten la generación de biofilm en su superficie y una alta CIC. Esto los convierte desde el punto de vista hidráulico y de remoción de contaminantes en materiales ideales como sustrato. Algunos ejemplos de estos son la arcilla expandida o leca, grava de diferentes minerales, rocas volcánicas, carbón activado entre otros. El problema radica en que la gran mayoría de estos materiales tiene un costo elevado, representando el gasto más importante en la construcción de un humedal HSSF.

Para el tratamiento del A. Morales se pretende evaluar e investigar materiales distintos a los comúnmente usados, los cuales aseguren una alta conductividad hidráulica, buen soporte para el desarrollo de biofilm microbianos, un medio adecuado para el crecimiento y proliferación de la especie vegetal plantada: *Schoenoplectus californicus*, y, sobre todo, un bajo costo.

Para ello se proponen dos posibles materiales:

#### **a) Escombros de obra de construcción**

Los escombros generados en la demolición y construcción de obras civiles (Figura 3.11), están conformados esencialmente por dos materiales: ladrillos y hormigón en una relación de 3:1 aproximadamente. En las grandes ciudades como CABA y el Conurbano Bonaerense, la gran cantidad de obras civiles genera miles de toneladas de escombros los cuales son tratados como residuos, disponiéndolo comúnmente en rellenos. Utilizar este material como un posible sustrato trae aparejado interesantes ventajas como darle valor a un residuo para desviarlo de una eventual disposición final y, sobre todo, al ser un residuo, este material es gratis o de muy bajo costo, lo cual reduciría considerablemente el costo de un proyecto de humedal HSSF.

Rahman, et al (2016) investigaron las propiedades físicas e hidráulicas de materiales de construcción y demolición destinados tradicionalmente a rellenos para su disposición final. Concluyeron que estos se pueden usar de manera sostenible como materiales alternativos en medios filtrantes para sistemas de biorremediación. Ren et al. (2007) estudiaron la capacidad de adsorción de Materia Orgánica, Amonio y Fósforo de 4 materiales poco convencionales para el sustrato de humedales contruidos, entre ellos los, escombros de ladrillos. Demostraron, que este último tiene una excelente performance en la adsorción de Amonio y fósforo.

Respecto a las propiedades físicas e hidráulicas, Vijayaraghavan et al. (2014) reportan un densidad aproximada de  $823 \text{ kg/m}^3$  (aproximadamente 40% menor a la grava) y un valor k de conductividad hidráulica (para un tamaño de partícula de 4-10 mm) igual a 340 m/d, siendo esta similar a la conductividad hidráulica de grava de misma granulometría.



**Figura 3.11:** Escombros de construcción y demolición. Tomado de Diagne (2018).

#### **a) Leca Plásticas**

Es una leca fabricada a partir de materiales plásticos reciclados como polietileno (PE), polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET) desarrollado en la Argentina por la empresa Arqlite®. Se produce en granulometrías pequeñas (3-12mm) y grandes (12-30mm). Es utilizado como agregado grueso en el hormigón para mejorar las propiedades térmicas y acústicas. Debido a que es un material nuevo, no hay registros en la bibliografía de su uso como sustrato en humedales contruidos. Se desconocen su conductividad hidráulica y si su superficie tiene las características fisicoquímicas necesarias para servir como soporte de biofilm microbiano.

Lo que la hace interesante como un potencial medio soporte y por eso se incluye en este análisis, es su baja densidad, de aproximadamente  $420 \text{ kg/m}^3$ , lo cual representa grandes ventajas en la operación y mantenimiento de un humedal HSSF, principalmente porque facilitaría la desobstrucción y limpieza del sustrato ante un eventual fenómeno de *clogging*, mejorando el rendimiento y alargando la vida útil del sistema.

Nuevamente, esta alternativa pretende utilizar un residuo, o mejor dicho un producto producido a partir de residuos, para valorizar este tipo de material evitando una disposición final. El precio de la leca plástica es similar al de la leca de arcilla, pudiendo representar un costo importante en su implementación.



*Figura 3.12: Diferente granulometrías de la Leca Plástica.*

Dado que ambos materiales tienen aspectos interesantes para una posible utilización como sustrato, se realizó una instancia de experimentación que se desarrolla en el capítulo 4. En esta se evaluó la respuesta y adaptación de un grupo de individuos de *Schoenoplectus californicus* en los sustratos propuestos. También se analizó la capacidad de estos como medio soporte para biofilm y finalmente se determinó la eficiencia de remoción de ciertos contaminantes en sistemas batch con los diferentes sustratos.



### 3.7 Conclusiones

A partir del análisis de alternativas desarrollado en este capítulo, se pudo seleccionar las variables ingenieriles que más se adecuan al presente proyecto. Se pudo definir el lugar de instalación del HCEP, el cual estará ubicado dentro del Parque temático “Batalla de Villamayor” próximo a la estación ARROMORA1- 37. El mismo será alimentado a partir una bomba hidropulsada desconectada de la red eléctrica. El humedal construido tendrá un flujo subsuperficial de flujo horizontal (HSSF), con un sistema de sedimentación de sólidos finos como pretratamiento, diseñado para evitar posibles obstrucciones y problemas hidráulicos. La vegetación utilizada, será un monocultivo de una especie autóctona: *Schoenoplectus californicus* conocido comúnmente como Junco. Finalmente, el tipo de sustrato se definirá a partir de una instancia de experimentación para poder elegir el más conveniente en función de la adaptabilidad del Junco en dicho sustrato, y la eficiencia de remoción de contaminantes de interés.

## 4. Metodología Práctica

### 4.1 Resumen

La Metodología Práctica es la etapa previa al diseño del HCEP, donde a partir de instancias de experimentación a escala de laboratorio, se terminó de definir variables analizadas en el Capítulo 3: *Análisis de alternativas*. Se llevaron a cabo todos los procedimientos necesarios para:

- a) Caracterizar el agua de Arroyo a tratar.
- b) Determinar la eficiencia y cinética de remoción de ciertos contaminantes con sistemas batch constituidos por *Schoenoplectus californicus* (Junco) y distintos sustratos.
- c) Paralelamente al punto b), se evaluó la tolerancia y respuesta del Junco frente al agua de A. Morales y su adaptabilidad a los sustratos estudiados.

Para esta experimentación fue necesario realizar dos salidas a campo para, por un lado, la búsqueda de individuos de Junco en estado natural, y posterior adaptación para la experimentación en sistemas batch en dos sustratos diferentes: escombros de obra y lecas plásticas y, por el otro lado, una campaña de muestreo de agua y sedimento del A. Morales para su caracterización. Una vez hecho esto, se contó con la información necesaria para hacer una solución simuladora del agua de Arroyo para el estudio de eficiencia de remoción en sistemas batch de dos contaminantes en particular: Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y Carbono Orgánico Total (COT).

Una vez determinada la tolerancia y eficiencia de remoción del sistema a partir del seguimiento, observación, toma de muestras, análisis y discusión de resultados, se utilizó esta información como base del diseño y dimensionamiento del HCEP.

Se buscó recrear, de la forma más aproximada posible, condiciones y procesos fisicoquímicos de remoción que ocurrirían en un humedal construido con un tiempo considerable de adaptación y operación. Para ello, hubieron instancias de entrevistas con docentes e investigadores, las cuales fueron muy importantes para establecer criterios y metodologías estratégicas durante la experimentación.



## 4.2 Caracterización del agua del A<sup>0</sup> Morales

### 4.2.1 Selección de punto de muestreo.

La toma de muestra del A. Morales se realizó en el sitio elegido para la construcción del HCEP, descrito en la sección 3.1. Este punto tiene la gran ventaja de que su ubicación coincide con la estación de monitoreo “ARROMORA1- 37” de la cual hay datos históricos de un gran número de parámetros de interés para este trabajo.

### 4.2.2 Selección de parámetros de contaminación a estudiar

El primer paso antes de la campaña de toma de muestra de agua superficial del A<sup>0</sup> Morales fue definir qué parámetro se querían medir y por qué. Se definió esta selección en base al conjunto de los siguientes criterios:

- a) Tipo de caracterización: Se quiere medir los parámetros para una caracterización físico-químicas general del agua y parámetros fisicoquímicos de contaminación más frecuentes para un cuerpo de agua lóticos de bajo caudal, eutrofizados, con alta carga de nutrientes, como lo es el A<sup>0</sup> Morales.
- b) Representatividad: Los parámetros de contaminación elegidos deben ser representativos de una posible fuente de contaminación puntual, en base al contexto social-económico analizado en la Sección 2.3.2. Elegir parámetros representativos evitó la medición de numerosos parámetros para determinar la presencia de una misma fuente de contaminación
- c) Capacidad de medición: Los parámetros a estudiar dependieron de la posibilidad de ser medidos con los equipos, infraestructura y reactivos de los Laboratorios del 3iA. Dado que el 3iA cuenta con laboratorios de alta complejidad y realiza comúnmente estudios de estas características, esto no representó una limitante en la selección de parámetros, pudiendo elegir más de una técnica de medición para un mismo parámetro.
- d) Complejidad y costo: Se seleccionaron aquellos parámetros cuya complejidad y costo fueron justificables para el fin de un proyecto académico
- e) Datos históricos de referencia: Todos los parámetros seleccionados, tienen antecedentes de campañas anteriores realizadas por ACUMAR en el mismo lugar de muestreo seleccionado. Esto permitió seleccionar aquellos parámetros cuyos valores históricos sobrepasan los límites permitidos y obviar aquellos con valores inferiores al límite de detección.

f) Regulados por Normativa: Los parámetros regulados por normativa son de especial relevancia. En este caso, los límites descritos por el USO III de la Resolución 46-E / 2017 de ACUMAR

En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros seleccionados para la caracterización propia del A. Morales. Se muestra si los mismos cuentan con datos de campañas anteriores en la Base de Datos Hídricos (BDH) de ACUMAR, si tienen evidencia de ser tratados por HC y si estos están regulados por el USO III.

**Tabla 4.1:** Parámetros seleccionados para la caracterización de agua de Arroyo.

Parámetro	Tipo	BDH ACUMAR	Regulado por USO III	Tratables por HC
Nitrato	Físico-Químico	✓	✓	✓
Amonio	Físico-Químico	✓	x	✓
Fosfatos	Físico-Químico	✓	x	✓
DQO	Físico-Químico	✓	x	✓
DBO	Físico-Químico	✓	✓	✓
COT	Físico-Químico	✓	x	✓
T°	Físico-Químico	✓	✓	-
pH	Físico-Químico	✓	✓	✓
Potencial redox	Físico-Químico	✓	x	-
Conductividad	Físico-Químico	✓	x	-
Turbidez	Físico-Químico	✓	x	✓
OD	Físico-Químico	✓	✓	✓
TDS	Físico-Químico	✓	x	✓
Salinidad	Físico-Químico	✓	x	-

### 4.2.3 Toma de Muestras de A. Morales

La campaña tuvo como objetivo la toma de muestras de agua y sedimento del A<sup>o</sup> Morales para la medición in-situ y ex-situ de parámetros de contaminación. Para ello, se llegó al sitio en un vehículo acompañado de personal de ACUMAR, donde se transportó el equipamiento necesario para el muestreo (heladeras, bidones, sonda, pala, guantes, botas, etc.). El 3iA-UNSAM, tuvo la gentileza de realizar el préstamo de una sonda multiparamétrica Horiba U-50 para llevar a cabo las mediciones in-situ.

Se utilizaron los métodos de toma y conservación de muestras descritos en el *Standard Methods* de la APHA correspondientes a los parámetros a estudiar.



**Figura 4.1:** Toma de muestra de agua de A° Morales para medición *ex-situ* (izq.) y medición *in-situ* con sonda multiparamétrica (der.) (Foto: Lucila Sandri)

#### 4.2.4 Resultados y discusión de la caracterización de las aguas del A. Morales.

En la Tabla 4.2 se resumen los resultados de la caracterización del A. Morales, el método de determinación y lugar donde se llevó a cabo. Además, se presentan los valores medios históricos de cada parámetro, determinados en la sección 2.3.4, para poder compararlos con los valores de la campaña de este proyecto y así evaluar la representatividad de estos últimos

**Tabla 4.2 :** Resultados de la medición de parámetros para la caracterización del agua del A. Morales.

Parámetro	Valor	Med. Hist.	Unidad	Método	Lugar
Nitrato	6,30	2,025	mg/l N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cadmium Reduction method	3iA
Amonio	0,35	2,32	mg/l N-NH <sub>3</sub>	Salicylate method	3iA
Fosfatos	3,6	-	mg/l PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ascorbic Acid method	3iA
DQO	149	52,6	mg O <sub>2</sub> /l	Método colorimétrico de reflujo cerrado	3iA
DBO <sub>5</sub>	57	17	mg O <sub>2</sub> /l	BOD Sensor System	3iA
COT	49,17	5,95	mg C/l	TOC-L Shimadzu	3iA
T°	16,6	18,3	°C	Sonda multiparamétrica	A. Morales
pH	7,9	7,66	upH	Sonda multiparamétrica	A. Morales
Pot redox	174	-53,9	mV	Sonda multiparamétrica	A. Morales
Conduct.	1,28	1134,52	mS/cm	Sonda multiparamétrica	A. Morales
Turbidez	21,4	26,35	NTU	Sonda multiparamétrica	A. Morales
OD	3,5	3,95	mg/l	Sonda multiparamétrica	A. Morales
TDS	0,8	34	g/l	Sonda multiparamétrica	A. Morales
Salinidad	0,6	-	ppt	Sonda multiparamétrica	A. Morales

Respecto a los valores de parámetros de nutrientes en agua obtenidos en el análisis de datos históricos, en esta campaña los nitratos resultaron mayores al cuartil 3 y el amonio menor al cuartil 2 (ver sección 2.3.4). No se realizó un análisis histórico de valores de fosfatos con lo cual no se pudo establecer una comparación. Respecto a los parámetros de materia orgánica, los tres son ampliamente mayores a la mediana histórica. El valor de DQO tiene un valor muy próximo al cuartil 4, la DBO<sub>5</sub> es mayor al cuartil 4 y representa un valor atípico frente a la distribución histórica siendo el menor de estos valores. El valor de COT es 2,7 veces mayor al máximo valor histórico registrado. Esta comparación sugiere que, al momento de la campaña de toma de muestra para este proyecto, el agua del arroyo tenía un alto contenido de materia orgánica biodegradable (por la relación DQO/DBO y EOM) posiblemente por algún vertido reciente al momento de toma de muestra.

El pH, temperatura y turbidez son similares a la media histórica. El valor histórico del resto de los parámetros tiene una dispersión importante, por lo tanto, el cálculo de su mediana y comparación con el valor de la última campaña no brinda información relevante.

En base a estos resultados, queda claro que los parámetros de calidad de agua del A. Morales pueden tener valores bastante mayores a la media histórica, incluso representar valores atípicos, como se vio en los valores de parámetros de materia orgánica en la caracterización de este proyecto. Dimensionar el sistema en base a valores medios, daría como resultado un sistema sub-dimensionado que no cumpliría los objetivos de tratamiento frente a eventos de altas concentración. Esto sugiere que para el diseño del HCEP se tenga un criterio conservador, dimensionando el sistema para concentraciones de los contaminantes a tratar mayores al cuartil 3 de su dispersión conjunto de datos históricos.

### **4.3 Experimentación a escala de laboratorio**

Los objetivos de esta etapa fueron la determinación de:

- a) La adaptabilidad de Juncos naturales en los dos materiales propuestos como medio filtrante para el HCEP, estos son la leca plástica y los escombros de obra.
- b) Las propiedades de estos materiales como medio soporte de Biofilm
- c) Las constantes cinéticas de remoción de Nitratos y materia orgánica biodegradable a partir de experimentación en Sistemas Batch

Las experimentaciones fueron llevadas a cabo íntegramente en los laboratorios del 3iA-UNSAM. También se hizo una salida a campo para la búsqueda y recolección de individuos de *S. californicus*.

A continuación, se describe cada una de las etapas:

#### **4.3.1 Extracción de *S. californicus* (Junco) de medio natural.**

En base a lo discutido en el capítulo 3, se eligió estudiar individuos de Juncos maduros, con un tejido aéreo y radicular tal que maximice las capacidades de bio-remediación. Para eso se extrajeron Juncos locales, particularmente en las costas del Río de la Plata, próximas al bajo delta del Rio Paraná, donde estas presentan un gran desarrollo de esta especie, formando “Pajonales” (Figura 4.2) fundamentales para la defensa de la erosión hídrica y otras funciones ecosistémico.



**Figura 4.2:** Conjunto de *Schoenoplectus californicus*, conformando pajonales en las costas del Río de la Plata, Buenos Aires.

Para extraer los Juncos, sin generar un daño en su sistema radicular, se sacaron terrones de 30 cm (Figura 4.3), extrayendo un total de 90 individuos. Se trasladaron con su sustrato natural hasta los laboratorios del 3iA para su posterior implantación en nuevos sustratos.



**Figura 4.3:** Extracción de *Schoenoplectus californicus* de Junqueras para posterior experimentación.

#### 4.3.2 Adaptación de *S. californicus* a nuevos sustratos

Inmediatamente después de la extracción de los Juncos en su estado natural se realizó su implantación a los nuevos sustratos, para disminuir el estrés hídrico y de aclimatación de las plantas a su nuevo entorno.

Para retirar el sustrato natural de los Juncos, el cual estaba compuesto principalmente por arena y limo, se aplicó suavemente agua hasta que el sistema radicular quedó limpio (Figura 4.4).



**Figura 4.4:** Sistema radicular de Juncos después de ser lavados, listos para implantación en nuevos sustratos.

Se implantaron entre 7 y 11 plantas por contenedor, priorizando que el volumen de matriz radicular sea semejante para todas las experimentaciones. Los sustratos utilizados se fueron:

a) Escombros de obra: Se buscó 50 kg de escombros compuesto por cascotes de ladrillo (75%) y cemento (25%). Para que cumpla su funcionalidad como sustrato y una determinada permeabilidad hidráulica, se lo trituró hasta alcanzar una granulometría de aproximadamente 10-40 mm (Figura 4.5).

b) Lecas plásticas: Es un material relativamente nuevo en el mercado y se utiliza como agregado en obras civiles para mejorar la resistencia, aislación térmica y acústica de las estructuras de hormigón. Tiene la ventaja de ser considerablemente más liviana que una leca convencional y de provenir de materiales plásticos reciclados. Su granulometría uniforme de aproximadamente 5mm, y sus características inertes la convirtieron en una opción interesante para este proyecto.



**Figura 4.5:** Sustratos utilizados para la experimentación batch: Lecas plásticas (izq.) y escombros de obra (der.)

La implantación se hizo lo más cuidadosamente posible evitando el daño del sistema radicular. Se colocó el mismo volumen ( $3 \text{ dm}^3$ ) para ambos sustratos por sistema batch. Para la contención del sistema, se optó por la utilización de bolsas de escombros, las cuales tienen un espesor de  $100 \mu\text{m}$ , suficiente para resistir el peso del sustrato y líquido, y evitar posibles pinchaduras. Una vez implantado los individuos, se esperó un tiempo de 4 semanas de aclimatación y riego constante de agua de canilla, para la asimilación al nuevo sustrato y demás condiciones distintas a las naturales. Las macetas se ubicaron al aire libre, donde las variables como temperatura, intensidad de irradiación solar, humedad, etc., fueron más similares a las naturales. (Foto 4.6)



**Figura 4.6:** Juncos en los nuevos sustratos (izq.) y triplicados + controles en aclimatación para futuras experimentaciones batch (der).

### 4.3.3 Bioaumentación de Biofilm

Como se mencionó en la sección 2.5.4 los microorganismos adheridos a superficies sólidas como “biofilm”, cumplen un rol fundamental en la biorremediación de efluente líquidos y en los sistemas de humedales construidos de flujo sub-superficial, no es la excepción.

Uno de los objetivos de esta experimentación, fue utilizar conocimientos y métodos para intentar recrear en los sistemas batch, las características de un humedal construido con un tiempo considerable de operación. La principal complicación frente a esto, fue el tiempo disponible para realizar dicha experimentación, ya que el presente trabajo se acotó a un periodo de realización de 7 meses y el tiempo destinado a experimentación fue de 2 meses. En este periodo de tiempo fue imposible recrear condiciones de desarrollo vegetal y microbiano propios de sistemas maduros. Sin embargo, pudo acelerarse el desarrollo y concentración de microorganismos específicos a partir de una técnica llamada Bioaumentación. Esta se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora para una remediación in-situ. Consiste en la adición de microorganismos vivos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante en

cuestión para promover su biodegradación o su biotransformación. El tamaño del inóculo a utilizar, depende del tamaño de la zona contaminada, de la dispersión de los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores (Riser-Roberts, 1998).

Para esta experimentación se estimuló la formación de biofilm adherido al sustrato para una mayor eficiencia en la biorremediación de contaminantes, fundamentalmente los de tipo orgánicos.

Para ello, se realizó 3 litros de cultivo, inoculando con sedimento del A. Morales recolectado en la campaña de muestreo, en medio de cultivo LB (Figura 4.7) con el objetivo estudiar los microorganismos especializados en biorremediación propios del lugar seleccionado para la instalación del HCEP. Después de dos días en agitación se agregó 250 ml de cultivo para inocular cada maceta de ambos sustratos y lograr una proliferación y desarrollo de biofilm en el periodo de aclimatación.



**Figura 4.7:** Cultivo compuesto de medio LB y sedimento del A. Morales como inóculo bacteriano, en el momento de la inoculación (izq.) y después de dos días en agitación (der.).

#### 4.3.4 Evaluación de sustratos seleccionados como medio soporte de biofilm.

Uno de los aspectos fundamentales en la selección de un sustrato para un humedal construido de flujo sub-superficial es que este sea un medio apto para el desarrollo de biofilm de microorganismos, ya que estos últimos difícilmente se encuentran suspendidos en medio líquido, y su gran mayoría están en forma de biopelículas llegando a tener un importante espesor. De esto dependerá la característica fisicoquímica del soporte, fundamentalmente su porosidad y naturaleza del material.

Para evaluar la capacidad de formación de *biofilms*, se dejaron los sustratos seleccionados en el medio de cultivo descrito en la sección 4.3.3 durante cuatro días en agitación continua. Al final de la experimentación pudo observarse una superficie de coloración levemente verdosa, resbalosa al tacto, siendo levemente mayor en el escombro conformado por ladrillo y hormigón (Figura 4.8).



Figura 4.8: Experimentación con escombro y leca plástica como medio soporte de biofilm.



### **4.3.5 Experimentación en configuración Batch para la obtención de parámetros de diseño de un sistema continuo**

Previo al comienzo de la experimentación en sistemas batch, se realizó una entrevista con el Dr. Gustavo Curutchet para evaluar las metodologías más estratégicas de experimentación en base a los objetivos, tiempos y recursos disponibles. También se realizó una entrevista a la Dra. Cynthia Corroto para evaluar aspectos importantes sobre los arreglos experimentales con uso de vegetación. A continuación, se describen los detalles de la metodología práctica llevada a cabo en los laboratorios del 3iA-UNSAM durante un periodo de dos meses.

#### **4.3.5.1 Configuración experimental Batch**

El tratamiento de efluentes contaminados mediante el uso de humedales construidos corresponde a un sistema de tipo continuo, pudiendo tener flujo libre, vertical u horizontal

La experimentación con reactores continuos para la determinación de los parámetros de diseño suele tener muchas complicaciones, principalmente asociado al tiempo que requiere el sistema para llegar a tener un estado estacionario. Por otro lado, la simplicidad de la configuración experimental de sistemas batch lo predispone para ser utilizado con mucha mayor frecuencia en las etapas experimentales. Esto se debe a que se han establecido correlaciones entre la cinética de reacciones de sistemas continuo y batch. La diferencia fundamental entre estos sistemas esta es sus regímenes de flujo. En el continuo, las concentraciones de sustrato y microbianas son completamente dependientes de la velocidad de flujo, pero, en estados estacionarios, es posible suponer un equilibrio de los parámetros tanto en los sistemas continuos, como en batch, especialmente en las tasas de cambio de concentraciones microbianas y de sustrato. Esta relación ha generado el desarrollo de un método para adaptar los datos obtenidos de las experimentaciones batch al diseño de sistemas continuos (Igoni, 2016).

De esta manera, se eligió una configuración experimental batch para la obtención de valores de parámetros a partir de los cuales se calculó constantes cinéticas para un sistema continuo. Haber elegido una configuración de tipo continuo para esta experimentación, hubiese demandado tiempo y recursos excesivos hasta alcanzar las condiciones de estado estacionario necesarias.

Una vez transcurridas las 4 semanas de aclimatación de los Juncos en los nuevos sustratos, se asumió condiciones apropiadas para el comienzo de la experimentación.

#### 4.3.5.2 Selección de parámetros de contaminación a estudiar y realización de Solución Simuladora

Idealmente la experimentación se hubiese basado en la evaluación de depuración de la misma agua del A. Morales. Sin embargo, la cantidad de volumen de agua necesario fue demasiado grande para trasladarlo desde la estación de muestreo en Marcos Paz hasta los laboratorios del 3iA. Además, la conservación de semejante volumen de agua durante el periodo de experimentación hubiese sido muy difícil de lograr. La mejor alternativa, fue realizar una solución que simule la concentración de ciertos contaminantes estratégicamente seleccionados y monitorear la remoción de los mismos en sistemas batch para determinar cinéticas de remoción. Los contaminantes a simular fueron:

- Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ): La concentración de Nitratos es un parámetro abarcativo de diversas fuentes de contaminación y estados del cuerpo superficial de agua (ver Sección 2.3). El proceso que se quiso estudiar a partir de del seguimiento de concentración de  $\text{NO}_3^-$  es la a reducción de especies oxidadas del nitrógeno (nitrito o nitrato) a nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ) el cual es liberado hacia la atmosfera. Este puede ser llevado a cabo por bacterias y algunos hongos en ambientes aeróbicos y anaeróbicos. La concentración de la solución simuladora se adoptó a partir del valor determinado en la caracterización propia, ya que este es un valor superior al cuartil 3, representando estados del arroyo con concentraciones superiores a la media.
- Carbono Orgánico Total (COT): es la representación más directa de la cantidad de materia orgánica presente en una muestra. Su medición es muy simple, pero se necesita un equipo muy sofisticado. Ya que el 3iA cuenta con este equipo, se seleccionó este parámetro frente a la DQO o DBO porque puede determinarse un gran número de muestras de forma rápida.

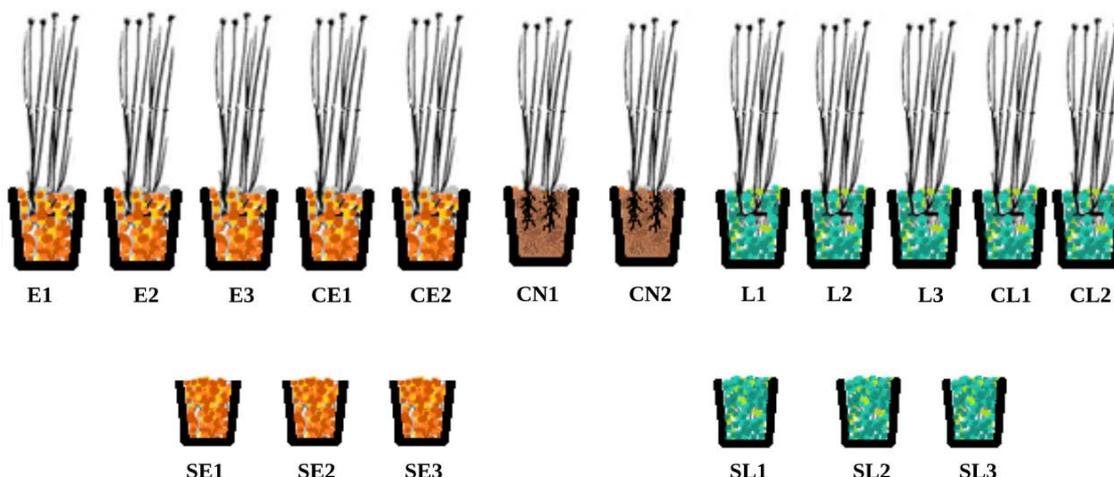
#### 4.3.5.3 Esquema y metodología de experimentación

La metodología de experimentación consistió en el agregado de una solución simuladora para analizar la remoción de nitratos y COT en sistemas batch conformados por dos medios filtrantes y *S. californicus*. (Figura 4.9). La experiencia se desarrolló en su totalidad al aire libre (Figura 4.10), donde las plantas pudieron tener condiciones naturales de luz, temperatura y humedad. La etapa final de extracción de muestras, se realizó en la planta piloto del 3iA.

Los códigos referenciales del grupo experimental, la adición de inóculo para generar una bioaumentación (desarrollado en la sección 4.3.3) el tipo de riego, y si se tomaron muestras de dicho grupo para posteriores determinaciones analíticas, se detallan en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3:** Contenedores utilizados en la experimentación batch.

Código	Significado	Riego	Muestreo	Inóculo
E1	Junco con Escombros	1 L Solución	✓	✓
E2	Junco con Escombros	1 L Solución	✓	✓
E3	Junco con Escombros	1 L Solución	✓	✓
SE1	Solo Escombro	1 L Solución	✓	✓
SE2	Solo Escombro	1 L Solución	✓	✓
SE3	Solo Escombro	1 L Solución	✓	✓
CE1	Control Junco con Escombros	Agua de canilla	×	×
CE2	Control Junco con Escombros	Agua de canilla	×	×
L1	Junco con Leca Plástica	1 L Solución	✓	✓
L2	Junco con Leca Plástica	1 L Solución	✓	✓
L3	Junco con Leca Plástica	1 L Solución	✓	✓
SL1	Solo Leca Plástica	1 L Solución	✓	✓
SL2	Solo Leca Plástica	1 L Solución	✓	✓
SL3	Solo Leca Plástica	1 L Solución	✓	✓
CL1	Control de Leca Plástica	Agua de canilla	×	×
CL2	Control de Leca Plástica	Agua de canilla	×	×
CN1	Control Junco sustrato Natural	Agua de canilla	×	×
CN2	Control Junco sustrato Natural	Agua de canilla	×	×



**Figura 4.9:** Esquema de experimentación batch: Contenedores con Juncos + sustratos y solo sustratos.

Para obtener resultados estadísticamente representativos, se analizaron los sistemas Junco + Sustrato por triplicado y Sustrato por duplicado. Además, se realizaron controles por duplicado para los sistemas Junco + Sustrato, los cuales fueron regados con agua de canilla, para evaluar si la solución simuladora afectaba de forma negativa al Junco. También se incorporó un control con el sustrato original (arena y limo) del Junco por duplicado. Esto permitió comparar posibles alteraciones sobre el Junco, debido al estrés vegetal por el cambio de hábitat y sustrato



**Figura 4.10:** *Sistemas batch para experimentación y controles*

Antes de comenzar con la experimentación, se definió los periodos de toma de muestra para cada recipiente. Los periodos se definieron en base a los tiempos de retención y eficiencias asociadas; se ha informado que un tiempo de detención de 6-7 días es óptimo para el tratamiento de aguas residuales primarias y secundarias (Stephenson, 1980). Los tiempos de detención más cortos no proporcionan el tiempo adecuado para que ocurra la degradación de contaminantes. Los tiempos de detención más largos pueden conducir a condiciones de estancamiento y anaerobiosis (EPA US, 1988).

El agregado de solución simuladora se realizó una única vez al comenzar la experimentación. Las tomas de muestra se realizaron durante cuatro periodos

consecutivos de tres días cada uno, haciendo un total de doce días de experimentación. La intención de fijar cuatro periodos, fue para observar la evolución en la depuración de los nitratos y la materia orgánica a lo largo del tiempo para cada uno de los sistemas batch.

Las muestras eran de 50 ml de muestra y se extraían con pipeta desde el aforo (Figura 4.11). Paralelamente, cada 7 días se realizó un monitoreo del estado general de los Juncos para evaluar su tolerancia y adaptabilidad a los nuevos sustratos.



**Figura 4.11:** Extracción de muestras de sistemas batch en planta piloto de 3iA (Foto: Diego Rodríguez)

Un aspecto fundamental en este tipo de experimentación, es la pérdida de volumen de agua por evapotranspiración, que hay que tener en cuenta para evitar errores en la medición de concentraciones. Para ello, se realizaron tubos con aforo, para mantener diariamente el volumen en el nivel correspondiente al volumen inicial, mediante la lectura del aforo y la adición de agua destilada. Además, éste cumplió la doble función de orificio para toma de muestra; al captar el volumen de muestra de forma longitudinal respecto al eje del contenedor, contribuyó a tomar muestras homogéneas en cada caso (Figura 4.12).



**Figura 4.12:** Aforo para el control de volumen de agua y extracción de muestras con pipeta.

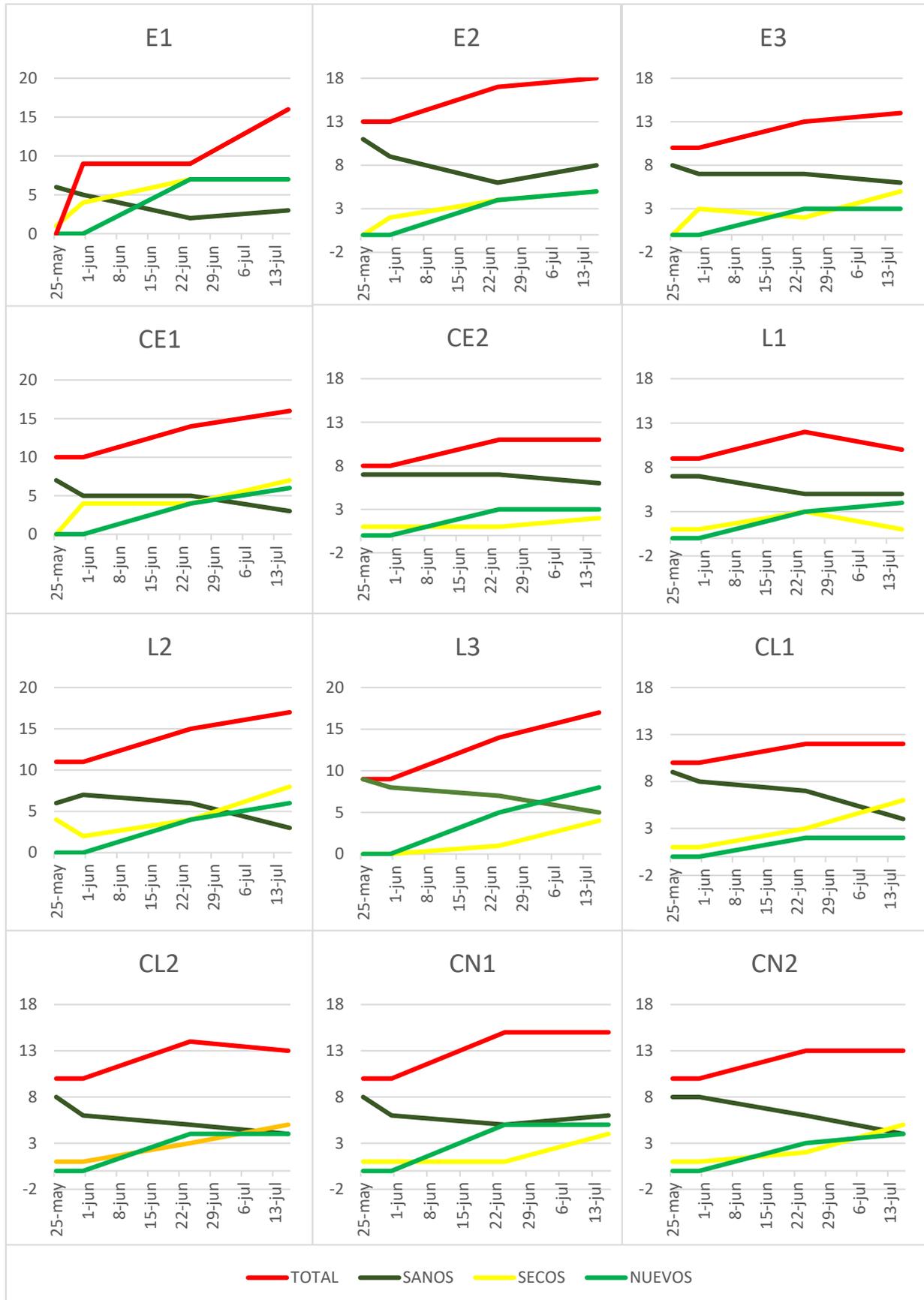
## 4.3.6 Resultados y Conclusiones

### 4.3.6.1 Tolerancia y Adaptación de *S. californicus* a escombros y leca como sustratos

En primer lugar, se realizará el análisis de resultados y conclusiones del grado de supervivencia, adaptación y desarrollo de los juncos en los dos materiales estudiados como medio filtrante a lo largo de los aproximadamente 2 meses de experimentación:

La Figura 4.12 resume el estado de los Juncos en los sustratos de escombros ( $E_N$ ) Leca Plástica ( $L_N$ ), sus respectivos controles ( $CE_N$ ) y ( $CL_N$ ) y el control en el sustrato natural ( $CN_N$ ), a partir de la recopilación de información de monitoreo semanales. El eje vertical representa el N° de individuos. Se representan cuatro estados a lo largo del tiempo, estos son:

- “Total” representa individuos ya sea vivos o muertos.
- “Sano” son aquellos individuos que conservaron su coloración y turgencia como en su estado natural.
- “Seco” representan los Juncos con un 50% de su tallo seco (coloración amarilla y deshidratación).
- “Nuevos” representa individuos que nacieron y crecieron durante la experimentación.



**Figura 4.13:** Estado de los Juncos a lo largo de Experimentación.

Los gráficos de todos los grupos experimentales muestran una tendencia relativamente parecida. Hay un aumento neto en el número total de individuos por la aparición de nuevos individuos, y un deterioro de los individuos, pasando de estados “sanos” a “secos”.

La Tabla 4.4 presenta el porcentaje de individuos muertos y nuevos respecto al número inicial, basado en valores promedio, para los grupos experimentales de escombros, leca, respectivos controles y control natural.

El porcentaje de muertes en el control natural (CN) es de un 45%, evidenciando que la extracción del medio natural, independientemente de un reemplazo de sustrato, representa un estrés importante para el Junco. Los porcentajes de muertes para los individuos en escombros (E) y leca plástica (L) son levemente mayores, indicando que el cambio de sustrato original representa un estrés adicional. Sin embargo, este parece ser menor respecto al que representa la extracción de su hábitat natural y adaptación a uno nuevo.

Los porcentajes de nacimiento resultaron sorprendentemente altos, considerando los reducidos tiempos de experimentación y el estrés de los Juncos estudiados. Los valores no muestran diferencias significativas entre E y L.

Los valores de E y L frente a sus controles CE y CL no indican que el riego con la solución de glucosa y nitratos haya influenciado el porcentaje de muertes o nacimientos.

**Tabla 4.4:** Porcentajes de muertes y nacimientos para los grupos experimentales: con escombros (E) y leca (L) (triplicados) , y los duplicados de sus respectivos controles (CE, CL) y control natural (CN) (duplicados).

	<b>E</b>	<b>CE</b>	<b>L</b>	<b>CL</b>	<b>CN</b>
<b>% Muertes</b>	53,1	50,0	44,8	55,0	45,0
<b>% Nacimientos</b>	46,9	50,0	62,1	30,0	45,0

El análisis de estos resultados deja en claro que la extracción de *S. californicus* de su medio natural y reemplazo de sustrato original, representa un estrés significativo pudiendo causar la muerte de aproximadamente el 50% de los individuos. Sin embargo, los porcentajes de nuevos individuos demuestran que el Junco es una especie de gran adaptación a sustratos distintos del natural (típicamente arena, limo y arcilla) pudiendo proliferar y desarrollar su población en los escombros y lecas plásticas como medio filtrante propuestos para el HCEP.

#### 4.3.6.2 Remoción de Nitratos y Materia Orgánica

Los datos de la determinación analítica de Nitratos y COT de un total de 40 muestras para los 4 grupos experimentales se presenta en la Tabla 4.5 y de forma gráfica en las figuras 4.14 y 4.15

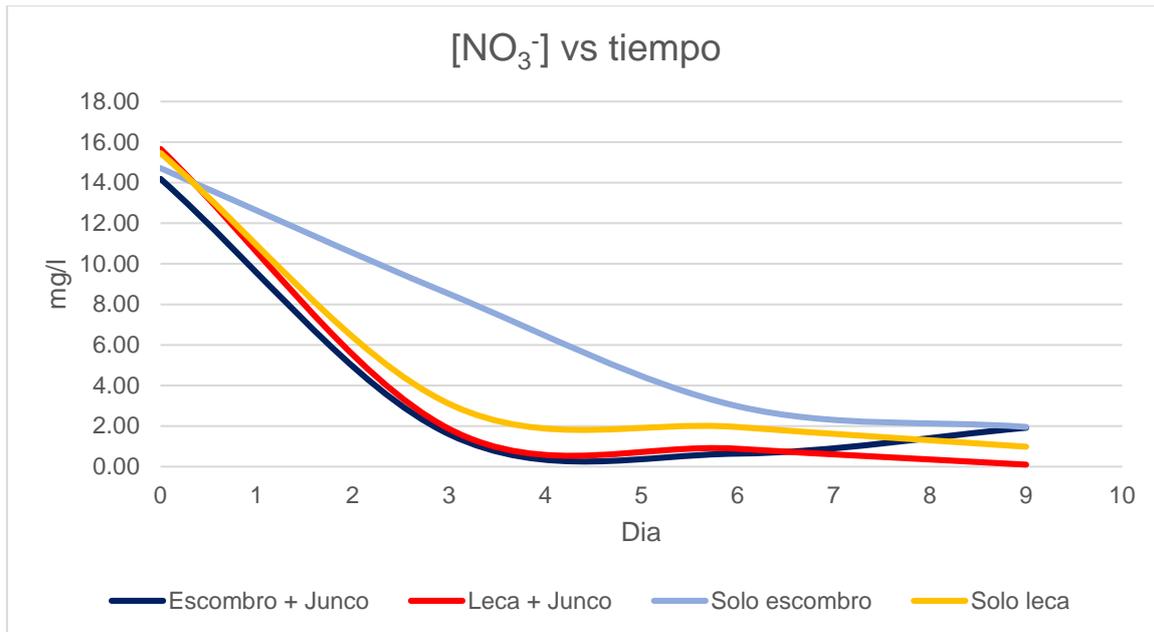
**Tabla 4.5:** Concentración de N-NO<sub>3</sub>- y COT de los 10 grupos experimentales.

Muestra	N-NO <sub>3</sub> (mg/l)				COT (mg/l)			
	18-jun	21-jun	24-jun	27-jun	18-jun	21-jun	24-jun	27-jun
E1	2,9	0,16	0,08	0,54	51,08	84,55	72,66	69,34
E2	2,9	0,07	0,11	0,62	45,33	75,18	69,87	74,49
E3	4,15	0,89	0,26	0,18	50,86	62,44	60,59	53,3
L1	5,45	0,97	0,05	0,05	37,12	73,65	102,4	98,09
L2	3,71	0,04	ND	0,01	32,37	65,95	88,82	112,6
L3	1,81	0,3	0,56	ND	66,77	100,3	116,9	130,5
SE1	5,27	3,62	0,28	0,64	46,34	23,23	32,17	26,02
SE2	1,61	0,36	1,11	0,27	52,63	35,22	29,16	30,7
SL1	3,67	ND	0,33	0,1	37,48	83,19	97,05	80,89
SL2	3,55	1,45	0,58	0,36	80	94,83	109,8	87,25

La Figura 4.14 muestra la evolución temporal de la concentración promedio de Nitratos (expresada como [NO<sub>3</sub>]) para cada grupo experimental. La concentración del día “cero” corresponde a la muestra tomada inmediatamente después de verter la solución dentro de la maceta. Como se observa, las concentraciones en este instante son menores a las de la solución (27 mg NO<sub>3</sub>/L). Esto se debe a que los macetas contenían algo de agua, diluyendo la solución.

Todos los grupos experimentales muestran una tasa de disminución de los nitratos desde el día cero. Empezando por el análisis del efecto de la vegetación, se observa, tanto en el escombros como en la leca plásticas, que los sistemas con Juncos presentan tasas mayores de remoción. En el caso del escombros este tiene una tasa significativamente mayor cuando hay presencia de Juncos.

Comparando las tasas de los sistemas “Leca + Junco” y “Escombros + Junco”, se observa que no hay una diferencia sustancial en las tasas de remoción, siendo levemente mayor la del último. A partir del tercer día, la remoción es casi definitiva y la concentración de nitratos se vuelve constante



**Figura 4.14:** Concentración de Nitratos a lo largo del tiempo.

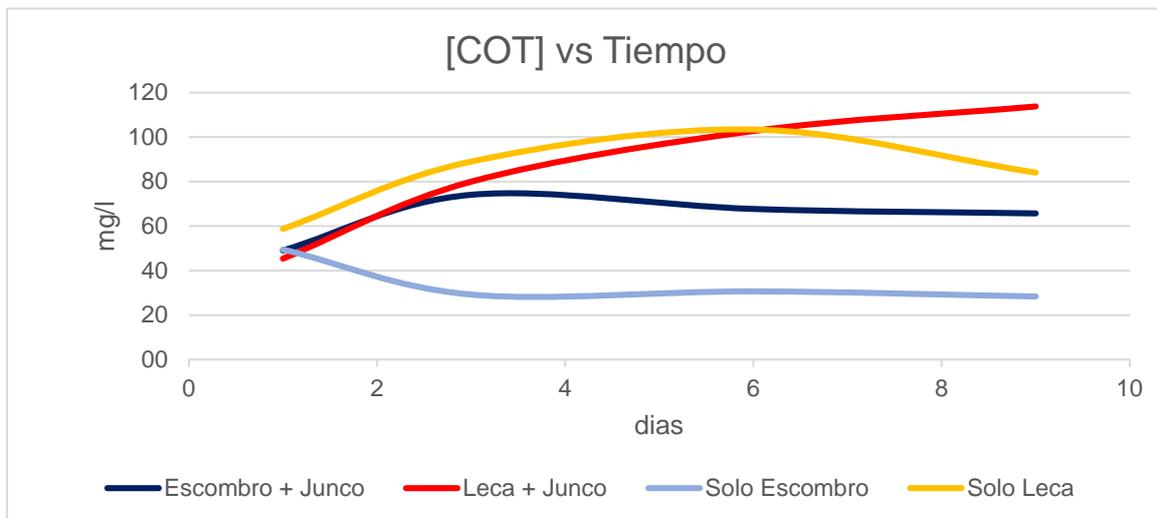
La Figura 4.15 muestra la evolución temporal de la concentración promedio de Carbono Orgánico Total. La concentración en el día “cero” difiere de la solución (50 mg COT/L) debido a dos factores: 1) Dilución por presencia de agua en las macetas 2) Los grupos experimentales fueron sometidos a un proceso de bioaumentación descrito anteriormente, con lo cual el sustrato tendría un desarrollo de biofilm y restos de medio de cultivo los que pudieron haber aportado materia orgánica a la muestra.

A partir del día cero, se esperaba una disminución de la concentración de COT. Sin embargo, los sistemas “Escombros + Junco”, “Leca +Junco” y “Solo Leca” muestran un aumento en las concentraciones de COT. Buscando una explicación a esto, Vymazal (2011) explica que los sistemas de raíz también liberan además de oxígeno, otras sustancias. Estas, suelen ser compuestos orgánicos como metabolitos anaeróbicos, ácidos orgánicos, fitometalóforos, péptidos (por ejemplo, fitoquelatinas), alcaloides, fenólicos, terpenoides o esteroides. La magnitud de esta liberación aún no es clara, pero los valores reportados generalmente están en el rango de 5 a 25% del carbono fijado fotosintéticamente. Este carbono orgánico exudado por las raíces puede actuar como fuente de carbono para los desmitificadores y, por lo tanto, aumentar la eliminación de nitrato.

Respecto al grupo experimental con únicamente leca plástica, se sospecha que el aumento de COT en el tiempo se deba a algún compuesto surfactante liberado por el material durante la experimentación. Esta teoría se sostiene a partir de la observación de burbujas y espuma en todas las muestras que estuvieron en contacto con este

material y se contrasta observando que la concentración de COT en el grupo experimental con solo escombros, muestra una disminución a lo largo del tiempo.

Esta última observación condujo a descartar, por sentido precautorio, la Leca Plástica como posible medio filtrante para HCEP. No se cuenta con la información suficiente de la composición y características químicas del material necesarias para descartar la posibilidad de que este pueda liberar compuestos químicos al medio acuoso. De ser así, su selección sería contraproducente ya que afectaría negativamente la calidad de agua del A. Morales.



**Figura 4.15:** Concentración de COT a lo largo del tiempo.

A partir de la selección del escombros como medio filtrante para el HCEP y los datos recopilados en la experimentación batch, se procedió a calcular la constante cinética de desnitrificación ( $k_{NO_3}$ ), la cual servirá en la etapa de diseño del sistema continuo. Para determinar  $k_{NO_3}$  se utilizó el modelo descripto por Stein (2006):

$$\frac{(C - C^*)}{(C_i - C^*)} = \exp\left(-\frac{kt}{h}\right) \quad (4-1)$$

Donde

$C_i$ : Concentración inicial (=16 mg/L)

$C^*$ : Concentración de fondo (= 0 mg/L)

$C$ : Concentración final (= 0,64 mg/L)

$t$ : tiempo de experimentación (= 6 días)

$h$ : altura del reactor (=0,2 m)

$k$ : Cte. cinética de remoción de primer orden (m/d)



Despejando  $k_{NO_3}$  de la ecuación 4-1 se obtuvo un valor de 0,107 m/d. Para evaluar la representatividad de este resultado, se comparó con los valores de  $k_{NO_3}$  recopilados por Kadlec & Wallace (2009) en una investigación basada en el monitoreo de N=22 humedales de flujo subsuperficial. El valor de la mediana estadística de  $k_{NO_3}$  de su investigación fue de 0,116 m/d el cual es similar al valor obtenido en la presente experimentación (teniendo en cuenta la dispersión de datos de dicha investigación). En base a esta comparación, se corroboró que la constante de desnitrificación es representativa, por lo tanto, se utilizará en una posterior etapa de diseño (sección 6.2.1).

La constante cinética de remoción de materia orgánica no pudo ser determinada debido a los resultados de la experimentación, con lo cual, se utilizará un valor bibliográfico (sección 6.2.1).

## 5. Memoria Descriptiva

A continuación, se describirá de forma integral el sistema de tratamiento a escala piloto a partir del humedal construido. Todos los cálculos para llevar a cabo el diseño, dimensionamiento, modelación y simulación del sistema se detallan en el capítulo 6: “Dimensionamiento y Memoria de Cálculo”

### 5.1 Localización

El HCEP se ubicará en el “Parque temático Batalla de Villamayor”, ex basural de Marcos Paz, descrito en la sección 3.1. La ubicación exacta puede apreciarse en la Figura 5.2. El humedal construido estará lo suficientemente cerca del A. Morales para reducir las pérdidas de carga en la conducción del agua de Arroyo a tratar, y lo suficientemente lejos para estar fuera del margen correspondiente al caudal máximo registrado en el Arroyo (a dos metros por sobre el nivel del Arroyo considerando un caudal medio). De esta forma, ante una eventual crecida del Arroyo, el humedal no se verá afectado, aún para una crecida mayor a la máxima registrada. La disposición del humedal será paralela al curso del Arroyo facilitando la descarga del agua tratada de vuelta al Arroyo. Las coordenadas correspondientes al punto de ingreso y salida de caudal del humedal son  $34^{\circ}50'19.62''S$  -  $58^{\circ}50'12.14''O$  y  $34^{\circ}50'18.76''S$  -  $58^{\circ}50'10.50''O$  respectivamente.



**Figura 5.1:** Localización de humedal construido a escala piloto.

## 5.2 Captación y elevación del agua de Arroyo

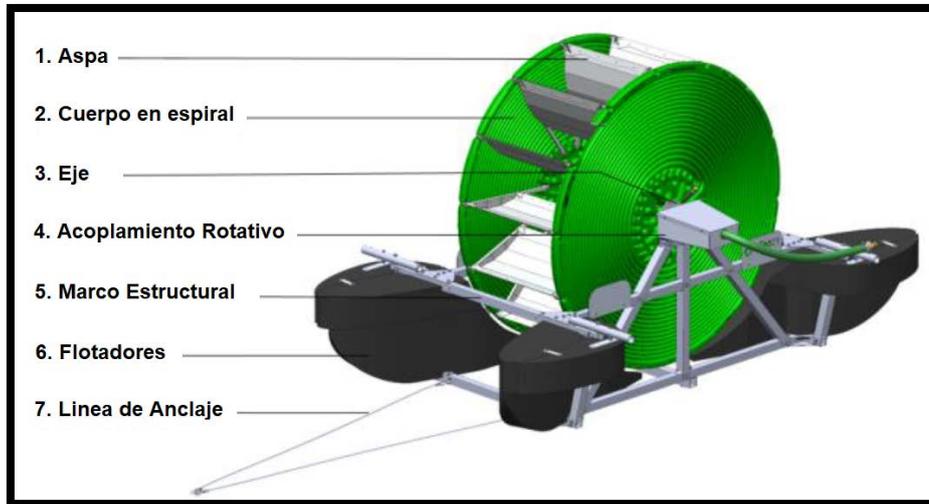
El HCEP se ubicará a dos metros por encima de la superficie del cauce medio del A. Morales. La energía necesaria para elevar el caudal a tratar será provista íntegramente por la misma energía cinética del Arroyo, sin necesidad del uso de energía eléctrica o combustibles. Para ello se utilizará una bomba hidropulsada desarrollada por la empresa holandesa *aQysta*. Se utilizará la versión flotante de la “Barsha Pump”, diseñada para amplios canales (Figura 5.2). Al ser flotante, la bomba se mantendrá al mismo nivel de la superficie del arroyo independientemente del caudal del mismo. La elevación del caudal se logra a partir de un fenómeno de compresión de aire entre columnas de agua que ingresan por un orificio dentro de un conducto espiralado que gira por acción de la fuerza que el Arroyo ejerce sobre las paletas o aspas de la bomba (Figura 5.3). Además de ser un sistema sustentable, limpio y eficiente, tiene la gran ventaja de tener un bajo mantenimiento.



**Figura 5.2:** Bomba hidráulica “Barsha” construida por aQysta.

El caudal elevado por la bomba dependerá del caudal y velocidad del Arroyo. Con lo cual, el caudal que ingrese en el humedal, no será estrictamente constante. En base al análisis de los valores históricos de caudal y velocidad en el sitio de construcción del HCEP y a partir de las especificaciones del fabricante (ver ficha técnica en Anexo I), se espera un rendimiento anual medio de bombeo de aproximadamente el 50% (**20 m<sup>3</sup>/día**), y rendimiento del 100% (40 m<sup>3</sup>/día) en eventos puntuales de aumentos de caudal del Arroyo sobre la media anual. El dimensionamiento y diseño hidráulico (Sección 7) se realizó en base a un  $Q_{\text{medio}} = 20 \text{ m}^3/\text{d}$ . El agua será bombeada a través de

una manguera caño de polietileno de baja densidad, de 1,5 pulgadas (40mm) y 20 m de longitud



*Figura 5.3: Componentes de la bomba Barsha.*

## 5.3 Pretratamiento

Los humedales construidos de flujo horizontal son sistemas utilizados, entre otras cosas, para la remoción de sólidos suspendidos, evidenciando eficiencias entre 54,5% - 76,9% (Vymazal & Kröpfelová, 2008). Los sólidos orgánicos e inorgánicos se depositan y acumulan dentro del humedal a partir de fenómenos de filtración y sedimentación. Sin embargo, la acumulación de sólidos genera problemas hidráulicos que afectan el buen funcionamiento del sistema.

Para separar y evitar el ingreso de sólidos suspendidos, el sistema de tratamiento contará con una cámara de sedimentación de sección rectangular diseñada para retener el 100% de las partículas con un diámetro menor a 0,02 mm en las condiciones de máximo caudal esperables. La sedimentación será de tipo discreta, o sea, no se someten a un proceso de coalescencia con otras partículas, manteniendo sus propiedades físicas (peso específico, tamaño, forma). El sedimentador está compuesto por cuatro zonas (Figura 5.4):

### a) Zona de entrada

Zona de transición donde el flujo impulsado por la bomba se vuelve uniforme. El caudal bombeado primero ingresa en una canaleta para distribuirse de forma homogénea a lo ancho de la cámara.

### b) Zona de sedimentación

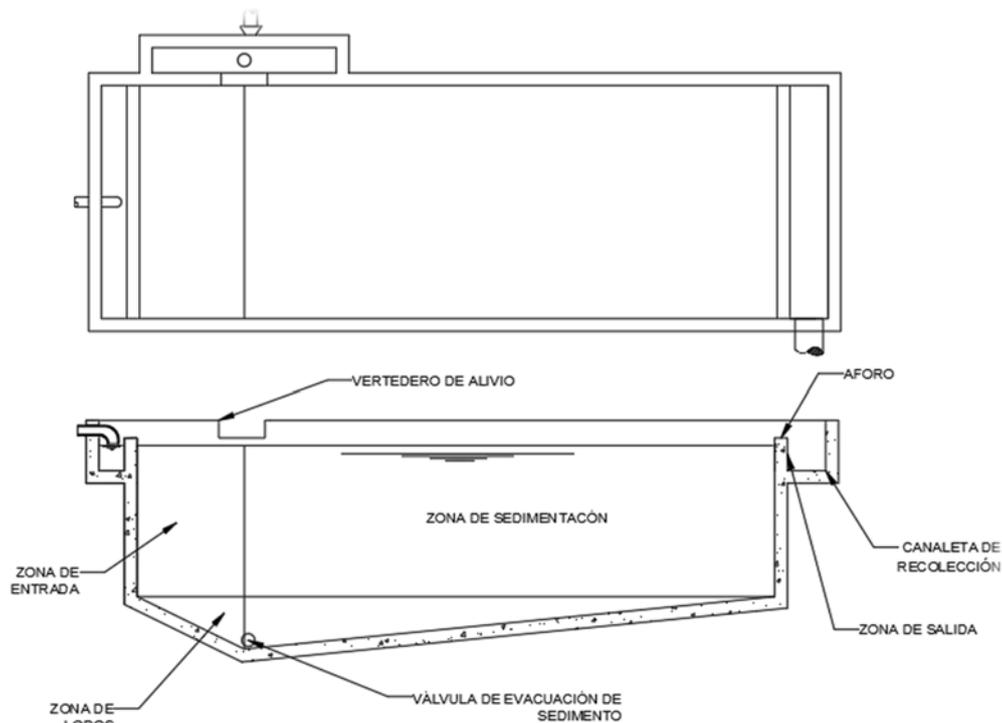
Zona rectangular con volumen  $V= 1,4 \text{ m}^3$ , longitud  $L= 2,5 \text{ m}$ , ancho  $W= 0,92 \text{ m}$  y alto  $h= 0,6 \text{ m}$ , diseñada para generar las condiciones necesarias (flujo horizontal con la misma velocidad en todos los puntos) para sedimentar las partículas de diámetro mayor a  $0,02 \text{ mm}$ . La velocidad del flujo ( $<0,1 \text{ cm/s}$ ) en esta zona, asegura que los sólidos acumulados en la tolva no sean resuspendidos.

### c) Zona de salida

En esta zona, el agua fluye a través de un vertedero en forma de “V”, el cual permite tener una lectura del caudal elevado por la bomba. para dirigirse a una canaleta de recolección, la cual está conectada a un caño que conecta el HCEP. Además, la cámara contara con un vertedero de alivio para eventos extraordinarios de alimentación mayor a  $40\text{m}^3$  (caudal máximo de bomba) y así evitar rebasamiento en la cámara.

### d) Zona de recolección de sedimento

Consiste en una tolva de  $V= 0,24 \text{ m}^3$  con una pendiente del 10% para facilitar el movimiento de los sólidos sedimentados hacia una válvula de extracción de 2 pulgadas ubicada en el vértice inferior de la tolva. La misma estará conectada a una manquera caño de 2 pulgadas por donde se conducirá el sedimento para ser devuelto nuevamente al A. Morales.



**Figura 5.4:** Cámara de sedimentación discreta.



A continuación, se describirá el tratamiento primario del sistema. Los objetivos se describen en la etapa 5.4.1. Las etapas, diseño y componentes se describen en la sección 5.4.2. Las variables hidráulicas se discuten en la sección 5.4.3. En la sección 5.4.4 se describen los diferentes mecanismos por los cuales los contaminantes de interés serán removidos y en la 5.4.5 se presentarán las eficiencias de remoción esperables para dichos contaminantes en diferentes escenarios.

## 5.4 Tratamiento Primario

### 5.4.1 Objetivos

El objetivo del tratamiento primario es la reducción de los caudales másico de entrada,  $Q_{me}$  (gr/día) respecto al de salida,  $Q_{ms}$  (gr/día), en un 80% para la  $DBO_5$ ,  $N_{org}$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$  y TP. Este objetivo, no solo pretende reducir las concentraciones de dichos contaminantes por debajo del límite de la normativa vigente<sup>4</sup>, sino también que el estado trófico del caudal tratado, se aproxime a un estado “oligotrófico” y no “eutrófico”

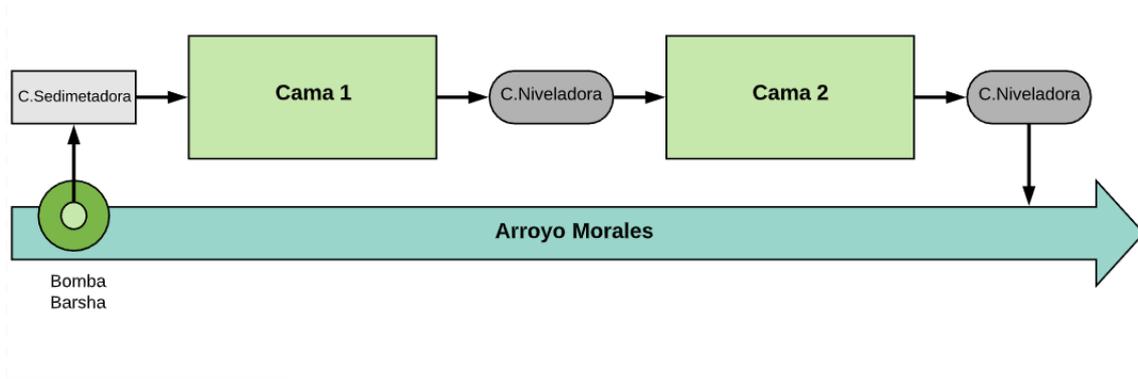
El diseño y dimensionamiento del sistema contempla las fluctuaciones de las variables hidráulicas a lo largo del año, para cumplir los objetivos de tratamiento, en las condiciones más drásticas de operación.

### 5.4.2 Etapas, Componentes y diseño

Luego del pretratamiento, el caudal será conducido a un tratamiento primario conformado por un humedal construido de flujo subsuperficial con dos camas en serie (cama 1 y 2) y sistemas de nivelación de agua, para luego ser conducido nuevamente al A. Morales (Figura 5.5). Como se explicará con más detalle en la sección 7.2.1 la configuración en serie permitirá tratar el agua de Arroyo de forma más eficiente, reduciendo el área total requerida de humedal.

---

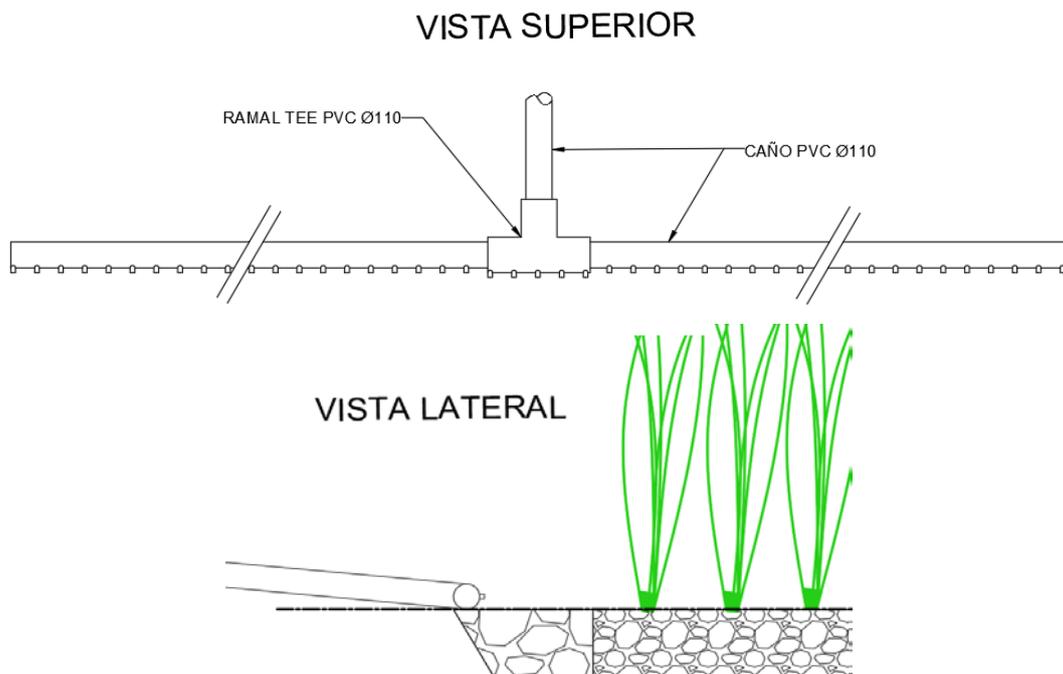
<sup>4</sup> Resolución 46/2017, “Calidad de uso del agua superficial de la cuenca Matanza-Riachuelo”, ACUMAR



**Figura 5.5:** Esquema de tratamiento para las aguas del A. Morales.

### Distribución inicial de Flujo

El agua se distribuirá de forma homogénea a lo ancho del humedal gracias a un sistema de distribución horizontal (Figura 5.6), con el fin evitar zonas “muertas” sin irrigación de flujo. Este consiste en una tubería de PVC en forma de “T” 110mm con extremos sellados y orificios de 2 cm de diámetro a lo largo de su pared, cada 10 cm, por donde podrá drenar el agua. Los orificios se ubican en la mitad de la pared de la tubería para asegurar que el agua se distribuya primero longitudinalmente por la estructura, para luego drenar por las aberturas.



**Figura 5.6:** Sistema de distribución homogénea de caudal.

## Cama 1

La primera cama tendrá una geometría troncopiramidal, con paredes a un ángulo de 60° respecto a la horizontal. Sus dimensiones se observan en la Tabla 5.1.

El agua ingresará en la “Zona A” la cual tiene como medio filtrante rocas de tamaño entre 60-100 mm. Estas estarán contenidas en gaviones de dimensiones 30 x 50 x 100 cm. La función de estos es proporcionar un medio filtrante de alta conductividad para distribuir el caudal de forma homogénea en el inicio del tratamiento y así evitar fenómenos de *clogging*. Además, al tratarse de gaviones, estos pueden ser retirados fácilmente, acondicionados o reemplazados ante una eventual acumulación de materia debidos a la sedimentación en el ingreso del humedal (gran parte de la sedimentación ocurre en esta zona)

**Tabla 5.1:** Dimensiones de Cama 1.

Área (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	L:A	Volumen (m <sup>3</sup> )
255	22,6	11,3	0,3	2	76,5

El flujo continuará hacia la “Zona B” donde el medio filtrante serán restos de escombros (70% ladrillo - 30% Hormigón). Al tener que cumplir la función de sustrato para la vegetación, la granulometría será de 20-30 mm, menor que la Zona B. Esta granulometría es lo suficientemente pequeña para:

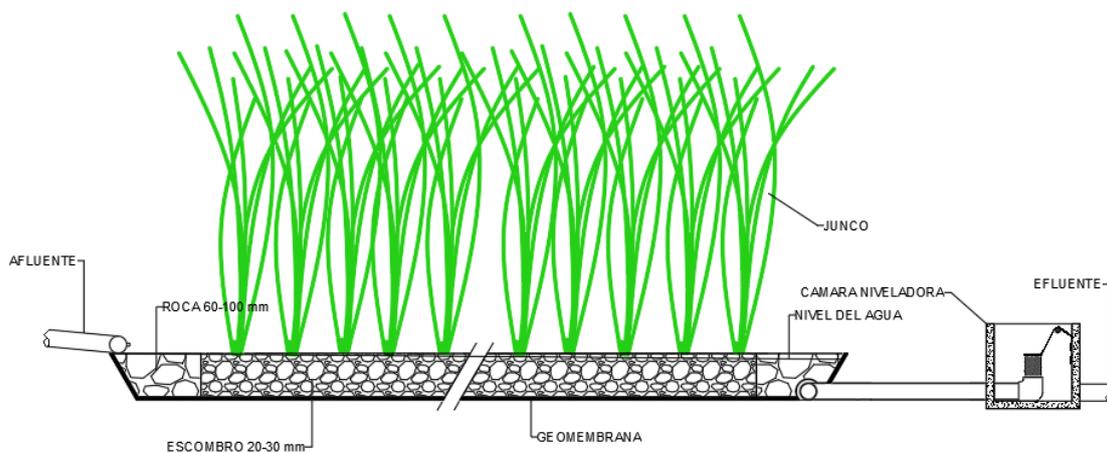
- Generar una importante superficie de soporte para las películas de microorganismos o *biofilms* necesarias para el tratamiento del agua de Arroyo
- Generar una importante superficie de adsorción para especies con carga.
- Buena adaptabilidad del sistema radicular de los Juncos *Schoenoplectus californicus* (Junco)
- y lo suficientemente grande para:
  - Asegurar una buena conductividad hidráulica (kh)
  - Evitar problemas hidráulicos como el *clogging*

Las características de los restos de escombros como medio filtrante y soporte, como también la vegetación (Juncos) se describieron en las secciones 3.6 y 3.7

A medida que el agua fluya lentamente y entre en contacto con el sustrato, biofilm y sistema radicular de los juncos, ocurrirán procesos físico-químico-biológicos a través de

los cuales se removerán, con diferentes eficiencias, contaminantes como materia orgánica, nutrientes responsables de eutrofización (especies con Nitrógeno y Fosforo), hidrocarburos, metales y patógenos entre otros.

Si bien, los mecanismos específicos de remoción de contaminantes de interés para el A. Morales se describirán detalladamente en la sección 5.4.4, cabe mencionar que la altura (h) de la cama 1 y 2, tienen mucho que ver con el tipo de mecanismo que tendrá lugar en el humedal. Algunas especies químicas necesitan un entorno con determinada concentración de  $O_2$  disuelto para ser degradadas, otras, por el contrario, necesitan condiciones reductoras. Otras especies, tienen una degradación secuencial donde necesitan etapas aeróbicas y luego anaeróbicas (o viceversa) para ser degradadas. Un ejemplo son las especies orgánicas de Nitrógeno y Amonio. Si bien los HSSF son sistemas de condiciones predominantemente reductoras debido a su relativa limitación para la transferencia de  $O_2$ , se pueden adoptar mediadas de diseño para maximizar los fenómenos de transferencia de  $O_2$ . La cama 1, se diseñó con una altura de 0.3 m para que los juncos desarrollen su matriz radicular en todo el volumen el humedal, o sea, hasta el suelo del mismo (Figura 5.7). De esta forma, se maximizará la transferencia de oxígeno desde la atmosfera hacia todo el volumen del humedal mediante el transporte de oxígeno de los Juncos (hasta  $7,5 \text{ g } O_2/m^3.d$  según U.S. EPA ,1993)

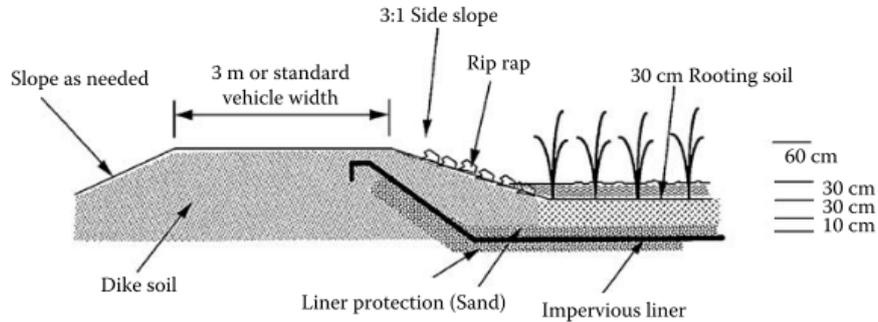


**Figura 5.7:** Humedal de Flujo sub-superficial con estructuras de distribución, colección y nivelación de agua. Tomado de Kadlec (2009)

## Membrana

Tanto la cama 1 como la cama 2 tendrán una geo membrana de polietileno de 420 micrones para generar un sistema impermeable y evitar que el agua drene hacia el suelo. La disposición de la geomembrana se observa en la Figura 5.8. Sobre la misma

se dispondrá una capa de arena de 5cm como capa protectora de cualquier objeto filoso que pueda dañar la membrana.



**Figura 5.8:** Disposición de geomembrana. Tomado de Kadlec (2009)

### Zona de desagüe

El flujo seguirá avanzando de forma homogénea a través del área transversal del humedal hasta llegar a la “Zona C”, la cual tiene la misma funcionalidad que la Zona A (y el mismo medio filtrante) para generar una zona de alta conductividad hidráulica y distribuir de forma homogénea el flujo hacia tubería de desagüe en forma de “T”. Esta consiste en un tubo de PVC de 110 mm ubicado en el suelo del humedal ocupando todo el ancho del mismo. Tendrá orificios de 2 cm de diámetro separados con una distancia de 10 cm (al igual que la tubería de distribución inicial). Para proteger la tubería de desagüe del peso de las rocas, este se colocará de forma coaxial dentro de un tubo ranurado de diámetro 160 mm que servirá como soporte del medio filtrante (ver especificaciones en Anexo I)

### Cámara niveladora

El control y manejo de la altura del nivel de agua dentro del humedal es fundamental para un correcto funcionamiento del sistema. El nivel de agua deberá mantenerse por debajo de la superficie del medio filtrante y deberá asegurar un contacto continuo con el sistema radicular de los Juncos.

La cámara de nivelación funciona a partir del principio de vasos comunicantes, donde la altura del nivel de agua requerido en el humedal será la misma altura de desagüe de la tubería dentro de la bóveda. Luego el agua drena por una cañería secundaria fuera de la bóveda.

La O&M del sistema demandará un constante control y cambios de nivel de agua dentro de la cama 1 y 2 en función de las condiciones de trabajo. Es por eso que la cámara de nivelación, será de muy fácil operación. El nivel de agua se nivelará a partir

de la rotación de la cañería conectada a un codo móvil y sostenida por una cadena (Figura 5.9)



**Figura 5.9:** Cámara de nivelación de altura de agua.

## Cama 2

La cama 1 y 2 difieren únicamente en la profundidad (Tabla 5.2) El resto de las variables de funcionamiento y diseño son exactamente iguales.

Como se explicó anteriormente, la profundidad del humedal influye en las condiciones fisicoquímicas del medio, principalmente en la capacidad de transferencia de oxígeno desde la atmósfera hacia el humedal. Al tener una profundidad dos veces mayor que cama 1, la matriz radicular ocupará solo los primeros 30 cm del humedal. El resto del volumen, no tendrá presencia de raíces que puedan incorporar oxígeno ni una superficie expuesta que dé lugar a un intercambio gaseoso. La cama 2 será un sistema con bajas concentraciones de oxígeno que aumentará la eficiencia de mecanismos químicos y biológicos que necesitan condiciones reductoras.

La cámara de nivelación será idéntica a la de la cama 1. Una vez que el agua salga de la cama 2 por la cámara niveladora, ingresará a una última cámara de aforo y toma de muestra. La medición de caudal a la salida del sistema resulta de gran importancia para entender cómo afecta el aporte y pérdida de volumen de agua por precipitaciones y fenómenos de evapotranspiración respectivamente. Este se medirá con un vertedero idéntico al de la cámara de sedimentación.

Finalmente, el agua de arroyo tratada será conducida a través de una manguera caño de polietileno de baja densidad, de 1,5 pulgadas (40mm) y 20 m de longitud de vuelta al cauce del A. Morales

**Tabla 5.2:** Dimensiones de cama 2

Área(m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	L:A	Volumen (m <sup>3</sup> )
255	22,6	11,3	0,6	2	153

### 5.4.3 Hidráulica

La hidráulica del sistema es intrínsecamente compleja. En primer lugar, se tratará de un flujo de alimentación continuo, pero también fluctuante en el tiempo debido a rendimientos de la bomba, que a su vez dependerá de variables hidráulicas del A. Morales, fenómenos de precipitaciones y evapotranspiración, por tratarse de un sistema abierto a la atmósfera. Además, variables relacionadas al medio filtrante como la conductividad hidráulica ( $k_h$ ) y la porosidad ( $e$ ) tampoco serán constantes.

En este escenario, el sistema tendrá la capacidad de ajustar el nivel de agua mediante una cámara niveladora, y así asegurar un correcto funcionamiento hidráulico frente a fluctuaciones.

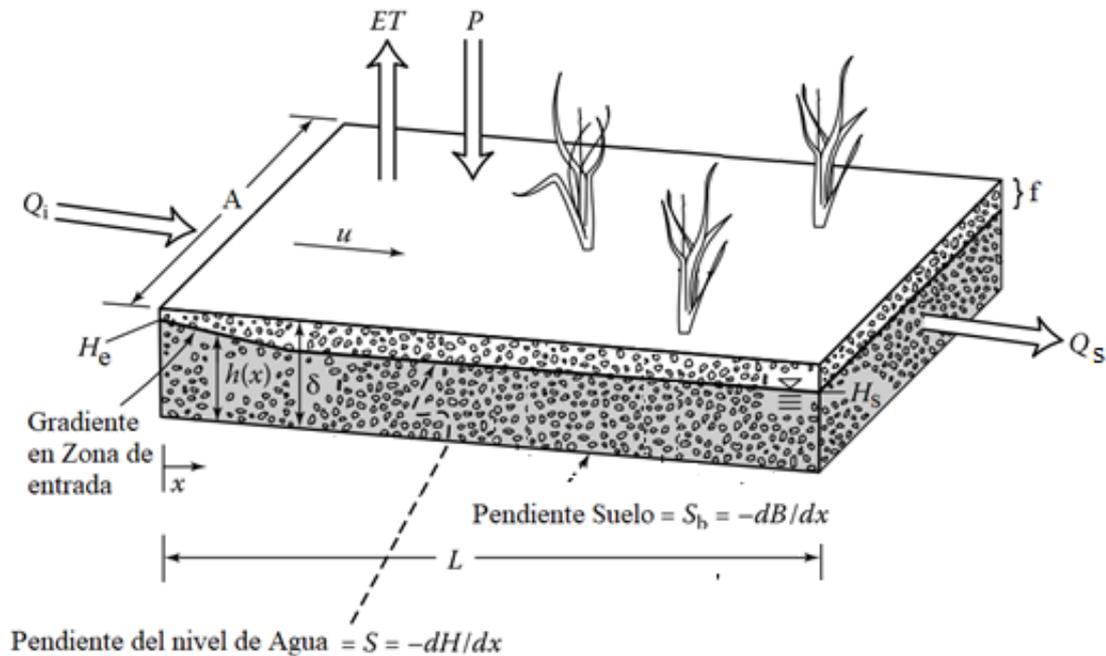
En la Tabla 5.3 pueden observarse las variables hidráulicas del sistema en serie. El mismo se diseñó para tener una eficiencia de remoción del 80% para ciertos contaminantes promotores de la eutrofización en las condiciones hidráulicas medias, o sea para una caudal de alimentación ( $Q_i$ ) de 20 m<sup>3</sup>/d. Puede observarse que el tiempo de residencia hidráulico (TRH) es inversamente proporcional al caudal tratado

El caudal que ingresa al sistema de humedales, necesariamente requiere de alguna fuerza impulsora para que el agua pueda fluir a través del medio filtrante y raíces de las plantas y vencer las fuerzas de fricción a lo largo del sistema de tratamiento para volver nuevamente al Arroyo. Esta fuerza estará dada por un gradiente de altura, haciendo que el agua fluya por acción de la gravedad. El caudal capaz de atravesar el sistema de tratamiento dependerá de la conductividad hidráulica del medio filtrante ( $k_h$ ), la diferencia de altura entre el nivel de agua en la entrada ( $h_i$ ) y la salida ( $h_o$ ) y la relación largo-ancho (L:A) (se explica detalladamente en sección 6.2.3).

La generación de un gradiente de altura a partir de pendiente de suelo del humedal ( $S_b$ ), es una opción hidráulicamente y estratégicamente incorrecta, ya que el sistema se vuelve muy sensible ante variaciones de caudal y cambios en la  $k_h$  trayendo como consecuencia fallas hidráulicas. Además, al ser una pendiente fija, no es posible cambiar el gradiente para ajustes hidráulicos. Es por ello que el sistema de tratamiento usará una cámara niveladora, capaz de generar un gradiente, el cual puede ajustarse fácilmente para un óptimo funcionamiento hidráulico, sin la necesidad de una pendiente en el suelo del humedal y sus problemas asociados.

En base al caudal de operación, el cual se determina a partir de un balance hídrico (Figura 5.11), se nivelará la altura de agua ( $h_{(x)}$ ) para que esta no sobrepase el nivel del medio filtrante, y, además, que la diferencia de la altura del medio filtrante y  $h_{(x)}$ , sea menor a 10 cm ( $f < 10\text{cm}$ ), esto es para asegurar una irrigación continua al sistema

radicular de los Juncos de aproximadamente 30 cm de profundidad). La relación L:A es sumamente importante en el diseño. Los humedales más largos y estrechos, son más susceptibles a tener problemas hidráulicos debido a que su reducida área de sección transversal, aumenta la carga orgánica, pudiendo genera fenómenos de obstrucción y clogging. La relación L:A= 2 seleccionada para el diseño, dará como resultado una amplia sección transversal, lo que ayudará a evitar problemas hidráulicos.



**Figura 5.10:** Esquema del balance hídrico del HCEP: Caudal de ingreso ( $Q_i$ ), Caudal de salida ( $Q_s$ ) Precipitaciones ( $P$ ), Evapotranspiración ( $ET$ ), velocidad de flujo ( $u$ ), área ( $A$ ), longitud ( $L$ ), pendientes ( $S$ ) y altura de nivel de agua ( $h(x)$ ). Tomado de Kadlec (2009).

Ambos humedales tendrán una pendiente del suelo  $S_b$  mínima (1%) con el fin de poder drenar la totalidad del volumen de agua, ante eventuales tareas de mantenimiento

En la Tabla 5.3 pueden observarse las alturas de nivel de agua a la salida ( $h_s$ ) que deben ser reguladas en la cámara de nivelación, para escenarios de caudales de operación mínimos, medios y máximo. Como se observa, en las tres condiciones se asegura un nivel suficientemente alto para la irrigación de la vegetación, y lo suficientemente bajo para asegura un flujo subsuperficial.

**Tabla 5.3:** Variables hidráulicas del sistema en serie de HFSS 1 y 2

Variable	Unidad	HSSF 1			HSSF 2		
		Q <sub>min</sub>	Q <sub>med</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>	Q <sub>med</sub>	Q <sub>max</sub>
Q <sub>i</sub>	(m <sup>3</sup> /d)	7,4	20,0	40,0	7,4	20,0	40,0
P <sub>v</sub> / P <sub>i</sub>	(mm/d)	3,23 / 1			3,23 / 1		
ET <sub>v</sub> / ET <sub>i</sub>	(mm/d)	5 / 2			5 / 2		
k <sub>h</sub>	m/d	5000	5000	5000	5000	5000	5000
h <sub>e</sub>	m	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6
h <sub>s</sub>	m	0,290	0,272	0,240	0,595	0,586	0,572
TRH	d	3,9	1,5	0,7	8,4	3,0	1,5
L:A	-	2	2	2	2	2	2

#### 5.4.4 Mecanismos de remoción

A continuación, se detallan los mecanismos físicos, químicos y biológicos de remoción y transformación de contaminantes en el HCEP. Se describen únicamente los mecanismos de remoción de la Materia Orgánica, Nitrógeno y Fosforo, los cuales como se explicó anteriormente, representan los contaminantes de mayor impacto ambiental en el A. Morales.

##### 5.4.4.1 Materia Orgánica

El agua que ingresará al HCEP contendrá una amplia variedad de sustancias orgánicas con carbono en formas solubles y de partículas, algunas de ellas fácilmente biodegradables y otras muy poco.

El tiempo de residencia de la materia orgánica (MO) tiende a ser considerablemente mayor al tiempo de retención hidráulica porque los procesos de sedimentación y la adsorción eliminan parte de la materia orgánica antes de la degradación microbiana. En los meses más fríos del año, donde la cinética microbiana de degradación de MO es menor, las partículas de MO tenderán a acumularse. En los meses más calurosos, la degradación de la MO atrapada será mayor. Esto explica porque a pesar de que la cinética de remoción depende de la temperatura, no se evidencian diferencias significativas en las tasas de remoción de las estaciones cálidas y las frías (E. Timothy Oppelt, 2000).

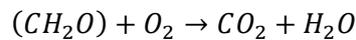
La descomposición de la MO en los humedales será de tipo aeróbica y/o anaeróbica dependiendo de la cantidad de MO y de la tasa de transferencia de O<sub>2</sub> en el humedal. El oxígeno requerido para la degradación provendrá a partir de la discusión desde la



atmosfera y de la incorporación del mismo en la rizósfera de los Juncos. Si prevalecen entornos aeróbicos, la descomposición será rápida con una acumulación mínima en el humedal. La descomposición anaeróbica (predominante en los HSSF) será más lenta y con mayor acumulación de MO.

### Degradación Aeróbica

Las dos fuentes principales de carbono para los microorganismos son los compuestos orgánicos (O. heterótrofos) y el CO<sub>2</sub> (O. autótrofos). La degradación aeróbica de la MO soluble por bacterias heterótrofas puede representarse por la ecuación:



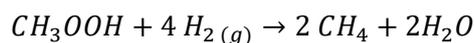
Prácticamente todos los procesos de biodegradación suceden en la superficie de biofilm que se encuentran en el medio filtrante, sedimento y la biomasa vegetal. La cantidad de microorganismos suspendidos en el líquido es insignificante respecto a los anteriores. Se espera que este tipo de degradación sea mayor en la cama 1, debido a su poca profundidad y gran cantidad de volumen de matriz radicular respecto al volumen total.

### Degradación Anaeróbica

A diferencia de la degradación aeróbica, es un proceso de múltiples etapas que ocurren en ausencia de O<sub>2</sub> a través de microorganismos heterótrofos facultativos y/o estrictamente anaerobios. En la primera etapa, se obtiene productos de la fermentación de la MO como el ácido acético:



Los microorganismos metanogénicos, utilizan los productos de la fermentación para producir metano:



Debido a su mayor profundidad, se espera un entorno anaeróbico en la cama 2. La degradación anaeróbica es bastante más lenta que la aeróbica. Es por ello, que al tener el doble de volumen que la cama1, el TRH también será el doble, dando el tiempo suficiente que requiere la degradación anaeróbica.

La baja tasa de transferencia de oxígeno en la mayoría de los HSSF hace que predomine la degradación anaeróbica a menos que el efluente a tratar tenga bajas

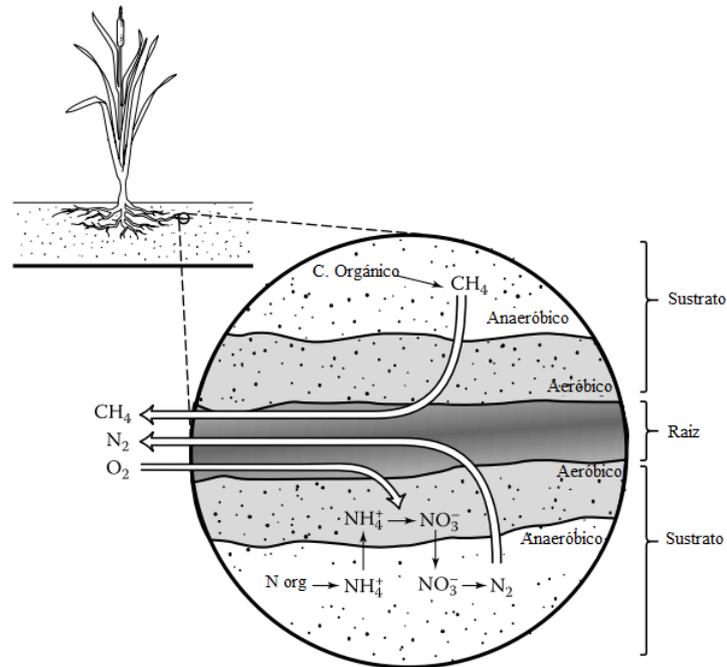


cargas de MO. La mayor parte del oxígeno estará en la porción superior de la columna de agua, cerca de la superficie y de las raíces de las plantas. Un estudio en España indicó que los HSSF con una profundidad de agua de 0.27 m tenían una mayor eficiencia de remoción que los lechos que tenían 0.5 m de profundidad (Wallace, American, Engineering, Knight, & Solutions, 2006)

#### **5.4.4.2 Nitrógeno**

Son varias las formas de nitrógeno que estarán presentes en el agua de Arroyo, principalmente como nitrógeno orgánico, amonio, nitrito, nitrato, las cuales cambiarán en base a las condiciones redox del sistema de tratamiento. Las condiciones redox dependerán de la tasa de transferencia de O<sub>2</sub> como también de la carga orgánica que reciba el sistema.

En los HSSF la oxidación de los compuestos de nitrógeno se rige principalmente por la disponibilidad de oxígeno en la rizósfera. La dinámica del oxígeno en la zona de la raíz es compleja (Figura 5.11). La transferencia de oxígeno a las raíces es impulsada por una variedad de procesos fisiológicos y físicos. La vegetación transfiere oxígeno a sus sistemas de raíces para desintoxicar su entorno de enraizamiento. Las tasas de transferencia varían a lo largo del día y de la estación en el año. Dentro de la rizósfera, existen demandas competitivas entre las bacterias para la oxidación de materia orgánica, compuestos de nitrógeno y sulfuros. La composición del agua a tratar y las tasas de carga afectaran la condición redox de la zona radicular lo que influye en la cantidad de oxígeno que estará disponible para la oxidación de compuestos nitrogenados.



**Figura 5.11:** Micro-región aeróbica alrededor generada por el sistema radicular de la planta dentro un entorno anaeróbico.

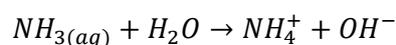
A continuación, se describen en detalle las transformaciones del Nitrógeno a partir de fenómenos físicos, químicos y biológicos que tendrán lugar en el sistema de humedales en serie:

### Mineralización (Amonificación)

Es un proceso que puede ocurrir en condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas por el cual el nitrógeno orgánico ( $N_{org}$ ) es convertido en nitrógeno inorgánico ( $N_{ino}$ ). Las condiciones aeróbicas favorecen la amonificación con tasas mayores que en ambientes anaeróbicos. Para una remisión eficiente del  $N_{org}$ , lo más práctico y conveniente es que esta reacción ocurra antes que otras transformaciones del Nitrógeno. Este es el principal motivo de porque la cama 1, con un diseño que favorecerá la transferencia de  $O_2$ , es la primera etapa del tratamiento primario.

### Volatilización del Amoniac

En medios acuosos, el amoniac ( $NH_3$ ) se hidroliza al ion amonio ( $NH_4^+$ ):



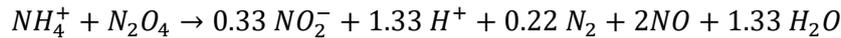
Este proceso estará controlado por la concentración de amonio en el agua, temperatura, tipo y número de plantas en el pH del sistema.

### Oxidación del amonio ( $\text{NH}_4^+$ )

Las bacterias que llevan a cabo la oxidación del incluye las *Nitrosomonas*, *Nitrospira* y *Nitrosococcus*. Son capaces de oxidar amonio a nitrito en condiciones aerobias:



Estos organismos también tienen un metabolismo anaeróbico, donde intervienen los óxidos de nitrógeno. Tanto en las reacciones aeróbicas como anaeróbicas se usa la misma enzima: amonio monoxigenasa.

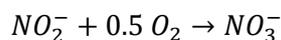


En condiciones anaeróbicas, en vez de usar  $\text{O}_2$ , las bacterias utilizarán  $\text{N}_2\text{O}_4$  como aceptor de electrones.  $\text{N}_2\text{O}_4$  (tetróxido de nitrógeno) es la forma dimérica de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). El  $\text{NO}_2$  no está disponible en entornos naturales en condiciones anaeróbicas, por lo que la capacidad de estas bacterias para oxidar anaeróbicamente el amoníaco depende de un entorno aeróbico cercano donde se pueda producir  $\text{NO}_2$ . (Wallace et al., 2006).

El amonio no solo será removido por el metabolismo de las bacterias oxidantes, sino que otro fenómeno físico tendrá gran relevancia para la remoción de compuestos catiónicos. Se trata del fenómeno de adsorción sobre la superficie del medio filtrante con una capacidad de intercambio cónico (CIC), la cual se irá regenerando continuamente por consumo del amonio adsorbido a través de la nitrificación biológica. El medio filtrante que consistirá en restos de ladrillo y hormigón (70:30) reporta, en un estudio de Ren et al. (2007), una adsorción de  $\text{NH}_4^+$  significativamente alta frente a otros materiales de  $0,27 \text{ mg NH}_4^+ / \text{g}_{\text{sustrato}}$

### Oxidación aeróbica del Nitrito

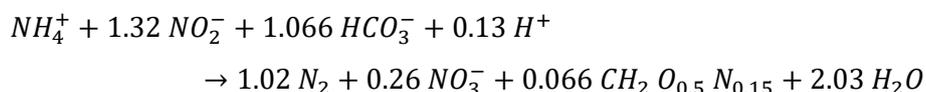
Esta es llevada a cabo por los géneros de bacteria *Nitrobacter* y *Nitrospira*:



Cuando los niveles de oxígeno disuelto son menores a  $0.5 \text{ mg/L}$ , esta reacción es inhibida.

### Oxidación anaeróbica del amonio

Es llevada a cabo por un grupo de bacterias del orden Planctomycetales, entre ellas *Brocardia anammoxidans*, *Kuenia stuttgartiensis* y *Scalindua sorokinii* las cuales son capaces de utilizar el nitrito para oxidar el amonio:

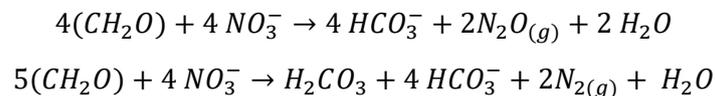


Este proceso es energéticamente más demandante que la oxidación aeróbica del amonio. Estas bacterias son muy sensibles al oxígeno, inhibiéndose frente a concentraciones muy bajas de O<sub>2</sub>.

Los HSSF son, en muchos sentidos, ideales para estas bacterias. Las bajas velocidades de flujo y la abundancia de superficie significan que una vez establecidas, es probable que estas bacterias mantengan poblaciones estables. (Wallace et al., 2006).

### Reducción del Nitrógeno (Desnitrificación)

Es la reducción de especies oxidadas del nitrógeno como nitrito o nitrato a nitrógeno gaseoso (N<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O) que es liberado a través de la columna de agua hacia la atmósfera. Puede ser llevada a cabo por bacterias y algunos hongos en ambientes aeróbicos y anaeróbicos. Para llevar a cabo esta transformación los microorganismos necesitan de una fuente de carbono biodegradable:



Donde CH<sub>2</sub>O es la MO biodegradable necesaria para el proceso. Esta puede tener diferentes fuentes como la biomasa de la vegetación y la MO presente en el efluente. Se estima que la relación necesaria C:N se por lo menos 5:1 para evitar restricciones por fuente de carbono. (Ren et al., 2007).

#### 5.4.4.3 Fósforo

El fósforo se encuentra en el agua (disuelto o en partículas) principalmente como fosfatos orgánicos e inorgánicos.

Como no hay un componente gaseoso importante en el ciclo biogeoquímico, el fósforo tiende a moverse hacia el sumidero de sedimentos en los sistemas naturales y escasear en el ecosistema. De hecho, la acumulación de fosfatos minerales y biomasa en el sedimento es el mecanismo principal para la eliminación de fósforo en el ambiente del humedal.

En términos generales, los humedales HSSF no eliminan cantidades significativas de fósforo a menos que se utilicen medios filtrantes con una considerable CIC. Se estima según el estudio de Ren et al. (2007) que los restos de escombros como medio filtrante retendrán por adsorción 0,035 mg TP/g sustrato. A diferencia del amonio, el fósforo agotará con el tiempo la capacidad de intercambio catiónico de medio filtrante.

Las plantas incorporarán fósforo como nutriente, fijándolo a su matriz vegetal. Este mecanismo será mayor en épocas de crecimiento del Junco. Los mecanismos restantes son la sedimentación y la adsorción.



### 5.4.5 Eficiencia de Remoción esperables

Los resultados de eficiencia presentados y discutidos a continuación se obtuvieron a partir del modelado y simulación computacional. Se utilizó el modelo de primer orden  $P-k-C^*$  desarrollado por Kadlec & Wallace (2009) el cual permite diseñar y modelar humedales construidos teniendo en cuenta las constantes de remoción, temperatura, caudales, concentraciones de fondo y del efluente, dimensiones del humedal, entre otras. La gran ventaja de este modelo es que permitirá predecir la eficiencia de remoción del humedal en diferentes condiciones hidráulicas y de temperatura a lo largo de la operación del HCEP.

Como se mencionó anteriormente, el HCEP se diseñó para la remoción de caudal másico de contaminantes promotores de la eutrofización:  $DBO_5$ , especies de Nitrógeno y Fósforo, en un 80% en las condiciones estacionales de tratamiento más desfavorables. Para ello se modelaron y simuló escenarios de diferentes características, para poder comparar las eficiencias de remoción. Los escenarios estudiados fueron los de: “Verano”, “Invierno” y “Crítico”. Los dos primeros, se modelaron con los valores medios históricos de: temperatura (T); precipitación (P); evapotranspiración (ET) y concentraciones de los contaminantes estudiados (a partir de la BDH de ACUMAR en la estación ARROMORA1- 37) correspondientes a los meses de las estaciones de invierno y de verano. El escenario “Crítico” se modeló para simular un tratamiento en las peores condiciones de tratamiento posibles. Este corresponde a un régimen hídrico de tipo invernal, con un caudal bombeado de ingreso máximo ( $Q_i = 40 \text{ m}^3/\text{d}$ ) con las concentraciones máximas históricas registradas. Si bien el sistema no se diseñó para lograr los objetivos de tratamiento en estas condiciones, se simuló de igual modo para entender como respondería el sistema ante estas eventuales situaciones “críticas”. Las ecuaciones, variables y valores utilizadas para la modelización y simulación de tratamiento se detallan en la sección 7.2.

La Tabla 5.4 presenta los valores iniciales y finales de concentraciones ( $C_i$  y  $C_f$ ) para cada contaminante estudiado, caudales másicos ( $Q_{mi}$  y  $Q_{mf}$ ) y porcentaje de remoción. El porcentaje de remoción se calculó a partir de los caudales másicos (gr/d) y no a partir de las concentraciones (mg/L) de entrada y salida, ya que, como se explicó en el balance hídrico, el caudal de entrada y de salida son distintos. Es por ello, que, ante eventos de una evapotranspiración o precipitación significativas, habría una concentración o dilución respectivamente de los parámetros estudiados, pudiendo traer errores en la interpretación de la eficiencia de tratamiento.

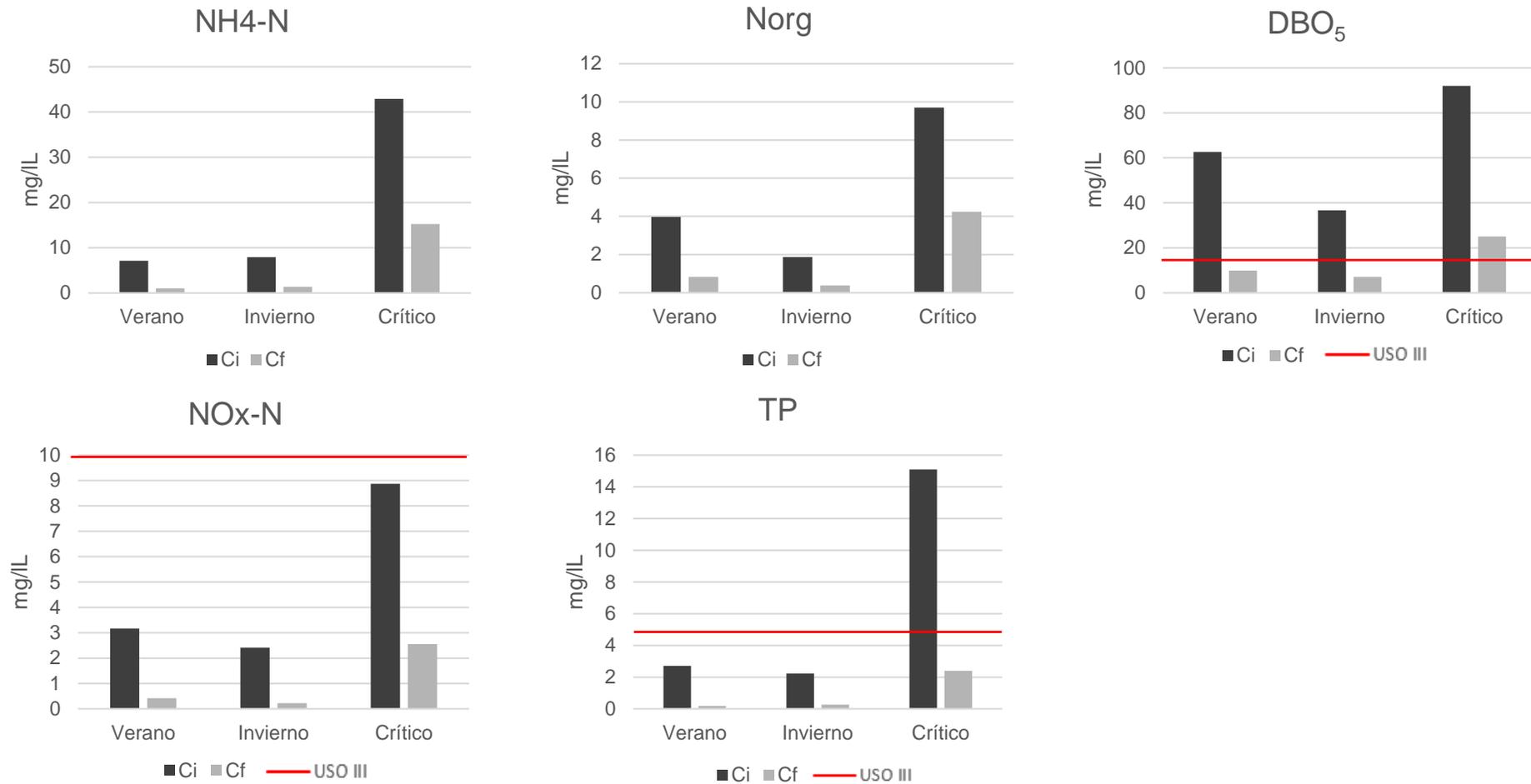
Puede observarse que en el escenario de invierno las eficiencias de remoción son menores a las de verano, incluso con concentraciones menores en la mayoría de los parámetros. Esto puede atribuirse a la dependencia de la cinética de remoción con la temperatura, la cual disminuye cuando hay un descenso de la temperatura (invierno) resultando en menores eficiencias de remoción. El hecho que el escenario de verano, tenga concentraciones mayores, posiblemente se atribuya a una concentración de los mismos debido a un menor caudal del A. Morales respecto a los caudales de invierno. Sin embargo, el hecho de que las eficiencias sean menores en inviernos, da cuenta de la importancia y efecto que tiene la variable Temperatura en este tipo de tratamiento.

Los resultados en el escenario crítico, muestran %E hasta un 25% menores a los otros escenarios y solo registra una %E > 80 en el caso del TP, sin embargo, las eficiencias son relativamente altas considerando las condiciones drásticas de tratamiento para este caso. Hay que remarcar, que este tipo de escenario es de muy baja recurrencia ya que se trata de una situación de caudal máximo bombeado por la bomba Barsha, lo que se traduce un caudal máximo del A. Morales, y concentraciones máximas de los contaminantes estudiados, cuando en realidad, se esperaría que una situación de caudal máximo diluiría a los mismos generando bajas concentraciones. Es por esto que el escenario crítico es más bien una situación teórica para la cual hay interés en ver como respondería el sistema de tratamiento mediante HCEP.

**Tabla 5.4:** Resultados de la simulación de tratamiento en tres escenarios a partir del modelo P-k-C\*.

Parámetros	Escenarios														
	Verano					Invierno					Crítico				
	Ci	Cf	Qmi	Qmf	E%	Ci	Cf	Qmi	Qmf	E%	Ci	Cf	Qmi	Qmf	E%
<b>DBO</b>	62,6	9,9	1252	187	85	36,6	7,1	733	139	81	92,0	25,0	3680	988	73
<b>Norg</b>	4,0	0,8	79	15	81	1,9	0,4	37	7	80	9,7	4,2	388	168	57
<b>NH4-N</b>	7,1	1,0	142	20	86	7,9	1,4	158	27	83	42,9	15,2	1716	601	65
<b>NO3</b>	3,2	0,4	63	8	87	2,4	0,2	48	4	91	8,9	2,6	355	101	72
<b>TP</b>	2,7	0,2	54	3	94	2,2	0,3	45	5	88	15,1	2,4	604	94	84

En las Figuras 5.12 se graficaron los resultados de Ci y Cf de los parámetros estudiados. Puede observarse que, para los tres escenarios, las concentraciones están por debajo del límite de la normativa vigente, excepto la DBO<sub>5</sub> en escenario crítico, lo cual no representa un problema ya que es un escenario hipotético de rara ocurrencia y no es representativo de las condiciones medias de tratamiento, como sí lo son los escenarios de verano e invierno.

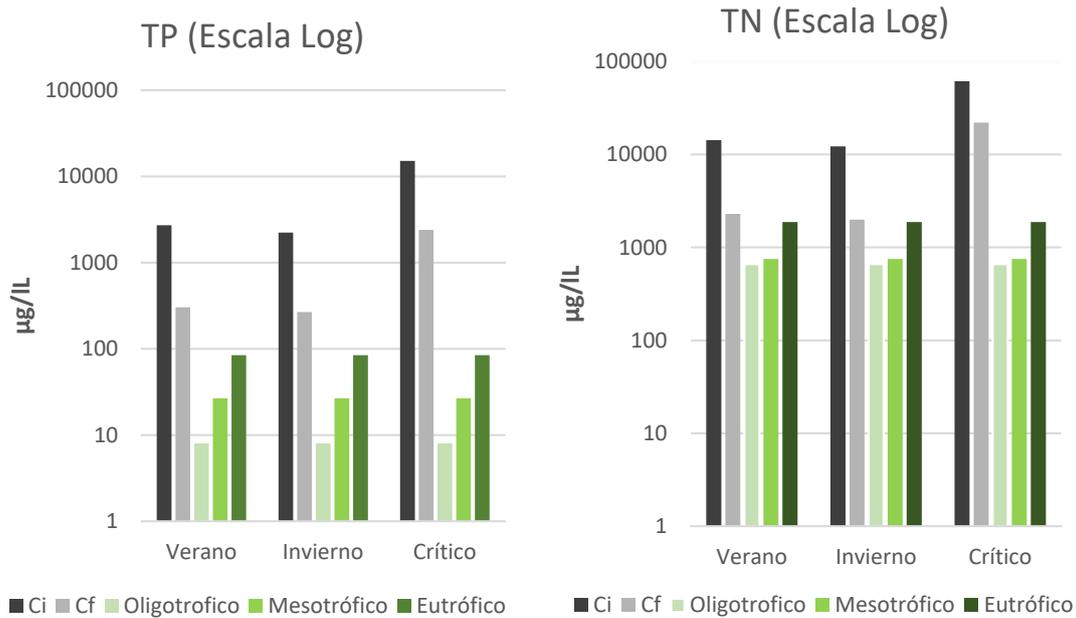


**Figura 5.12:** Eficiencias de remoción del HCEP en condiciones de invierno, verano y críticas estimadas a partir del Modelo P-k-C\*.



Suponer que la reducción de la concentración por debajo del límite de la normativa, asegura una calidad de agua suficiente para reducir su nivel eutrófico, es un error. Esto se debe fundamentalmente a que son necesarias muy bajas concentraciones de los nutrientes limitantes (principalmente Fósforo y Nitrógeno) para el desarrollo y proliferación de fitoplancton y algas promotoras de la eutrofización. La OECD (1982), clasificó tres estados tróficos de cuerpos de agua en base a las concentraciones de Fosforo total (TP), Nitrógeno total (TN) y Clorofila  $\alpha$ , las cuales se presentan a continuación en la Figura 5.13 (excepto la clorofila  $\alpha$ ) junto con las concentraciones de TP y TN del agua de A. Morales en los tres escenarios antes y después del tratamiento. Debido a la amplitud entre las concentraciones graficadas, se utilizó una escala logarítmica para una mejor lectura.

Como puede observarse, aun con la importante eficiencia de remoción del sistema para el fosforo total y nitrógeno total, las  $C_i$  en los tres escenarios, es entre uno y dos órdenes de magnitud mayor a las concentraciones propias de un estado oligotrófico. Esto habla de la gran sensibilidad de los ecosistemas acuáticos a contaminación especialmente con fosforo. Un tratamiento mediante humedales construidos, que logre concentraciones cercanas a un estado oligotrofico, resulta imposible, ya que las concentraciones de fondo mínimas dentro del humedal son mayores a estas concentraciones, y de igual manera, tenderían a un sobredimensionamiento del sistema, lo cual no es ingenierilmente viable. Aun así, la remoción del fosforo en un 80% implica una mejora sustancial en el estado tráfico del agua tratada. La remoción de NT en los escenarios de invierno y verano, se aproxima a la concentración limitante de un estado eutrófico, siendo también una significativa reducción de este nutriente.



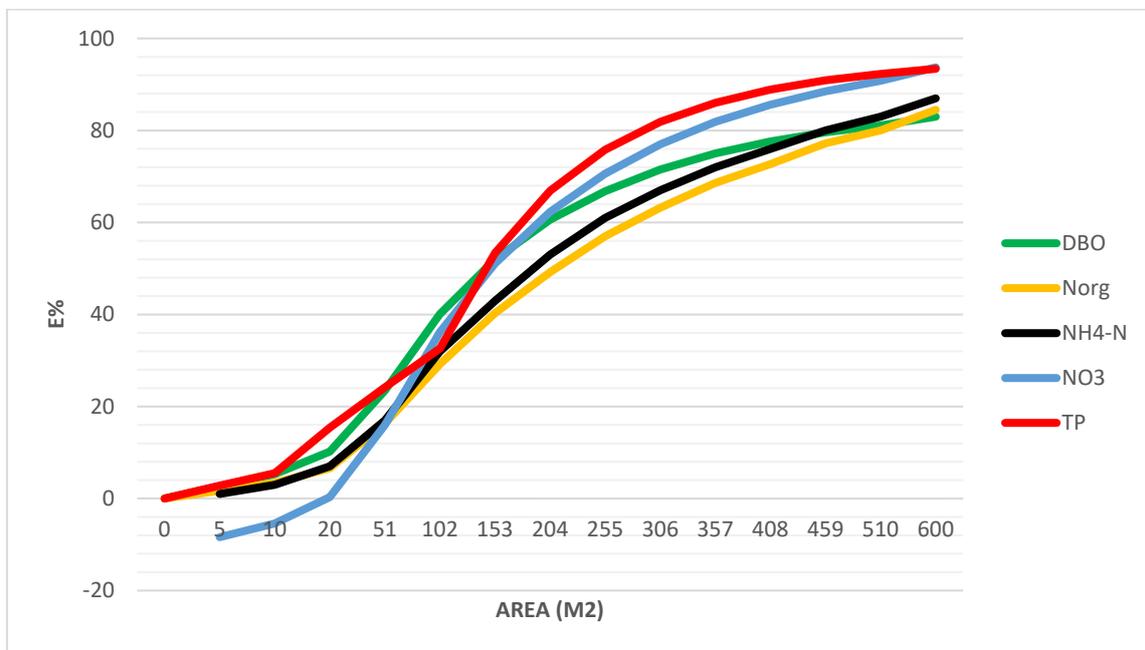
**Figura 5.13:** Concentraciones de TP y TN de las diferentes condiciones tróficas en un cuerpo de agua y Concentración inicial y final de dichos contaminantes tratados mediante el HCEP.

Además de estimar las eficiencias de remoción en diferentes escenarios, también se modeló y simuló el tratamiento, pero esta vez variando el área superficial, la cual, es el parámetro de diseño de mayor peso en la eficiencia de remoción. El área, corresponde al área total del sistema, o sea a la suma de los humedales 1 y 2. Para esta simulación se mantuvieron las condiciones de invierno ya que es el escenario más desfavorable para el tratamiento. La representación gráfica que se observa en la Figura 5.14 permite observar la variación del porcentaje de remoción para los diferentes parámetros de contaminación. Hasta los 200 m<sup>2</sup> de área superficial, se observa un aumento exponencial del porcentaje de remoción. A partir de áreas mayores las tasas de aumento de remoción disminuye progresivamente. Este comportamiento, similar al de una función logística, se explica a partir de la naturaleza del humedal construido como sistema de tratamiento. A medida que las concentraciones de contaminantes disminuyen y tienden a una concentración mínima alcanzable, conocida como concentración de fondo (C\*), la tasa de remoción disminuirá, generando un requerimiento de área cada vez mayor por unidad de contaminante removido. En otras palabras, pretender disminuir las concentraciones de un contaminante a valores cercanos de C\*, generará un sobredimensionamiento del sistema ya que las tasas de remoción serán muy pequeñas (este concepto se desarrolla en la sección 6.2.2).

Los valores negativos de porcentaje de remoción para la curva de Nitratos (NO<sub>3</sub>) se explican a partir de la degradación secuencial del Nitrógeno. Con un sistema HSSF de

área menor a 20 m<sup>2</sup> la tasa de generación de NO<sub>3</sub> por oxidación aeróbica y anaeróbica es mayor a la tasa de remoción de NO<sub>3</sub>. A partir de áreas mayores, la tasa de eliminación empieza a ser mayor, generando una disminución neta del nitrógeno en el sistema.

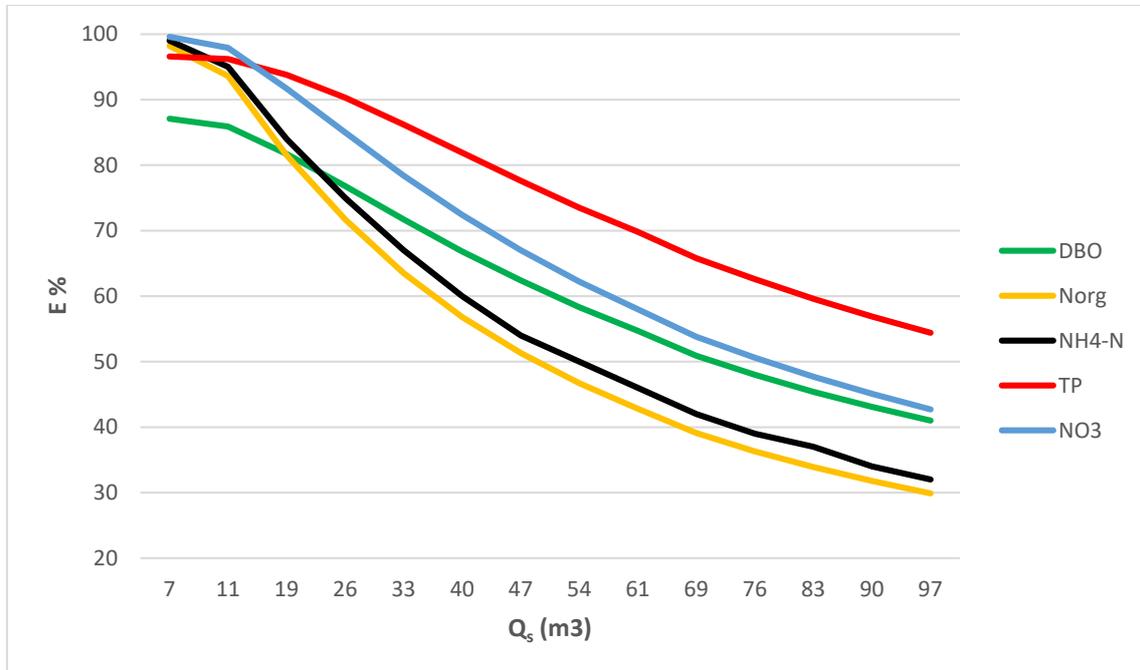
Se observa claramente que el contaminante “cuello de botella” es el Nitrógeno Orgánico (N<sub>org</sub>), ya que, en todas las áreas modeladas, presenta el mayor requerimiento de superficie por unidad de remoción. De esta forma fue que se determinó el área mínima del sistema, necesaria para asegurar que el contaminante de mayor dificultad de tratamiento, en este caso el N<sub>org</sub>, tenga una remoción igual o mayor al 80%. En la sección 6.2, se puede ver que esta área corresponde al área de diseño, A=510 m<sup>2</sup>, o sea, dos camas de 255 m<sup>2</sup>



**Figura 5.14:** Eficiencia de remoción (E%) vs Área de HCEP (m<sup>2</sup>) en escenario de invierno.

Como se explicó anteriormente, el caudal de alimentación de la bomba tendrá variaciones en función de la energía entregada por el A. Morales. Este se espera que tenga un valor medio anual de 20 m<sup>3</sup>/d, pudiendo tener periodos de mayor o menor alimentación. Es por ello que se estudió la variación en el porcentaje de remoción frente a diferentes caudales de alimentación, en condiciones de invierno y el dimensionamiento final del sistema de un área total de 510 m<sup>2</sup>. Los caudales estudiados son caudales compatibles con el diseño hidráulico. La Figura 5.15 representa gráficamente los resultados. Puede observarse que el TP presenta la menor variación en el porcentaje de remoción frente a cambios de caudal. Por el contrario, la eficiencia de remoción de

$N_{org}$  y  $NH_4^+$ , es más sensible a aumentos del caudal. Las degradaciones de estas especies dependen del  $O_2$  disuelto en el sistema, el cual es limitado, por lo tanto su degradación es más lenta. Un mayor caudal implica un menor tiempo de retención, disminuyendo así el porcentaje de remoción.



**Figura 5.15:** Eficiencia de remoción (E%) vs caudal de operación (Qs) en escenario de invierno.

## 5.5 Operación y Mantenimiento (O&M)

### Limpeza de Tolva de la Cámara de sedimentación

A partir de los cálculos realizados en la sección 6.1, la acumulación del 25% del volumen de la tolva de la cámara de sedimentación se alcanzará transcurrido los 6 meses. Es importante que el volumen de acumulación se mantenga por debajo del 25% para evitar cualquier posibilidad de re-suspensión de sedimento dentro de la cámara, que luego pueda ingresar a los humedales en serie. Por ello, la frecuencia de limpieza será cada 3 meses. Para extraer el sedimento acumulado de la tolva, se abrirá la válvula de escape de la tolva, con la cámara e sedimentación totalmente llena de agua. De esta forma el agua drenará por la válvula, arrastrando los sedimentos hacia la cañería de escape fuera de la cámara hacia el A. Morales

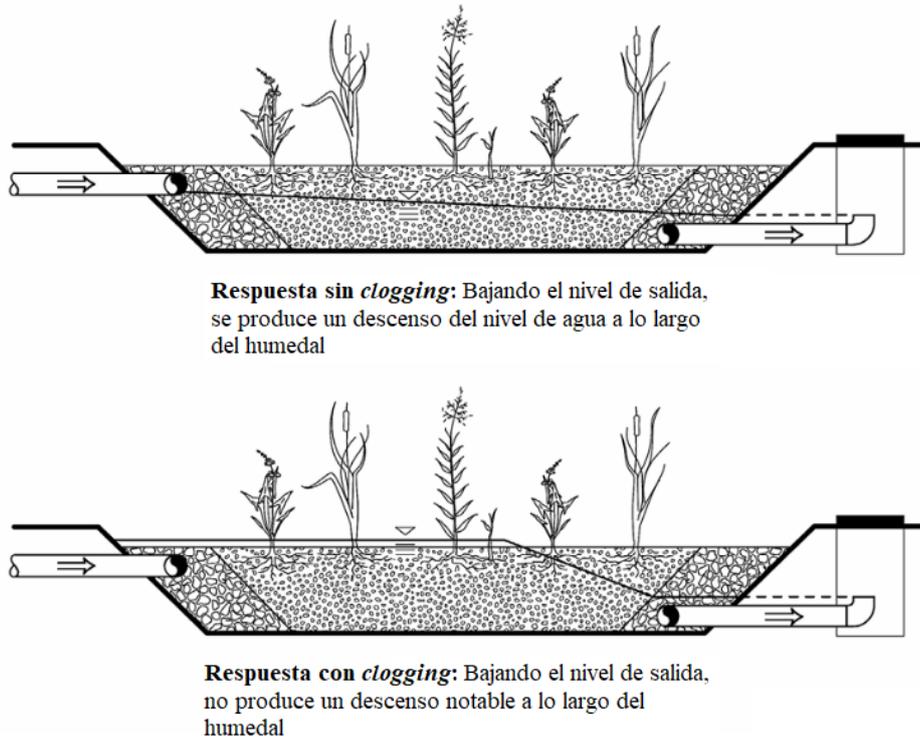


### ***Clogging***

El problema operativo más crítico para el HCEP será la eventual obstrucción del medio filtrante, fenómeno conocido como “clogging”. Esto ocurre cuando los poros del medio se van ocupando progresivamente por sólidos orgánicos e inorgánicos, lo que limita el tiempo y área de contacto entre el agua a tratar y la superficie de biofilm y/o el medio filtrante. Hay evidencia de que la principal causa asociada a este fenómeno está relacionada con las cargas orgánicas que recibe el humedal. Las aguas del A. Morales, comparado por ejemplo con efluentes cloacales (para los cuales es común el fenómeno de clogging en HSSF por sus altas cargas orgánicas), tiene bajas cargas orgánicas, por lo que se espera que la ocurrencia de este fenómeno sea mínima. Los sólidos capaces de generar una eventual obstrucción, serán partículas provenientes de la resuspensión del sedimento del Arroyo o arrastradas por escorrentía ante eventos de abundantes precipitaciones, las cuales, como se explicó en la sección 5.3, se separarán en la etapa de pre-tratamiento. Sin embargo, hay otras causas que podrán inducir al fenómeno de clogging y como un desarrollo excesivo de biofilm (asociado también a las altas cargas orgánicas)

Es fundamental que en el momento de construcción del HCEP, el medio filtrante conformado por ladrillo y hormigón tengan la granulometría correspondiente (descrita en la sección 5.4.2) y que el este reciba un lavado previo a su disposición dentro de la cama del humedal, ya que estos contienen una gran cantidad de material fino contribuirán a futuros fenómenos de obstrucción.

La identificación del *clogging* se logra a partir de una inspección visual. A veces, la presencia de obstrucciones es evidente ya que se observa un flujo por sobre el medio filtrante o hay zonas donde la vegetación muere por falta de irrigación. Otras veces, la identificación no es tan sencilla, ya que el nivel de agua dentro de los dos humedales, estará por debajo de la superficie del medio. La metodología para evaluar si el sistema esta obstruido consiste en bajar el nivel de agua ( $h_s$ ) en la cámara niveladora al mínimo. Si el sistema no presenta obstrucciones, el nivel de agua debería bajar notablemente a lo largo del humedal. De lo contrario, se observará que el nivel permanecerá en niveles más altos que el regulado en la cámara niveladora (Figura 5.16).



**Figura 5.16:** Respuesta del nivel de agua en un humedal con y sin clogging. Adaptado de Wallace (2006).

Si se confirma una obstrucción que afecte de manera significativa la hidráulica del sistema, se deberá proceder a reemplazar el medio filtrante de las zonas afectadas por un nuevo medio.

Kadlec y Wallace (2009) reportan sistemas de un buen diseño hidráulico y correcta operación, con reemplazos de medio filtrante por obstrucciones recién a los 20 años de operación. Esto enfatiza lo importante que es un correcto diseño, mantenimiento y control para evitar problemas de *clogging* y posibles acondicionamientos del medio filtrante.

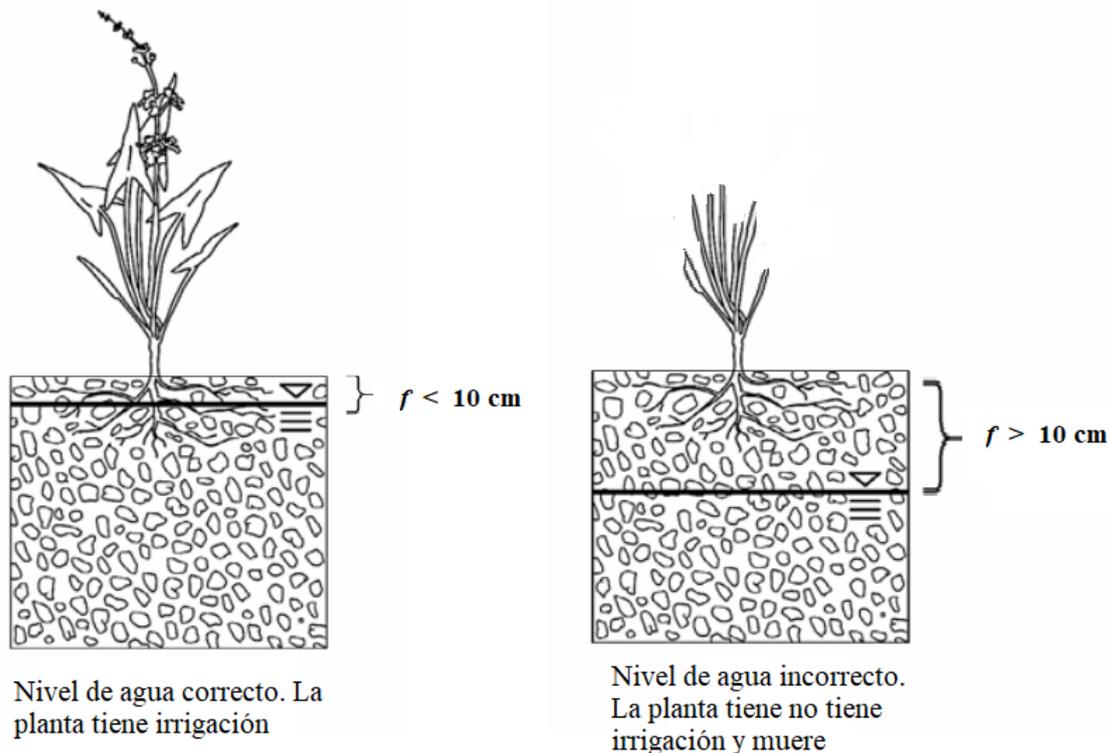
### Variables Hidráulicas

Las condiciones de operación, generaran fluctuación tanto en el caudal de ingreso, como en los fenómenos de precipitación y evapotranspiración. Esto repercute directamente en el nivel de agua dentro del humedal. En la Tabla 5.3 se presentaron los distintos valores los caudales de operación mínimos, medios y máximos y los valores de  $h$  que hay que regular en la cámara niveladora para asegurar un correcto funcionamiento hidráulico y una irrigación adecuada a los juncos.

El control de  $h$  mediante la cámara de nivelación es la tarea más crítica e importante para asegura el buen funcionamiento del sistema. La regulación de la misma debe ser con una frecuencia semanal (como mínimo), controlando los siguientes puntos:



- 1) El nivel de agua debe estar por debajo de la superficie del medio filtrante. Si se observa esta situación, bajar el nivel desde la cámara niveladora. Si el nivel de agua no cambia, posiblemente haya problemas hidráulicos asociados al *clogging*.
- 2) Como medida general, ante eventos de aumento del caudal operativo, se deberá disminuir  $h_s$  en función de los valores presentados en la Tabla 5.3 y viceversa
- 3) El nivel de agua podrá estar como máximo, 10 cm por debajo de la superficie del lecho filtrante ( $f < 10$ ), esto es, para asegurar una correcta irrigación en el sistema radicular de los juncos (Figura 5.17)
- 4) Si por alguna razón, la bomba Barsha no bombea agua (por un muy bajo caudal del A. Morales, se deberá estancar el agua dentro de los humedales 1 y 2. Esto se logra igual la altura de nivel de agua de salida, a la de ingreso ( $h_i = h_s$ ). Se debe hacer para evitar que el agua drene completamente y que la vegetación quede sin irrigación.
- 5) Para eventuales tareas de mantenimiento, llevar la altura  $h_s$  al mínimo, es decir a la altura del fondo del humedal, de esta manera, y gracias a la leve pendiente de suelo, la totalidad del agua drenará por la cámara de nivelación.
- 6) El nivel de agua también dependerá del buen funcionamiento de los artefactos hidráulicos. Por ello deberá inspeccionarse el buen funcionamiento de la bomba Barsha, conexiones de tuberías, posibles pérdidas de agua en los diferentes componentes del sistema, posibles obstrucciones en el sistema de distribución inicial de flujo
- 7) Caudal de ingreso y salida ( $Q_i$  y  $Q_s$ ), Precipitaciones ( $P$ ) y Temperatura ( $T$ ). La lectura y registro de estas variables es fundamental para entender el balance hídrico del sistema en distintos escenarios de operación y así tener un mejor manejo y control del nivel de agua dentro del humedal. Estas se realizarán mediante la lectura de aforos pluviómetro y termómetro respectivamente. A partir de estos valores y planteando un balance hídrico, podrá calcularse el valor de ET y I.



**Figura 5.17:** Correcto nivel de agua para la irrigación y buen desarrollo de la vegetación.

Si bien se calcularon los valores teóricos de  $h_s$  para diferentes situaciones de caudal operativo ( $Q_s$ ), se recomienda realizar una tabla con la relación entre  $Q_s$  y  $h_s$  para la cual se logre un correcto funcionamiento hídrico. Con estos datos empíricos, se puede obtener la conductividad hidráulica real mediante las ecuaciones presentadas en la sección 6.2.3

### Vegetación

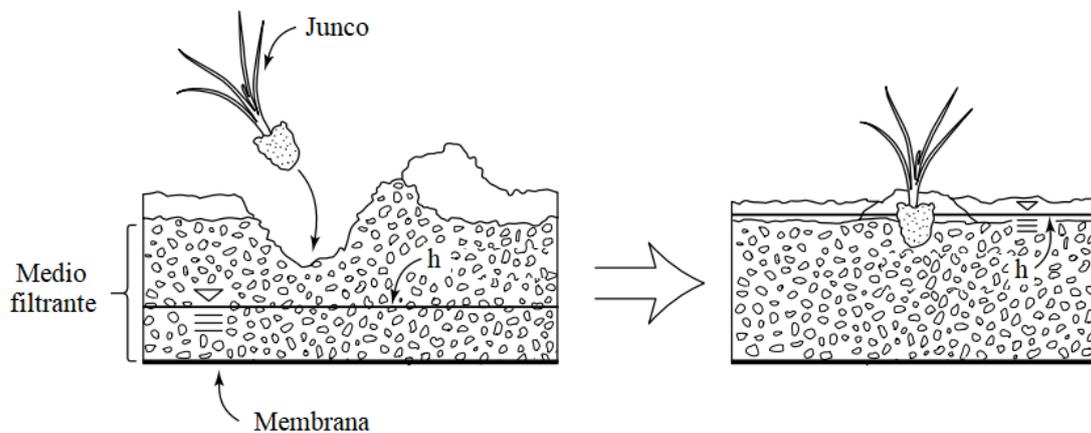
El manejo, control y cuidado de los Juncos, será más intensivo en la etapa de construcción y puesta a punto del sistema de humedales en serie. Una vez dispuesto el medio filtrante (grava de ladrillo y hormigón) podrá realizarse la plantación de los Juncos. Previamente, los juncos deberán ser extraídos de su medio natural, como se explicó en la sección 5.3.1 para no dañar el sistema radicular de las plantas. Se plantarán seis sub-conjuntos de juncos por metro cuadrado de superficie de humedal. El sub-conjunto consiste en una comunidad de por lo menos diez juncos (Figura 5.18). La plantación se hace de esta manera para conservar el mismo rizoma que es compartido por varios individuos. De esta manera las plantas sufrirán menos estrés.

La plantación en el medio filtrante se ilustra en la Figura 5.19. Este paso deber hacerse con cuidado, cubriendo las raíces de las plantas con delicadeza y sin aplastarlas. El nivel de agua se debe mantener bajo y una vez finalizada la plantación

se subirá inmediatamente para que las plantas tengan irrigación. Previo a este paso deberá enjuagarse las raíces de los juncos para no ingresar el sustrato natural (tierra, arenas, arcilla, etc.) dentro del humedal.



**Figura 5.18:** Sub-conjunto de Juncos con rizoma en común utilizado en la etapa experimental.



**Figura 5.19:** Proceso de plantación de vegetación en el medio filtrante.

La adaptación y desarrollo de los juncos en el nuevo sustrato puede llevar varios meses. Los resultados de la etapa experimental realizada en este trabajo mostraron una buena tolerancia de los juncos al estrés de cambio de hábitat y sustrato natural, registrando alrededor de un 50% de individuos muertos estrés y 50% de nuevos individuos solo en el primer mes de experimentación (ver sección 4.3.6).

Una vez que la vegetación se adapte al nuevo sustrato, las tareas restantes de mantenimiento consisten básicamente en:



- 1) Poda: Esta se realizará en función del desarrollo de la biomasa aérea de los juncos. Si se registra una excesiva acumulación de biomasa muerta sobre la cama del humedal y un desarrollo vertical importante de los juncos (alturas > 3 m) se procederá a realizar una poda (llevando a alturas < 2 m) y limpieza de la biomasa muerta. Nuevamente, la frecuencia de este mantenimiento se tendrá que determinar a medida que se conozca la fenología de los juncos en los humedales como nuevo hábitat.
- 2) Limpieza de otras especies vegetales: Es posible que plantas distintas al Junco se adapten y desarrollen en los humedales. Se deberá extraer estas especies para no generar una competencia de espacio (Recordar que los Juncos no comparten el sustrato con otras especies, sino que se reproducen y conquistan superficies, comúnmente conocidas como pajonales)
- 3) Monitoreo: Control de estado de individuos: Turgencia, coloración, altura, individuos muertos y nuevos.

### **Monitoreo de Calidad de Agua**

El monitoreo de calidad conjuntamente con las operaciones de operación es, indudablemente, el propósito central del HCEP. A partir del análisis de parámetros de contaminación en la salida del sistema, se podrá recopilar información valiosa para entender la eficiencia de tratamiento y la correlación que esta tiene con las condiciones y escenarios de operación. Esta información, podrá ser reintroducida iterativamente en el modelo P-k-C\* para determinar y “afinar” cada vez más las constantes cinéticas e hidráulicas que modelan el sistema de tratamiento.

Los parámetros de contaminación a monitorear deberán ser como mínimo los relacionados con el fenómeno de eutrofización, ya que el sistema fue dimensionado en función de la remoción de estos. También se sugiere el monitoreo de otros parámetros (se detallan en la Tabla 5.5) para comprender las características químicas del agua tratada.

La toma de muestra del agua tratada, se realizará en la cámara de aforo y toma de muestra a la salida de la Cama 2 en periodos de tres meses. Este periodo coincide con el monitoreo de calidad de agua del A. Morales que realiza ACUMAR en la estación ARROMORA1- 37 de forma trimestral. De esta forma se conocerán los valores de parámetros de contaminación iniciales y de salida ( $C_i$  y  $C_s$ ) del HCEP. La Tabla 5.5

resume las tareas llevadas a cabo para la O&M. Los protocolos de toma de muestra, conservación y análisis para cada parámetro a determinar deber basarse en el

**Tabla 5.5:** Periodo y tipo de tareas para la correcta O&M el sistema.

Tarea	Periodo	Detalle
Funcionamiento Hidráulico	7-15 días	Control de una correcta altura de nivel de agua y regulación de la misma mediante la cámara niveladora Control y acondicionamiento de artefactos como bomba, cañerías, cámara de sedimentación, cámaras de nivelación, cañerías de distribución de flujo. Registro de $Q_i$ , $Q_s$ , Precipitaciones y Temperatura atmosférica mediante lectura de aforos, pluviómetro y termómetro.
Limpeza de tolva	3 meses	Control de volumen de sedimento acumulado en la tolva y extracción del mismo a través de válvula de escape.
Vegetación	3 meses	Monitoreo y registro del estado de la vegetación: turgencia, coloración, individuos nuevos y muertos, desarrollo radicular, crecimiento vertical. Poda Limpeza de biomasa acumulada en la superficie de la cama del humedal
Control de Clogging	3 meses	Determinación de obstrucciones a partir de la respuesta del nivel de agua ante la variación $h_s$ en cámara niveladora Evaluación de posible recambio de medio filtrante afectado
Monitoreo de calidad de agua	3 meses	Determinación de parámetros fisicoquímicos y biológicos: Ex-situ: $DBO_5$ , $N_{org}$ , $NH_4^+$ , $NO_3^-$ , TP, Hidrocarburos, Coliformes totales In-situ: Potencial Redox, $O_2$ disuelto, Temperatura, pH, Temperatura, Conductividad, Turbidez, SDT, Salinidad.

## 6. Dimensionamiento y Memoria de Cálculo

### 6.1 Pre-tratamiento

El fenómeno de sedimentación se explica a partir de la Segunda ley Newton, basándose en la suposición de que las partículas son esféricas y con diámetros homogéneos. Cuando la partícula sedimenta, esta acelera por la fuerza peso, hasta que es equilibrada por la fuerza de fricción ejercida por el medio líquido. En este equilibrio la partícula alcanza una velocidad de sedimentación constante. Esta velocidad depende del material y del diámetro de la partícula. Se consideró la arena fina ( $d= 0,02\text{mm}$ ) como sólidos suspendido representativo de las aguas del A. Morales.

#### Zona de sedimentación

El diseño y dimensionamiento de la zona de sedimentación (Figura 6.1) se hizo a partir de la metodología propuesta por Ramalho (1996).

A partir de la trayectoria de sedimentación de las partículas, resultado de los dos vectores de velocidad de la partícula: velocidad horizontal ( $v_h$ ) y velocidad de sedimentación ( $v_s$ ), se tiene que:

$$v_h = \frac{Q}{A'} = \frac{Q}{WH} \quad \text{Ecuación 6-1}$$

$$v_s = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{WL} \quad \text{Ecuación 6-2}$$

Donde

$$v_h = \text{Vel horizontal} \left( \frac{m}{s} \right)$$

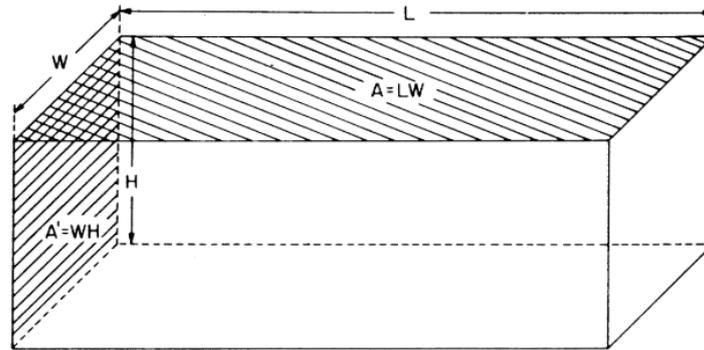
$$v_s = \text{Vel sedimentación} \left( \frac{m}{s} \right)$$

$$Q = \text{Caudal máximo} \left( \frac{m^3}{s} \right)$$

$$A' = \text{área de la sección vertical} (m^2)$$

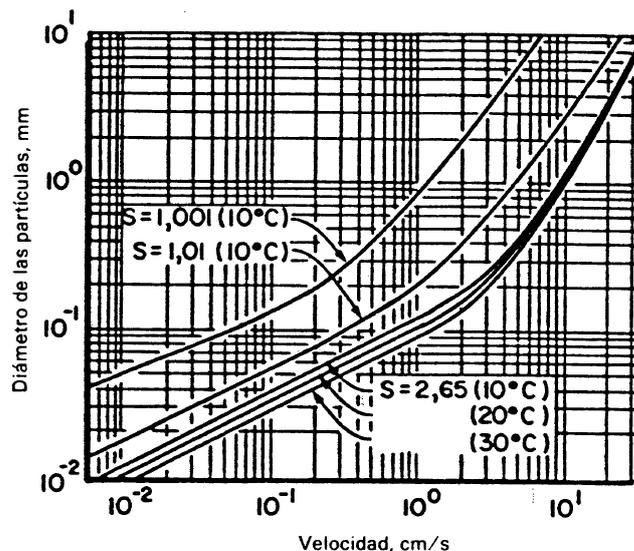
$$W = \text{Ancho} (m)$$

$$H = \text{Altura} (m)$$



**Figura 6.1:** Zona de sedimentación de largo (L), ancho (W), altura (H), área superficial (A) y área de sección vertical (A').

La velocidad de sedimentación se determinó a partir del gráfico de la Figura 6.2, el cual indica la velocidad de sedimentación en un medio acuoso a cierta temperatura en función del diámetro de la partícula y su peso específico. La velocidad típica resultante de los vectores de velocidad  $v_h$  y  $v_s$  para una sedimentación discreta, es una constante para cualquier trayectoria específica, es decir, que  $v_h$  y  $v_s$  no varían a lo largo de la trayectoria de la partícula.



**Figura 6.2:** Relación entre velocidad de sedimentación y diámetro de partícula. Tomado de Ramalho (1996)

Se seleccionó el máximo caudal de bombeo (40 m<sup>3</sup>/d) teniendo en cuenta un coeficiente de seguridad 0,25, llegando a un caudal de diseño de Q<sub>d</sub>= 50 m<sup>3</sup>/d. Se eligió un valor de  $v_h= 0,1$  cm/s tal que sea lo suficientemente menor a la velocidad horizontal necesaria para re suspender el sedimento. Esta última se calculó a partir de la ecuación 3 propuesta por Metcalf & Eddy (2014).

$$v_{rs} = \left( \frac{8k(s-1)gd}{f} \right)^{\frac{1}{2}} = 7,2 \frac{cm}{s} \quad \text{Ecuación 6-3}$$

k: constante de resuspensión dependiente del material ( $k_{\text{arena}}=0,04$ ) (adimensional)

s: Peso específico

g: Aceleración de gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

d: diámetro de partícula ( $2 \times 10^{-5} \text{ m}$ )

f: Factor de fricción Darcy-Weisbach (adimensional)

Una vez determinadas  $v_h$  y  $v_s$  se despeja A y A' de a ecuaciones 1 y 2. A partir de esos resultados, se determinó los valores de L, W, H. El tiempo de residencia se calculó a partir de la ecuación 4:

$$t = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecuación 6-4}$$

En la Tabla 6.1 puede observarse un resumen de los datos empleados para calcular las dimensiones y tiempo de retención de la cámara de sedimentación.

**Tabla 6.1:** Variables utilizadas para el dimensionamiento de la cámara de sedimentación: Datos y Resultados.

Datos		Resultados	
s (peso específico)	2,65	$v_s$ (m/h)	0,9
		$v_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h)	0,9
T (°C)	20	$v_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d)	21,6
		$v_h$ (m/h)	3,6
d (mm)	0,02	$v_h$ (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h)	3,6
		$v_h$ (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d)	86,4
$Q_{\text{max}}$ (m <sup>3</sup> /d)	50	A sup(m <sup>2</sup> ) (100% remoción)	2,31
		A' tra(m <sup>2</sup> )	0,579
$v_s$ (cm/s)(grafico)	0,025	<b>L (m)</b>	<b>2,500</b>
		<b>W (m)</b>	<b>0,926</b>
$v_h$ (cm/s)	0,1	<b>H (m)</b>	<b>0,6</b>
		<b>V (m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,4</b>
$v_{rs}$ (cm/s)	7,2	<b>t (h)</b>	<b>0,694</b>

### Zona de salida

Para el vertedero en forma de “V” (Figura 6.3) se adoptó el diseño propuesto por Brater et al. (1996) a partir de la ecuación 5:

$$Q = 1,34 \left( \tan \frac{\theta}{2} \right) H^{2,5} \quad \text{Ecuación 6-5}$$

Q: Caudal de operación (m<sup>3</sup>/s)

θ: Angulo de vertedero = 90°

H: Altura de vertedero (m)

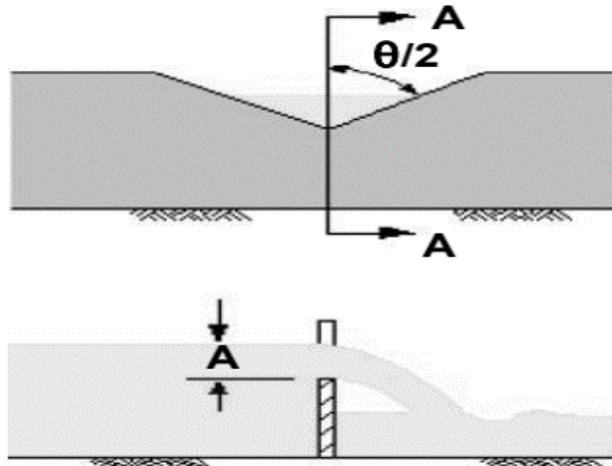


Figura 6.3: Vertedero en forma de “V”.

### Zona recolección de sedimentos

Las dimensiones de la tolva para deposición y extracción de sedimentos, se realizó partiendo de establecer una pendiente del 10% y posteriores cálculos geométricos. La válvula de extracción de lodos ubicada en el fondo de la tolva, se ubica en el primer tercio de la cámara ya que el 80% de las partículas sedimentan en este sector (Organización Panamericana de la Salud, 2005).

A partir del siguiente cálculo de flujo másico se estimó el periodo de limpieza de la tolva:

$$K_{kg} = V_{Tolva} \cdot \rho_{arena\ humeda} = 0,24m^3 \cdot 1860 \frac{kg}{m^3} = 451,6 kg$$

$$Q_{kg} = [SST] \left( \frac{g}{m^3} \right) \cdot Q_m \left( \frac{m^3}{dia} \right) \cdot 30 dias \cdot \frac{kg}{1000 gr} = 20,4 kg$$

$$P = \frac{K_{kg}}{Q_{kg}} = 22 meses$$

K<sub>kg</sub>: Capacidad de almacenamientos de sedimentos de la tolva (kg).

V<sub>tolva</sub>: Volumen de tolva (m<sup>3</sup>).



$\rho_{\text{arena húmeda}}$ : Densidad de arena húmeda ( $\text{kg/m}^3$ ).

$Q_{\text{kg}}$ : Acumulación mensual de sedimentos (kg).

$Q_m$ : Caudal medio de bombeo=  $20 \text{ m}^3/\text{d}$

P: periodo llenado de tolva.

En base al periodo P, se pudo estimar una frecuencia de limpieza de la tolva para evitar una sobreacumulación de sedimento y asegurar un buen funcionamiento de la cámara. Esta frecuencia será de 6 meses, de tal forma que el volumen de acumulación no supere el 25% de la capacidad máxima de la tolva.

## 6.2 Tratamiento Primario

### 6.2.1 Dimensionamiento y Cinética de Remoción

Existen muchas metodologías para dimensionar y diseñar sistemas de tratamiento con HC. Hasta la fecha, la mayoría consisten en reglas generales, con criterios simplistas de diseño, basándose en información recopilada de experiencias anteriores. El problema de este tipo de abordaje, es que se adoptan valores de referencia o ecuaciones que aplican a sistemas de características muy diferentes al que se pretende diseñar, entre ellas: el tipo de humedal, concentraciones de entrada y salida, geometría, cargas hidráulicas, clima, vegetación, etc., sin contemplar la variabilidad y complejidad que estas representan en un tratamiento con HC, dando como resultado serios errores de diseño.

Sin embargo, en las últimas décadas, los enfoques de diseño han evolucionado notablemente basándose en cálculos más avanzados que contemplan las dinámicas internas, las características hidráulicas y químicas del efluente que quiere tratarse, utilizando parámetros de diseño basados en datos operativos de un número muy importante de humedales construidos alrededor del mundo.

En tal sentido el modelo propuesto por Kadlec & Wallace (2009) es el más reciente y con una muy buena aceptación en la comunidad científica. Este consiste en una ecuación de primer orden (ecuación 6-6) a partir de la cual se puede calcular la concentración de salida de un determinado contaminante después de un tratamiento con un HC. La gran ventaja de este método es que permite predecir el rendimiento del tratamiento de humedales en diferentes regímenes hidráulicos y de temperatura:

$$\left(\frac{C_s - C^*}{C_i - C^*}\right) = \frac{1}{(1 + k_A/Pq)^P} = \frac{1}{(1 + k_V\tau/P)^P} \quad \text{Ecuación 6-6}$$

Donde:

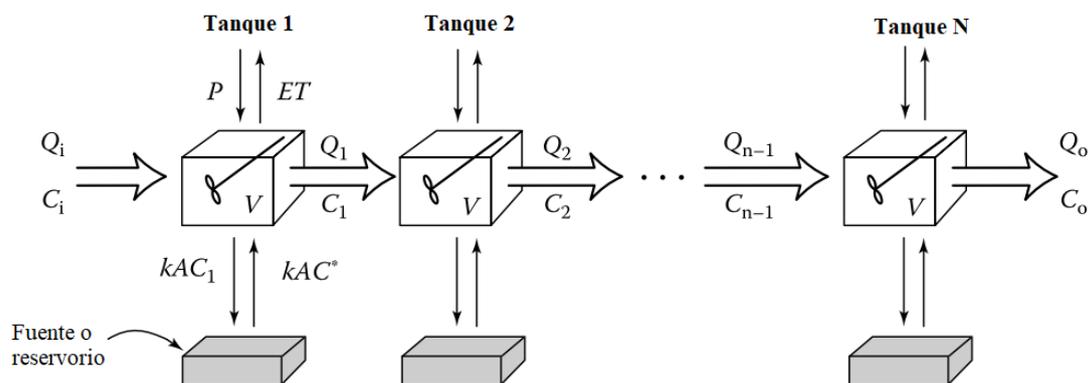
- $C_s$  = concentración de salida (mg/L)
- $C_i$  = concentración de entrada (mg/L)
- $C^*$  = concentración de fondo (mg/L)
- $k_A$  = constante cinética superficial de 1er orden (m/d)
- $k_V$  = constante cinética volumétrica de 1er orden (1/d)
- $P$  = número aparente de tanques en serie (adimensional)
- $q$  = tasa de carga hidráulica (m/d)
- $t$  = tiempo de retención hidráulica (d)

Los parámetros utilizados para modelar el rendimiento del humedal en una determinada condición de operación describen lo siguiente:

### Numero aparente de tanques en serie (P)

El número aparente de tanques en serie  $P$  es un parámetro estimado por el diseñador y no puede medirse empíricamente, con la restricción de que  $P \leq N$  (Kadlec y Wallace, 2009).

El agua pasa por numero  $P$  de tanques con flujo continuo y completamente saturado, reduciendo la concentración de contaminantes en cada uno de ellos (Figura 6.4). El valor de  $P$  contempla la uniformidad del flujo, variando en función de la geometría, número de camas, densidad de vegetación y de biofilm



**Figura 6.4:** Modelización de tanques es serie para modelo  $P-k-C^*$ . Tomado de Kadlec (2009).

### Constante cinética de primer orden (k)

La eliminación de contaminantes en los HC generalmente se puede expresar mediante coeficientes de tasa de eliminación de primer orden (tasas  $k$ ). Los perfiles de eliminación de contaminantes dentro de los CW pueden caracterizarse por una disminución exponencial de la concentración desde la entrada hasta la salida del

sistema. Si la tasa  $k$  es mayor, los contaminantes se eliminan más rápidamente en el HC. El coeficiente de velocidad de eliminación a menudo depende de la temperatura (ecuación 6.7). Esta dependencia puede expresarse mediante un factor theta ( $\theta$ ) derivado de la ecuación de Arrhenius. Los factores theta mayores que 1 indican que la tasa  $k$  aumenta con el aumento de la temperatura, mientras que lo contrario indica que la tasa  $k$  disminuye con el aumento de la temperatura. Por consistencia, en la literatura, las tasas de  $k$  generalmente se normalizan a 20 ° C. (Rapisarda et al., 2018).

$$k_T = k_{20}\theta^{(T-20)} \quad \text{Ecuación 6-7}$$

Muchos de los procesos de remoción que ocurren en el humedal, son dependientes del área del mismo y no tanto de la profundidad. Si bien hay procesos más dependientes del volumen, en general se reportan constantes cinéticas superficiales ( $k_A$ )

### Concentración de fondo ( $C^*$ )

La concentración de fondo ( $C^*$ ) es una concentración de efluente irreducible que resulta del ciclo biogeoquímico interno dentro de los humedales. Por ejemplo, para la materia orgánica,  $C^*$  podría representar la fracción refractaria o no biodegradable. La concentración de fondo  $C^*$ , que a menudo se infiere de una gran colección de datos, establece efectivamente un límite inferior para la concentración de efluentes de un humedal de tratamiento ( $C_s$ ). Esto significa que incluso para un humedal que tiene un tiempo de retención infinitamente largo, la concentración teórica de efluente  $C_s$  nunca será menor que  $C^*$ . Es especialmente importante tener en cuenta las concentraciones de fondo cuando las concentraciones de influencia de los humedales son bajas ( $C_i \leq 3 C^*$ ) o cuando las concentraciones de efluentes se acercan (o se espera que se acerquen) a los límites de detección de laboratorio (Kadlec y Wallace, 2009).

### Tasa de carga hidráulica (TCH, $q$ )

Se define como el equivalente en lluvia del efluente en cuestión

$$q = \frac{Q_s}{A} \quad \text{Ecuación 6-8}$$

Donde:

$Q_s$  = Caudal de operación

$A$  = área superficial del humedal ( $m^2$ )

$q$  = tasa de carga hidráulica ( $m^3/m^2.d$ )

### Tiempo de retención hidráulica (TRH, $\tau$ )

El TRH se define como el tiempo promedio de una molécula de agua desde que entra hasta que sale del humedal. Es un parámetro de gran importancia ya que tiene



influencia en los procesos de transformación químicos y microbianos de contaminantes. Comúnmente este se determina dividiendo el volumen de agua por el caudal de operación. Sin embargo, el volumen disponible para ser ocupado no es calculable, ya que los humedales tienen un medio poroso y el volumen de poro varía en el tiempo por el desarrollo de raíces y biofilm. Para calcular un valor teórico de TRH, se utiliza la porosidad ( $\epsilon$ ) estimada del medio, la cual está tabulada para distintos materiales y granulometrías:

$$\tau = \frac{\epsilon V}{Q_s} = \frac{\epsilon h A}{Q_s} \quad \text{Ecuación 6-9}$$

Donde:

t = tiempo de retención hidráulico teórico (d)

$\epsilon$  = porosidad (adimensional)

h = altura del nivel de agua (m)

A = Área superficial del humedal (m<sup>2</sup>)

Q<sub>s</sub> = Caudal de operación

La relación entre TRH y q es:

$$q = \frac{\epsilon h}{\tau} \quad \text{Ecuación 6-10}$$

El modelo P-K-C\* resulta de mucha utilidad para estimar la eficiencia de cualquier sistema de HC, en particular, para los sistemas a Escala Piloto los cuales tienen por objetivo la estimación del rendimiento ante un escenario específico con variables locales como el clima, caudales y calidades de efluente. De esta forma se tiene la información necesaria para poder dimensionar de forma criteriosa posteriores sistemas a escala real en iguales o similares escenarios. Esto se logra a partir de un proceso iterativo en el cual se introducen en el modelo valores conocidos de parámetros operativos como C<sub>i</sub> y C<sub>s</sub> para luego averiguar valores de constantes como k<sub>A</sub>, C\* y P que más se ajustan a escenarios locales y condiciones específicas de trabajo, permitiendo estimar el rendimiento de HC de forma precisa.

El HCEP del presente proyecto se dimensionó a partir de este modelo. Luego, durante su eventual operación, se utilizarán los valores de; concentraciones de entrada y salida de los parámetros de contaminación a estudiar; temperatura; precipitación y evapotranspiración para determinar de forma iterativa, a partir del modelo P-k-C\*, las constantes cinéticas para diferentes escenarios, necesarias para el dimensionamiento de un sistema a escala real.

## 6.2.2 Metodología de cálculo, simulación y resultados

El objetivo de esta etapa fue **dimensionar**, a partir del modelo P-k-C\*, el sistema de tratamiento primario compuesto por la cama 1 (C1) y cama 2 (C2) con el fin de que este cumpla el objetivo de tratamiento. Este es; la reducción del caudal másico de contaminantes promotores de la eutrofización: DBO<sub>5</sub>, especies de Nitrógeno y Fósforo, en un 80% (E=80%) en el escenario estacional más desfavorable. La eficiencia de remoción (E) se calculó como:

$$E\% = \frac{Q_i C_i - Q_s C_s}{Q_i C_i} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 6-11}$$

Donde:

E%= eficiencia de remoción

Q<sub>i</sub>= caudal de ingreso (m<sup>3</sup>/d)

C<sub>i</sub>= concentración inicial (mg/L)

Q<sub>s</sub>= caudal de ingreso (m<sup>3</sup>/d)

C<sub>s</sub>= concentración inicial (mg/L)

La metodología de cálculo, consistió en volcar el modelo P-k-C\* y todas las variables en una planilla de trabajo de Microsoft Excel. Esto permitió correr el modelo de forma ordenada y obtener un importante volumen de información respecto a los valores de E% de los distintos contaminantes estudiados en diferentes escenarios.

El primer paso fue seleccionar las variables relacionadas con los mecanismos de remoción. Para ello se seleccionaron los valores de k, C\*, P y Θ recopilados por Kadlec & Wallace (2009) en su libro "Treatment Wetlands". Para cada una de estas variables (Tabla 6.2), se presentan los percentiles de valores medios anuales de diferentes HC de flujo sub-superficial recopilados a lo largo del mundo. El número N de humedales estudiados para cada caso, varía según el parámetro de contaminante estudiado, pudiendo estar en un rango de 22 < N < 123. Para cada parámetro, se seleccionó la mediana estadística (percentil 0,50) de las variables k, C\* y P, a excepción del valor de k para nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), para el cual se utilizó el valor de k obtenido experimentalmente en los laboratorios del 3iA (ver sección 4.3.6).

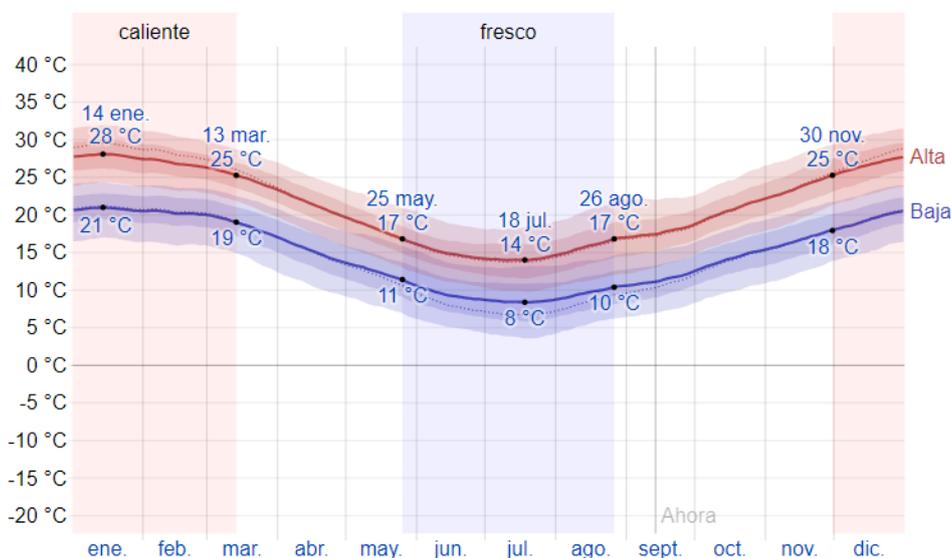
Los valores de C<sub>i</sub> corresponden a la mediana estadística de concentraciones para los meses de verano y de invierno de la BDH de ACUMAR. Se estudiaron datos de campañas del 2010 hasta el presente. Las concentraciones del escenario "Crítico" corresponden a las máximas registradas hasta la fecha.

**Tabla 6.2:** Variables de entrada asociadas a la cinética de remoción para el modelo P-k-C\*

Variable	C <sub>i</sub> (mg/L)			θ	k (m/año)	C* (mg/l)	P
	Verano	Invierno	Critico				
DBO	62,58	36,64	92	0,975	37	5	8
Norg	3,97	1,87	9,7	1,003	25,6	0	8
NH4-N	7,12	7,92	42,9	1,014	29,8	0	8
NO3-N	3,17	2,41	8,87	1	39,1	0	8
TP	2,71	2,23	15,1	1	42,9	0,1	8

Una vez consultadas las anteriores variables, se determinó las variables relacionadas con la hidráulica del sistema: Caudal de ingreso (Q<sub>i</sub>), precipitaciones (Precip), Evapotranspiración (ET), porosidad (ε), profundidad (h) e infiltración (I). El cálculo y análisis de las mismas se detalla en la sección 6.2.3.

Para estimar el valor de temperatura del escenario de invierno y de verano, se consultó un informe climatológico de la provincia de Buenos Aires, realizado por Weather Spark (2019). Este informe ilustra el clima típico en Buenos Aires, basado en un análisis estadístico de informes climatológicos históricos por hora y reconstrucciones de modelos del 1 de enero de 1980 al 31 de diciembre de 2016. Los valores promedio de temperaturas mensuales se observan en la Figura 6.5.



**Figura 6.5:** La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diaria con las bandas de los percentiles 25º a 75º, y 10º a 90º. Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes.

La Tabla 6.3 ilustra un ejemplo de la planilla Excel de trabajo mediante la cual, con las variables de entradas (Input) y de salida (Output) del modelo P-k-C\*, se determinó el área necesaria para alcanzar los objetivos de tratamiento. Esta metodología, consistió



en un proceso iterativo, donde se fijaron todas las variable Input excepto el área A. Se ingresaron distintos valores de área, hasta alcanzar la eficiencia de remoción mayor o igual al 80%. El caso puntual presentado en la tabla 6.3 a modo de ejemplo, corresponde a la simulación de remoción de  $DBO_5$  en un escenario de invierno.

Se repitió este proceso, con todos los parámetros de contaminantes estudiados en todos los escenarios planteados. El **área seleccionada de diseño**, fue aquella de mayor valor, siendo esta, la necesaria para lograr una  $E\% = 80$  para el contaminante “cuello de botella” en las condiciones de tratamiento menos favorables. Los resultados de todos los procesos iterativos se presentan en la Tabla 6.5. En la misma se observa que el área máxima del sistema corresponde al tratamiento de Norg, siendo esta es  $A = 510 \text{ m}^2$ , o sea un área de  $255 \text{ m}^2$  para cada humedal

Como se observa, en la Tabla 6.3 la simulación de la Cama 1 y 2 se realizan de forma separada, ya que son sistemas con dimensiones diferentes y por lo tanto sus eficiencias de remoción también lo son. Esto puede entenderse, según el modelo P-k-C\* como ocho tanques en serie, los primeros cuatro (C1) con características distintas a los últimos (C2) El número teórico de tanques en serie del sistema corresponde a  $P=8$ , o de igual modo  $P=4$  para cada humedal. Los valores de los parámetros a la salida de C1 serán los mismos valores de parámetros de entrada del C2 ya que el sistema es continuo.

El modelo, simula la progresiva degradación o remoción del contaminante en cuestión a lo a través de los ocho tanques teóricos a lo largo de C1 y C2. Esto puedo observarse en la Tabla 6.4, que muestra la variación de concentraciones, caudales y TRH a lo largo del sistema. Nótese que los valores de parámetros del “tanque ocho” son los de la salida del sistema, por lo tanto, los mismos valores “Output” de la tabla 6.3.

**Tabla 6.3:** Variables de entrada y salida para el proceso iterativos de dimensionamiento del sistema de tratamiento conformado por Cama 1 (C1) y Cama 2 (C2), utilizando el modelo P-k-C\*.

Contaminante: DBO <sub>5</sub> / Escenario: Invierno							
Input	C1	C2	Un	Output	C 1	C 2	Un
Qi	<b>20</b>	<b>19,74</b>	m <sup>3</sup> /d	Vol. tanque	19,12	38,25	m <sup>3</sup>
Precip	1	1	mm/d	Vol. total	76,5	153	m <sup>3</sup>
ET	2	2	mm/d	Área tanque	63,75	63,75	m <sup>2</sup>
l	0,02	0,02	mm/d	Qi	20	19,73	m <sup>3</sup> /d
P	4	4	-	Qs	<b>19,74</b>	<b>19,48</b>	m <sup>3</sup> /d
<b>A</b>	<b>255</b>	<b>255</b>	m <sup>2</sup>	Q promedio	19,87	19,61	m <sup>3</sup> /d
ε	0,380	0,38	-	Qi másico	1251,6	382,51	g/d
h	0,3	0,6	m	Qs másico	383	171,7	g/d
Ci	<b>62,58</b>	<b>19,378</b>	mg/L	<b>E%</b>	<b>69,4</b>	<b>86,3</b>	%
C*	5	5	mg/L	(TCH, q) nominal	0,07	0,07	m/d
k <sub>20</sub>	44	44	m/año	(TCH, q) prom	0,07	0,07	m/d
k <sub>20</sub>	0,121	0,121	m/d	(TCH, q) PTIS	0,07	0,07	m/d
T°	16	16	°C	t nominal	1,45	2,95	d
k <sub>T</sub>	0,131	0,131	m/d	t promedio	1,46	2,96	d
Θ	0,98	0,98	-	t PTIS	1,47	2,98	d
				Cs	<b>19,37</b>	<b>8,81</b>	mg/l

**Tabla 6.4:** Evolución del valor de los parámetros a lo largo de los ocho tanques teóricos del sistema en serie.

Contaminante: DBO <sub>5</sub> / Escenario: Invierno							
Parámetro	Unid	Cama 1					
		Entrada del sistema	ST1	ST2	ST3	ST4	Salida
Qneto	m <sup>3</sup> /d	20,0	19,9	19,9	19,8	19,7	19,74
Preci	m <sup>3</sup> /d	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064	-
ET	m <sup>3</sup> /d	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	-
l	m <sup>3</sup> /d	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-
q nom	m/d	0,078	0,313	0,312	0,311	0,310	0,077
t nom	d	1,45	0,36	0,37	0,37	0,37	1,47
C	mg/L	62,58	45,8	33,8	25,4	19,4	19,4
Parámetro	Un	Cama 2					
		Entrada	ST 5	ST 6	ST 7	ST 8	Salida del sistema
Qneto	m <sup>3</sup> /d	19,7	19,7	19,6	19,5	19,5	19,48
Preci	m <sup>3</sup> /d	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064	-
ET	m <sup>3</sup> /d	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	-
l	m <sup>3</sup> /d	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-
q nom	m/d	0,077	0,309	0,308	0,307	0,306	0,076
t nom	d	2,95	0,74	0,74	0,74	0,75	2,98
C	mg/L	19,4	15,1	12,3	10,3	8,8	8,8

**Tabla 6.5:** Resultados de la simulación de tratamiento de aguas del A. Morales en diferentes escenarios.

Escenario	Cont.	Ci (mg/L)	Cf (mg/L)	A (m <sup>2</sup> )	Qmi (g/d)	Qmf (g/d)	E%
Verano	DBO	62,58	12,97	394	1252	250	80
	Norg	3,97	0,92	486	79	16	80
	NH4-N	7,12	1,51	400	142	29	80
	NO3	3,17	0,64	320	63	13	80
	TP	2,71	0,56	332	54	11	80
Invierno	DBO	36,64	7,51	470	733	147	80
	Norg	1,87	0,44	510	37	7	80
	NH4-N	7,92	1,64	450	158	32	80
	NO3	2,41	0,49	320	48	10	80
	TP	2,23	0,45	344	45	9	80

Una vez determinada el área de diseño, se volvió a correr el modelo esta vez dejando fija la variable área ( $A = 510\text{m}^2$ ) y simulando nuevamente el tratamiento para todos los contaminantes en los tres escenarios. De esta forma, se pudo obtener las eficiencias de remoción que tendrán el sistema una vez construido y en operación. Los resultados se presentan en la Tabla 6.6. Puede observarse, que, en algún modo, el sistema está sobredimensionado para el tratamiento de los contaminantes diferentes al Norg, con  $E\% > 80\%$ , ya que este último es el “cuello de botella” o de más difícil tratamiento según los resultados obtenidos con el modelo P-k-C\*.

**Tabla 6.6:** Resultados de la simulación de tratamiento con el área final de diseño del HCEP  $A=510\text{ m}^2$  en los diferentes escenarios.

Parámetro	Escenarios														
	Verano					Invierno					Crítico				
	Ci	Cf	Qmi	Qmf	E%	Ci	Cf	Qmi	Qmf	R %	Ci	Cf	Qmi	Qmf	E %
DBO	62,6	9,9	1252	187	85	36,	7,1	733	139	81	92,0	25,0	3680	988	73
Norg	4,0	0,8	79	15	81	1,9	0,4	37	7	80	9,7	4,2	388	168	57
NH4-N	7,1	1,0	142	20	86	7,9	1,4	158	27	83	42,9	15,2	1716	601	65
NO3	3,2	0,4	63	8	87	2,4	0,2	48	4	91	8,9	2,6	355	101	72
TP	2,7	0,2	54	3	94	2,2	0,3	45	5	88	15,1	2,4	604	94	84

Finalmente se corrió el modelo para estudiar la variación de la eficiencia de tratamiento  $E\%$  respecto a la variación de área total del HCEP (Tabla 6.7) con un caudal medio  $Q_i = 20\text{ m}^3/\text{d}$  de operación y la variación de  $E\%$  con diferentes caudales de operación (Tabla 6.8) con un área final  $A = 510\text{ m}^2$ .

**Tabla 6.7:** Eficiencia de remoción en función del área superficial del humedal.

E% vs A (invierno) ( $Q_i = 20 \text{ m}^3/\text{d}$ )					
Área (m <sup>2</sup> )	Eficiencia de Remoción %				
	DBO	Norg	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub>	TP
5	2,7	1,7	1	-8,4	2,8
10	5,3	3,4	3	-5,4	5,5
20	10,2	6,6	7	0,3	15,4
51	23,5	16,3	17	16	24,2
102	40,1	29,2	32	36,2	32,6
153	52	40,3	43	51,1	53,4
204	60,6	49,2	53	62,3	66,9
255	66,8	57	61	70,6	75,8
306	71,5	63,2	67	77	81,9
357	75	68,6	72	81,9	86
408	77,6	72,7	76	85,6	88,9
459	79,6	77,2	80	88,5	90,9
510	81,1	80	83	90,8	92,3
600	83	84,5	87	93,7	93,4

**Tabla 6.8:** Eficiencia de remoción en función del caudal de operación.

E% vs Q (invierno) A=510 m <sup>2</sup>					
Q (m <sup>3</sup> )	Eficiencia de Remoción %				
	DBO	Norg	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub>	TP
7	87,1	98,2	99	99,6	96,6
11	85,9	93,6	95	97,9	96,2
19	81,7	81,5	84	91,7	93,8
26	76,8	71,7	75	85	90,3
33	71,7	63,5	67	78,4	86,2
40	66,8	56,8	60	72,4	81,9
47	62,4	51,3	54	67	77,6
54	58,3	46,7	50	62,2	73,5
61	54,7	42,8	46	58	69,8
69	50,9	39,1	42	53,8	65,8
76	48	36,3	39	50,6	62,6
83	45,4	33,9	37	47,7	59,6
90	43,1	31,8	34	45,1	56,9
97	41	29,9	32	42,7	54,4

### 6.2.3 Diseño Hidráulico

Una vez definida la configuración, el número y el área de humedal necesaria para alcanzar las metas de tratamiento, el resto de las variables de diseño a definir dependerán de los requerimientos y restricciones hidráulicas del humedal. Estas son:

- 1) El flujo dentro del humedal no debe sobrepasar la superficie del medio filtrante
- 2) El nivel de agua dentro del humedal debe ser suficiente para asegurar una irrigación constante en la zona radicular de las plantas.
- 3) La operación debe poder llevarse a cabo en el inevitable caso de cambiar la conductividad hidráulica, especialmente en la zona de entrada. A medida que el lecho



se obstruye con raíces y bio-películas microbianas, no deben generarse zonas inundadas.

4) El humedal debe poder drenarse completamente para eventuales tareas de mantenimiento.

5) Los niveles de agua dentro del sistema deben ser totalmente controlables mediante el uso de estructuras de entrada y salida.

Las restantes variables de diseño se presentan continuación. Primero se describen las variables **adoptadas**, luego, las variables **calculadas**.

**a) Granulometría del medio filtrante y correspondiente conductividad hidráulica ( $k_h$ ):**

La granulometría del escombros como medio filtrante se adoptó a partir de la recomendación de la U.S. EPA (2000), tomando un valor de 20-30mm. La  $k_h$  correspondiente a una grava de igual granulometría, tiene un valor de 100,000 m/d. Se ha demostrado que los eventuales fenómenos de acumulación de películas microbianas pueden disminuir la  $k_h$  en un factor de diez. Para evitar errores de cálculo que pueda sobrestimar la conductividad y dar como resultado fallas hidráulicas se tomó una posición conservadora, implementando un factor de seguridad igual a veinte, resultando entonces un valor de  $k_h = 5000$  m/d.

**b) Profundidad del Humedal**

La altura es una variable elegida por el diseñador. Las profundidades más comúnmente adoptadas son de 30-60 cm. Según Kadlec (2009) los humedales HSSF se diseñaron originalmente con una profundidad de 60 cm según la creencia de que esta era la profundidad máxima que penetrarían los sistemas de raíces del género *Phragmites*. Sin embargo, el análisis de muchos humedales HSSF ha indicado que los sistemas de raíces de las plantas de humedales emergentes crecen preferentemente en la región superior del lecho con la zona de penetración de la raíz típicamente de solo unos 30 cm. Por lo tanto, los lechos más profundos a menudo tienen una región más baja sin raíces de plantas, y el agua fluye preferiblemente a lo largo del fondo del lecho del humedal. Esta región inferior se asocia típicamente con condiciones más reductoras y un tratamiento menos eficiente.



Es por ello que se adoptó una altura de 30 cm y 60 cm para la cama 1 y 2 respectivamente.

### c) Caudal de operación

El caudal de operación (o de salida) es la resultante del caudal de ingreso o alimentación de bomba ( $Q_i$ ) y los ingresos y egresos de agua por precipitaciones y evapotranspiración. El caudal de salida  $Q_s$  será igual, mayor o menor, dependiendo el balance hídrico el cual puede representarse mediante la ecuación:

$$Q_{sN} = Q_{iN} + A_N(P - ET - I) \quad \text{Ecuación 6-12}$$

$Q_{sN}$ : Caudal de salida del humedal  $N(m^3/d)$

$Q_{iN}$ : Caudal de ingreso del humedal  $N(m^3/d)$

$A_N$ : Área superficial del humedal  $N(m^2)$

$P$ : Tasa de precipitación  $(m/d)$

$ET$ : Tasa de evapotranspiración  $(m/d)$

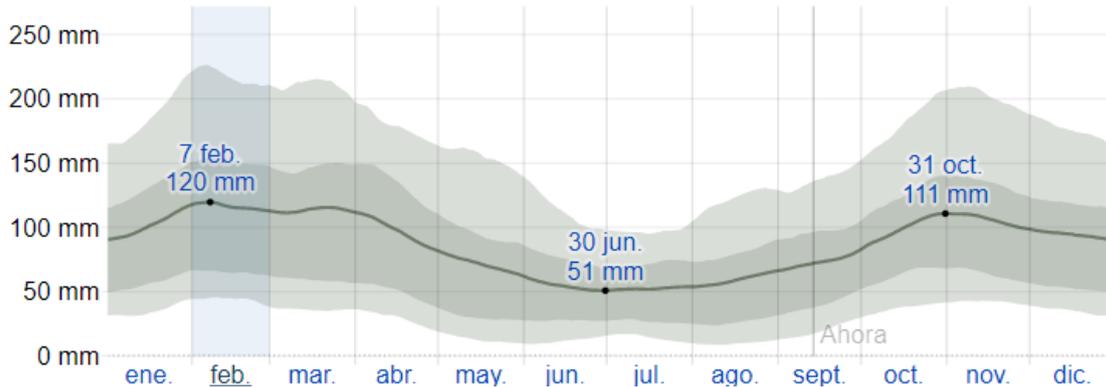
$I$ : tasa de infiltración  $(m/d)$

El caudal de egreso desde la cama 1 será el caudal de ingreso de la cama 2, o sea que:

$$Q_{s1} = Q_{i2} \quad \text{Ecuación 6-13}$$

En función de las especificaciones técnicas de la bomba Barsha (ver Anexo I), se estima un caudal de bombeo medio  $Q_i$  la mayor parte del año. Sin embargo, se prevé caudales mínimos y máximos.

El volumen de agua aportado por las precipitaciones dependerá de la estación del año. Para estimar el aporte diario se consultó el mismo informe climatológico realizado por Weather Spark (2019) para la estimación de las temperaturas de invierno y de verano. La distribución mensual de precipitaciones se observa en la Figura 6.6.



**Figura 6.6:** La lluvia promedio (línea sólida) acumulada en un periodo móvil de 31 días, con las bandas de percentiles del 25º al 75º y del 10º al 90º.

Los valores de evapotranspiración (ET) y de Infiltración (I) se adoptaron de valores sugeridos por Kadlec & Wallace (2009). El primero dependerá fuertemente de la época del año. El volumen de agua infiltrado, es notablemente menor frente a  $Q_i$  y  $Q_s$ . Esto se debe a la impermeabilidad de la membrana y a la poca probabilidad de roturas.

En la Tabla 6.9 se resumen el valor de las variables que conforman el balance hídrico, en los escenarios de verano e invierno.

**Tabla 6.9:** Valores de variables utilizadas en el balance hídrico.

Variable	Unidad	Verano			Invierno			
		Qmin	Qmed	Qmax	Qmin	Qmed	Qmax	
Cama 1	$Q_i$	m <sup>3</sup> /d	7,4	20	40	7,4	20	40
	$Q_s$	m <sup>3</sup> /d	6,94	19,54	39,54	7,14	19,74	39,74
	P	mm/d	3,23	3,23	3,23	1	1	1
	ET	mm/d	5	5	5	2	2	2
	I	mm/d	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Cama 2	$Q_i$	m <sup>3</sup> /d	6,94	19,54	39,54	7,14	19,74	39,74
	$Q_s$	m <sup>3</sup> /d	6,49	19,09	39,09	6,88	19,48	39,48
	P	mm/d	3,23	3,23	3,23	1	1	1
	ET	mm/d	5	5	5	2	2	2
	I	mm/d	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

#### d) Relación Largo-Ancho (L:A)

La relación L:A es un aspecto fundamental en el diseño hidráulico, ya que define el área transversal por donde pasara el flujo a tratar, y consecuentemente su velocidad y el tiempo y forma en que este interactúa con el medio filtrante, biofilm y raíces de los juncos.

Los humedales con valores de L:A cercanos a 1, estos son los más amplios, reducen la posibilidad de ocurrencia de fallas hidráulicas, principalmente el *clogging* ya que, al

aumentar el área transversal, disminuye la tasa de carga y también la velocidad de flujo. La desventaja es que no siempre es fácil asegurar una distribución homogénea en grandes áreas transversales flujo. Por el contrario, en los humedales más estrecho ( $L:A \gg 1$ ) se logra una distribución homogénea, pero son mucho más susceptibles a fallas hidráulicas debido a una reducida área transversal, que aumenta las velocidades y tasas de carga.

Debido a que el diseño de HCEP de este proyecto busca evitar las fallas hidráulicas y constantes tareas de mantenimiento, se adoptó una relación  $L:A = 2$ . El problema de distribución no homogénea se resolverá con el sistema de distribución inicial descrito en la sección 6.4.2

### e) Altura de nivel de agua

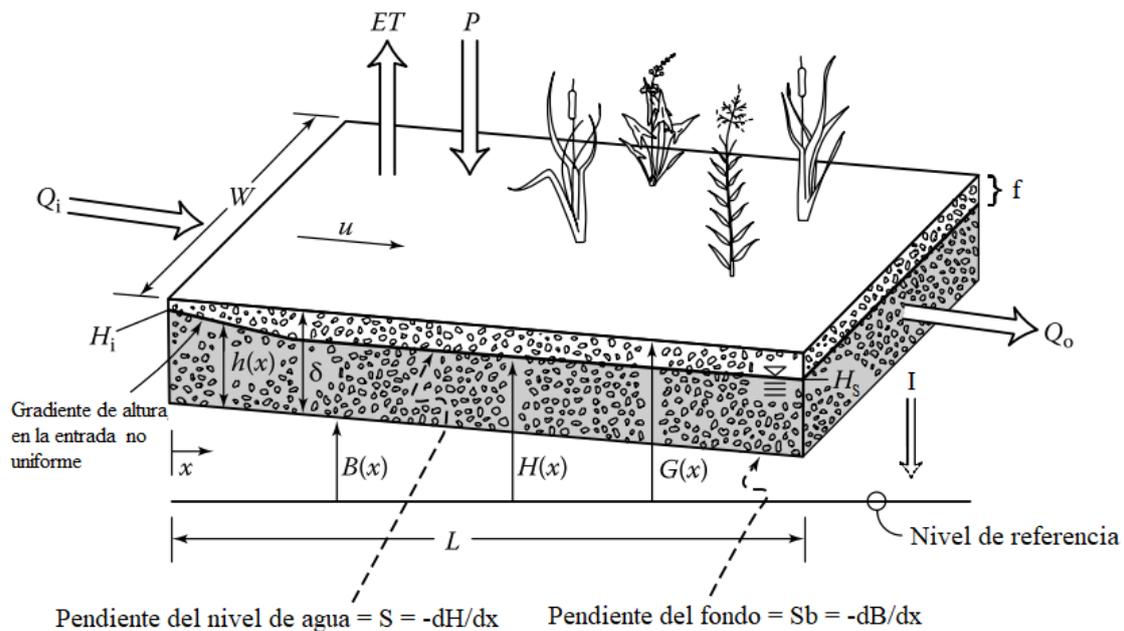
La altura del nivel de agua, no es una variable que pueda adoptarse, sino que esta dependerá de las anteriores variables adoptadas y será gobernada por las pérdidas de fricción dentro del humedal. Si el flujo se mantiene en un régimen laminar, las pérdidas por fricción pueden calcularse a partir de la Ley de Dary (de una dimensión)

$$u = -k_h \frac{dH}{dx} \quad \text{Ecuación 6-14}$$

Donde

$H$ = nivel de la superficie del agua (m)

$k_h$ = conductividad hidráulica (m/d)



**Figura 6.7: Balance hídrico**



$B(x)$ = elevación del fondo (m)

$G(x)$ = elevación de la superficie del medio filtrante (m)

$H(x)$ = elevación del nivel de agua (m)

$P$ = precipitación (m/d)

$x$ = distancia longitudinal

$ET$ = evapotranspiración

$h(x)$ = profundidad del agua (m)

$L$ = largo (m)

$Q$ = caudal ( $m^3/d$ )

$\Delta$ = profundidad del medio filtrante (m)

Suponiendo que se trata de un flujo continuo, puede calcularse el perfil hidráulico como:

$$\frac{d[u(H-B)]}{dx} = 0 \quad \text{Ecuación 6-15}$$

$$-\frac{dH}{dx} = \frac{1}{k_h} u \quad \text{Ecuación 6-16}$$

El caudal dentro del sistema puede definirse como el producto de la velocidad de flujo y el área transversal:

$$Q = u W h \quad \text{Ecuación 6-17}$$

$$h = H - B \quad \text{Ecuación 6-18}$$

Las condiciones de contorno vienen dadas por la altura de salida ( $h_s$ ) regulada en la cámara niveladora el caudal de ingreso ( $Q_i$ ) y además que el nivel de agua no supere la altura del medio filtrante:

$$H_{x=L} = H_s \quad , \quad Q_{x=0} = Q_i \quad y \quad 0 < h < \delta$$

A partir de la suposición ideal de que la  $k_h$  es constante a lo largo del sistema, se tiene que:

$$\frac{H_i - H_s}{L} = \frac{u_{prom}}{k} = \frac{1}{k} \frac{Q}{Wh_{prom}} \quad \text{Ecuación 6-19}$$

Nótese que el gradiente de altura de esta ecuación es la pendiente del nivel de agua y no la pendiente del fondo del humedal. Las variables  $h_i$ ,  $L$ ,  $W$  y  $k_h$  son variables que determinan el diseño y geometría del humedal, por lo tanto, no son variables que puedan variarse en la operación. Sin embargo, el nivel de salida de agua  $h_s$  si puede variarse, de hecho, de manera muy sencilla mediante la cámara niveladora. Por lo tanto, en

función del caudal operativo, podrá estimarse  $h_s$ , mediante la sustitución de  $h_{prom}$  y algunos pasajes de términos de la ecuación 6-19, llegando a la siguiente expresión:

$$h_s^2 = h_i^2 - 2 \frac{L}{W} \frac{Q}{k} \quad \text{Ecuación 6-20}$$

Con la restricción de que la diferencia de altura del medio filtrante y el nivel de agua sea:

$$f < 10 \text{ cm}$$

De esta manera se asegurará una irrigación continua al sistema radicular de los juncos, independientemente del caudal operativo, a partir de la regulación de  $h_s$  en la cámara de nivelación.

Otra manera de interpretar el máximo caudal operativo, es que será aquel que, a partir de una pérdida de fricción en un medio y geometría específica, cumpla la siguiente desigualdad:

$$Q < \frac{k}{2} \left( \frac{h_i^2 - h_o^2}{L/W} \right) \quad \text{Ecuación 6-21}$$

A partir de la ecuación se calcularon las diferentes alturas de operación para diferentes escenarios de tratamiento descriptas en la Tabla 5.3

## 7. Análisis Económico

El análisis económico es fundamental en la evaluación de factibilidad del HCEP. Para ello se realizó el computo de todos los materiales y mano de obra que conformaran el proyecto, desde la etapa inicial hasta el O&M. Una vez hecho el computo se hizo un análisis de costos de mano de obra, precio y calidad de distintos proveedores para poder establecer un presupuesto.

La cotización de materiales se hizo de forma directa a partir de consultas telefónicas, correo electrónico y páginas web de proveedores ubicados en la provincia de Buenos Aires, a excepción de la bomba Barsha la cual solo se distribuye desde los Países Bajos. Los costes asociados a la construcción se obtuvieron a partir del software libre "Generador de Precios.Argentina". Este se utiliza para la cotización de proyectos de Arquitectura, Ingeniería y Construcción, el cual permite la obtención de costes de construcción ajustados al mercado de forma completa, consistente y con información técnica vinculada a cada unidad de obra)

El presupuesto final corresponde a una tarifa en Dólares Americanos (USD) basado al tipo de cambio correspondiente al 1º de noviembre del 2019 (USD 1 = 59,78 ARS)



## 7.1 Inversión Inicial

Los detalles del cómputo y presupuesto de la inversión inicial se detallan en la Tabla 7.1. Los costos unitarios de trabajos de construcción contemplan la mano de obra, materiales, herramientas, equipos, instalación, etc., necesarios para llevarse a cabo. El costo de la bomba Barsha contempla los gastos de envío desde los Países Bajos.

El rubro de mayor incidencia corresponde al medio filtrante (Figura 7.1). Si bien el escombro de construcción es un material sumamente económico frente a otros materiales de uso común como la grava, su costo se asocia principalmente a la trituración, acondicionamiento (separación de materiales indeseados, separación de material fino, lavado). Se prevé que todos los trabajos de acondicionamiento del escombro, se realicen en el centro urbano más cercano, siendo este, la localidad de Marcos Paz. Esto es para transportar únicamente los metros cúbicos de escombro ya acondicionado y reducir costos de flete.

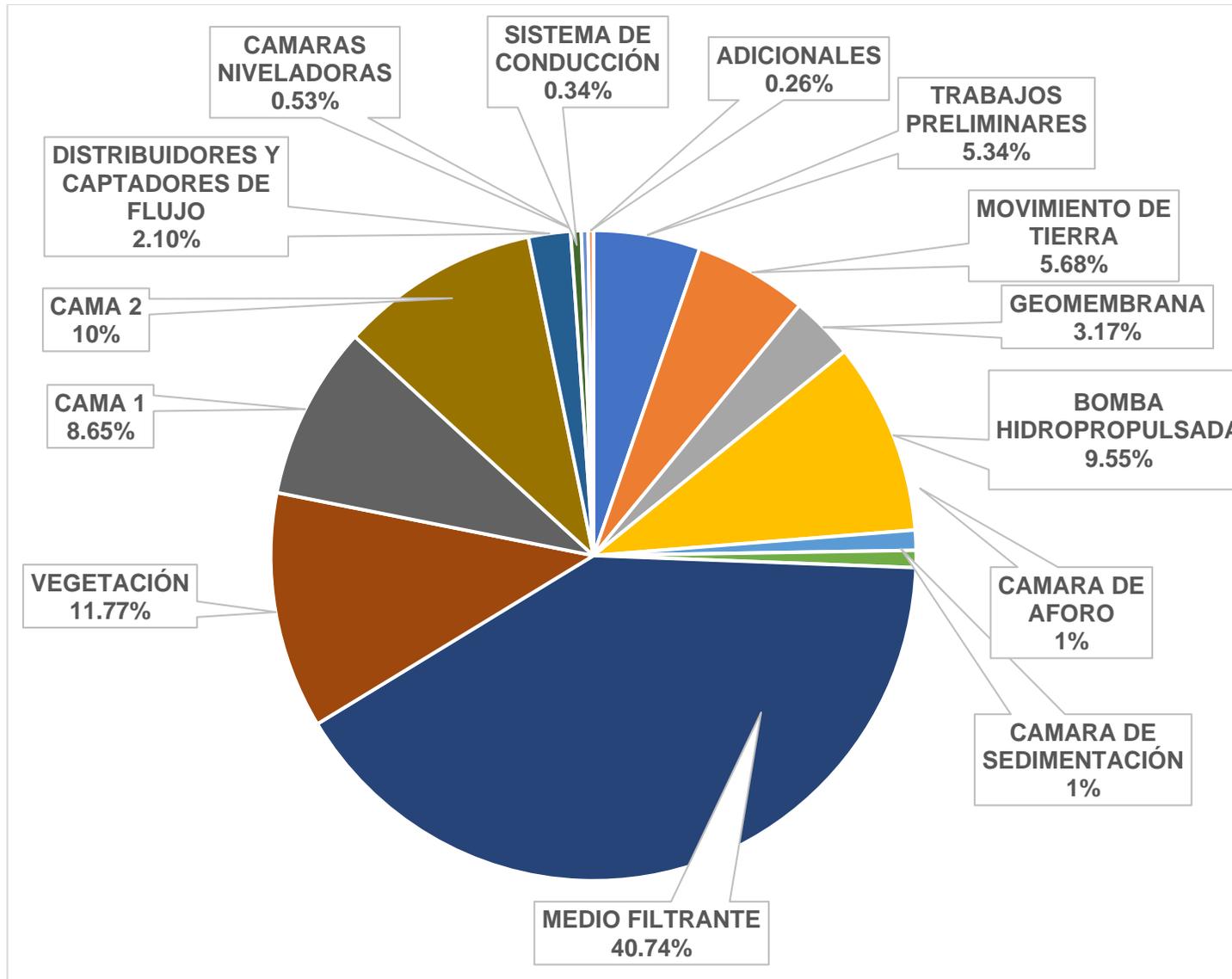
Se contempló un coeficiente para sobrestimar el cálculo en un 20% para cubrir costos eventualmente no considerados. El costo final estimado para la inversión inicial es de US\$ 27.802,06 contemplando un coeficiente.

**Tabla 7.1:** Computo y presupuesto para la Inversión Inicial del HCEP.

Cómputo y presupuesto de HCEP: Inversión Inicial											
NRO.		Descripción	Unid.	Cantidad	Costo Unitario (ARS)	Costo Unitario (USD)	Importe Ítem (USD)	Importe Rubro (USD)	% Incidencia		
Rubro	Ítem								Ítem	Rubro	
<b>1</b>		<b>TRABAJOS PRELIMINARES</b>						<b>1.237,04</b>		<b>5,34</b>	
	1.01	Nivelación	m2	510	145,00	2,43	1.237,0		5,34		
<b>2</b>		<b>MOVIMIENTO DE TIERRA</b>						<b>1.316,48</b>		<b>5,68</b>	
	2.01	Excavación a cielo abierto	m3	235	322,81	5,40	1.266,2		5,47		
	2.02	Excavación de zanjas (<0,3 m)	m	40	75,00	1,25	50,18		0,22		
<b>3</b>		<b>GEOMEMBRANA</b>						<b>735,11</b>		<b>3,17</b>	
	3.01	Geomembrana 250 micrones	m2	707	62,19	1,04	735,11		3,17		
<b>4</b>		<b>BOMBA HIDROPROPULSADA</b>						<b>2.212,38</b>		<b>9,55</b>	
	4.01	Barsha	u	1	123756,34	2.070,20	2.070,2		8,94		
	4.02	Instalación	u	1	8500,00	142,19	142,19		0,61		
<b>5</b>		<b>CAMARA DE SEDIMENTACIÓN</b>						<b>231,23</b>		<b>1,00</b>	
	5.01	Encofrado	m2	9	947,00	15,84	137,88		0,60		
	5.02	Hormigonado	m3	1,74	2362,20	39,51	68,79		0,30		
	5.03	Válvula esférica 40	u	1	1300,00	21,75	21,75		0,09		
	5.04	Codo 90° PVC DN 40	u	2	84,00	1,41	2,81		0,01		
<b>6</b>		<b>CAMARA DE AFORO</b>						<b>197,39</b>		<b>0,85</b>	
	6.01	Adquisición de C. de Aforo	u	1	11800,00	197,39	197,39		0,85		
<b>7</b>		<b>MEDIO FILTRANTE</b>						<b>9.439,61</b>		<b>40,74</b>	
	7.01	Escombros triturados	m3	600	550,00	9,20	5.520,2		23,83		
	7.02	Acondicionamiento	m3	600	178,00	2,98	1.786,5		7,71		
	7.03	Flete	m3	510	250,00	4,18	2.132,8		9,21		
<b>8</b>		<b>VEGETACIÓN</b>						<b>2.727,33</b>		<b>11,77</b>	
	8.01	Extracción de Juncos	m2	200	376,80	6,30	1.260,6		5,44		
	8.02	Acondicionamiento	m2	200	188,40	3,15	630,31		2,72		
	8.03	Flete	m3	200	250,00	4,18	836,40		3,61		
<b>9</b>		<b>CAMA 1</b>						<b>2.004,39</b>		<b>8,65</b>	
	9.01	Plantación de Juncos	m2	255	60,00	1,00	255,94		1,10		

**Tabla 7.1 (Continuación):** Computo y presupuesto para la Inversión Inicial del HCEP

	9.02	Nivelación	m2	255	31,20	0,52	133,09		0,57	
	9.03	Gaviones	m3	14	1667,90	27,90	378,33		1,63	
	9.04	Arena	m3	51	1450,00	24,26	1.237,04		5,34	
<b>10</b>		<b>CAMA 2</b>						<b>2.318,74</b>		<b>10,01</b>
	10.0	Plantación de Juncos	m2	255	45,00	0,75	191,95		0,83	
	10.0	Nivelación	m2	255	31,20	0,52	133,09		0,57	
	10.0	Gaviones	u	27	1667,90	27,90	756,67		3,27	
	10.0	Arena	m3	51	1450,00	24,26	1.237,04		5,34	
<b>11</b>		<b>DISTRIBUIDORES Y CAPTADORES DE FLUJO</b>						<b>487,19</b>		<b>2,10</b>
	11.0	Tubo PVC DN 110	m	90	130,00	2,17	196,59		0,85	
	11.0	Tubo Ranurado DN 160	m	45	360,00	6,02	272,20		1,17	
	11.0	Tee PVC DN 110	u	2	550,00	9,20	18,40		0,08	
<b>12</b>		<b>CAMARAS NIVELADORAS</b>						<b>121,79</b>		<b>0,53</b>
	12.0	Encofrado	m2	4	947,00	15,84	63,37		0,27	
	12.0	Hormigonado	m3	1	2362,20	39,51	31,61		0,14	
	12.0	Codo 90° PVC DN 110	u	1	189,76	3,17	3,17		0,01	
	12.0	Tubo Espiral	m	2	557,00	9,32	18,63		0,08	
	12.0	Cadena	m	1	299,00	5,00	5,00		0,02	
<b>13</b>		<b>SISTEMA DE CONDUCCIÓN</b>						<b>78,53</b>		<b>0,34</b>
	13.0	Manguera Polietileno k 4 DN 40	m	40	84,86	1,42	56,78		0,25	
	13.0	Tubo PVC DN 110	m	10	130,00	2,17	21,75		0,09	
<b>14</b>		<b>ADICIONALES</b>						<b>61,17</b>		<b>0,26</b>
	14.0	Pluviómetro	u	1	1699,00	28,42	28,42		0,12	
	14.0	Abrazaderas	u	8	176,00	2,94	23,55		0,10	
	14.0	Termómetro de exterior	u	1	550,00	9,20	9,20		0,04	
<b>TOTAL COSTO NETO</b>			<b>\$</b>					<b>23.168,38</b>	<b>100,00</b>	<b>100,0</b>
<b>TOTAL PRECIO ESTIMADO</b>			<b>\$</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>1,20</b>			<b>27.802,06</b>		



**Figura 7.1:** Porcentaje de gasto de los distintos rubros para la inversión inicial.

## 7.2 O&M

El cómputo y presupuesto de la O&M se detalla en la Tabla 7.2. Puede observarse que no existen costos asociados a consumos energéticos y/o insumos, ya que el HCEP solo depende de energías renovables desconectadas de la red eléctrica. Esto significa un ahorro significativo en la operación y representa una de las grandes ventajas de este tipo de sistema.

Debido a que el propósito principal del HCEP está asociado a fines investigativos, los costos de la O&M están principalmente asociados a tareas de control de un buen funcionamiento hidráulico, monitoreo de la vegetación y análisis de calidad de agua. Estas tareas precisan conocimiento y criterio de profesionales con formación técnica y científica. Es por ello que se consultaron los honorarios mínimos de colegios de ingenieros, técnicos y biólogos.

Se propone el análisis de un número mínimo de parámetros, necesarios para asegurar una caracterización relevante y suficiente para la interpretación de la calidad de agua tratada, particularmente de su estado eutrófico, pudiendo ampliarse el número de parámetros a analizar, para una caracterización más compleja. Los costos de análisis se consultaron en la Cámara Argentina de Laboratorios Independientes, Bromatológicos, Ambientales y Afines (CALIBA). La tarea de mayor incidencia corresponde al control y manejo hidráulico del sistema (Figura 7.2). Esto se debe a que se realiza intermitentemente con intervalos de una semana, a diferencia del resto de las tareas que tienen intervalos trimestrales.

El costo anual de O&M, considerando una sobrestimación del 20% es de US\$ 7.088,43

## 7.3 Propuestas de Financiamiento

Para la financiación de la construcción, operación y mantenimiento del proyecto se proponen diferentes opciones, pudiendo ser complementarias entre sí, Estas son:

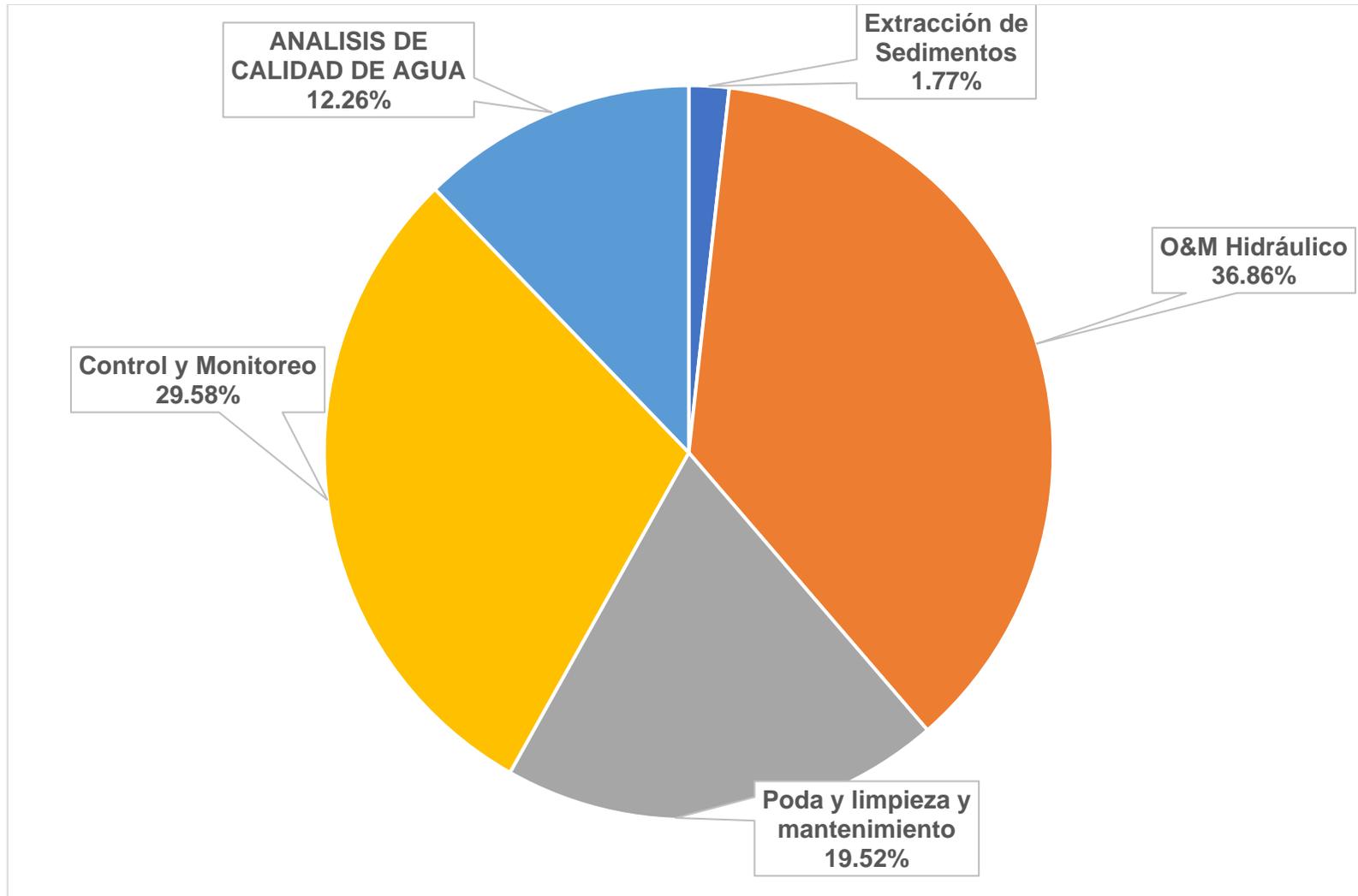
- a) Subvención de ACUMAR en su lugar de ente autónomo, autárquico e interjurisdiccional que conjuga el trabajo con los tres gobiernos que tienen competencia en el territorio de la CMR: Nación, Provincia de Buenos Aires y Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Se propone como principal propuesta, ya que ACUMAR, es el ente más interesado en la investigación y desarrollo de tecnologías alternativas, afrontables y eficientes como lo son HC para el saneamiento de la CMR
- b) Financiamiento cooperativo entre ACUMAR y otros entes del sector público y/o privado con interés en la investigación y desarrollo de HC en la Argentina. Esto permitiría eventualmente una mayor participación en la O&M, así como también



un monitoreo y estudio más complejo e intensivo del funcionamiento y eficiencia de tratamiento del sistema.

**Tabla 7.2:** Computo y presupuesto para la Operación y Mantenimiento del HCEP.

<b>Cómputo y presupuesto de HCEP: Operación y Mantenimiento (O&amp;M)</b>											
NRO.	Rubro	Item	Descripción	Unid	Cant	Costo Unitario (ARS)	Costo Unitario (USD)	Importe Item (USD)	Importe Rubro (USD)	% Incidencia	
										Item	Rubro
<b>15</b>			<b>CAMARA DE SEDIMENTACIÓN</b>						<b>104,30</b>		<b>1,77</b>
	15.0		Extracción de	kg/añ	245	25,47	0,43	104,30		1,77	
<b>16</b>			<b>HUMEDAL</b>						<b>2.167,95</b>		<b>36,70</b>
	16.0		O&M Hidráulico	h/año	216	600,00	10,04	2.167,95		36,70	
<b>17</b>			<b>VEGETACION</b>						<b>2.887,92</b>		<b>48,89</b>
	17.0		Poda y	h/año	220	312,00	5,22	1.148,21		19,44	
	17.0		Control y	h/año	65	1600,00	26,76	1.739,71		29,45	
<b>18</b>			<b>ANALISIS DE CALIDAD DE AGUA</b>						<b>746,86</b>		<b>12,64</b>
	18.0		DBO5	u/año	4	1921,28	32,14	128,56		2,18	
	18.0		Norg	u/año	4	1411,44	23,61	94,44		1,60	
	18.0		NH4+-N	u/año	4	513,79	8,59	34,38		0,58	
	18.0		NO3-N	u/año	4	575,29	9,62	38,49		0,65	
	18.0		TP	u/año	4	1023,96	17,13	68,52		1,16	
	18.0		Hidrocarburos	u/año	4	2243,00	37,52	150,08		2,54	
	18.0		Coliformes	u/año	4	897,32	15,01	60,04		1,02	
	18.0		pH	u/año	4	318,40	5,33	21,30		0,36	
	18.0		Potencial	u/año	4	655,00	10,96	43,83		0,74	
	18.1		Solidos	u/año	4	897,32	15,01	60,04		1,02	
	18.1		Oxigeno	u/año	4	705,00	11,79	47,17		0,80	
<b>TOTAL COSTO NETO</b>			<b>USD</b>						<b>5.907,03</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>TOTAL PRECIO ESTIMADO</b>			<b>USD</b>	<b>Coeficiente =</b>	<b>1,20</b>				<b>7.088,43</b>		



**Figura 7.2:** Porcentaje de gasto de los distintos rubros para la O&M



## 8. Evaluación de Impacto Ambiental

### Introducción

Como se ha desarrollado en anteriores capítulos, el proyecto no se trata de un sistema de tratamiento a escala real, sino uno a escala piloto. Hay que entender que, en general, independientemente del tipo de sistema que se analice, de existir algún impacto ambiental negativo, este será insignificante frente al mismo sistema a escala real.

Los sistemas de tratamiento a partir de humedales construidos, tiene particularidades y diferencias sustanciales a otros sistemas “convencionales” que ya se explicaron y que también se verán reflejados en el tipo y grado de impacto que tiene en el medio ambiente.

Una vez aclarado esto, se desarrollan a continuación los puntos más relevantes respecto al impacto medio ambiental del este proyecto:

### Ubicación

El HCEP se construirá en un ex basural, hoy un biocorredor destinado a la recomponer el ecosistema afectado por el basural, y además un espacio de investigación de diferentes instituciones (ver sección 3.1). Esto implica que la construcción y puesta en marcha del HCEP no comprometerá ecosistemas frágiles que deben ser preservados en sus condiciones naturales (ejemplo; humedales naturales, zonas forestales, etc.). El hecho de que la vegetación (*S. californicus*) del HCEP sea nativa favorecerá la atracción de fauna nativa en el biocorredor.

### Construcción y componentes

La construcción del HCEP demanda la excavación de terreno de dos camas de  $A = 255 \text{ m}^2$  cada una con una profundidad de 0,3 m y 0,6 m. El principal impacto a tener en cuenta en obras de excavación, es el contacto con la napa freática y eventual contaminación de la misma. Además de que se trata de excavaciones de baja profundidad, el HCEP estará situado sobre una capa relleno de suelo dispuesta para recubrir el antiguo basural, ósea que, en definitiva, las obras de excavación estarán lejos del nivel de napa freático. Posiblemente en esta etapa, se encontrarán residuos del antiguo basural, los cuales deberán recibir el tratamiento y disposición adecuado.



Una eventual infiltración por la membrana del HCEP tampoco tendrá relevancia ambiental para el suelo y napas, primero porque de existir, esta sería mínima, y además no se trata de algún efluente peligroso que pueda representar un foco de contaminación preocupante.

El material mayormente demandado será el medio filtrante, o sea los restos de escombros de granulometría 20-30 mm. (el volumen se detalla en el Computo y Presupuesto, sección 7). Este material, se seleccionó no solo por sus buenas características como medio filtrantes, sino también, que el uso del mismo representa el aprovechamiento de un material que convencionalmente es un residuo de difícil manejo, transporte y disposición, principalmente por su densidad y cantidad. De esta manera, el uso de este material en este proyecto, como en posibles futuros humedales construidos a gran escala, representará un reaprovechamiento y desviación del mismo en el circuito de los residuos.

El otro componente mayoritario en el sistema es la vegetación, conformada por Juncos (*S. californicus*). Se utilizarán individuos con tejido aéreo y radicular desarrollado. Para eso, se deberán extraer desde su hábitat natural y ser replantados en el HCEP. Esto representa el impacto ambiental más negativo identificado en el proyecto, ya que implica la extracción de aproximadamente 170 m<sup>2</sup> de pajonal de Juncos de un medio natural.

Como medida de mitigación, se deberá analizar cuidadosamente desde un enfoque ecológico y biológico, el sitio que sufra menor impacto por la extracción de Juncos, asegurando que esto no afecte la homeostasis del sistema y que las condiciones sean favorables para una rápida recomposición natural de la vegetación extraída. Además, deberá realizarse un plan de monitoreo para analizar el grado de recomposición del área afectada, tomando todas las medidas necesarias para acelerar este proceso

## **O&M**

Los puntos más relevantes en cuanto al impacto ambiental y aspectos ingenieriles de la O&M del HCEP son:

- 1) Consumo nulo de combustibles y electricidad: Como se explicó anteriormente, la operación y funcionamiento del sistema de tratamiento mediante HCEP se basa íntegramente en el uso de energías limpias y sustentables. Desde el bombeo de agua con la bomba Barsha a partir de la energía cinética del A. Morales y el impulso del flujo dentro del humedal a partir de un gradiente de altura hasta los procesos de remoción asociado a procesos microbianos y vegetales. El funcionamiento de la bomba asegura un sistema silencioso y que no afecta el curso normal del arroyo.



- 2) Los únicos costos asociados al proyecto, serán los de compra de materiales y construcción (siendo estos muy bajos comparados a sistemas convencionales de tratamiento) ya que los costos de operación del sistema son nulos. Además, al no haber sistemas mecánicos, hidráulicos, electrónicos, etc., el sistema no precisara ningún tipo de insumo destinado al mantenimiento. Esto hace que, desde el punto de vista ingenieril, el sistema tenga una alta viabilidad económica, lo que contribuye a la eficiencia y sustentabilidad del proyecto.
- 3) El sistema de HC se diseñó a una escala piloto ya que el objetivo es la recopilación de información para fines investigativos, lo que será de valiosa utilidad para un eventual dimensionamiento a escala real. Si bien el HCEP mejorará notablemente la calidad caudal tratado, este no representará mejoras significativas en la calidad del caudal total del A. Morales (lo que sí podría lograrse con un HC a escala real), sencillamente porque el caudal medio tratado corresponde aproximadamente al 0,05% del caudal medio del A. Morales.
- 4) Los humedales de tratamiento secuestran carbono orgánico mediante la acumulación de nuevos sedimentos y suelos. Sin embargo, también emiten gases de efecto invernadero, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. Los grandes multiplicadores para la comparación del efecto radiativo (300 para el óxido nitroso y 20 para el metano) significan que las pequeñas emisiones de estos gases pueden contrarrestar la función de secuestro de carbono a través de la fotosíntesis de las plantas. Por lo tanto, aunque los humedales en general, incluidos los humedales construidos, pueden actuar como sumideros de carbono, aún pueden aumentar el efecto invernadero debido a su liberación de metano y óxido nitroso (Brix et al., 2001). Debido a la pequeña superficie de humedales de tratamiento en comparación con los humedales naturales, los sistemas construidos "no son tan notables" como fuentes de gases de efecto invernadero (Mander et al., 2003). Liikanen y col. (2006) estiman que incluso si todas las aguas residuales globales fueran tratadas en humedales artificiales, su participación en la responsabilidad atmosférica sería inferior al 1% del total (Robert H. Kadlec & Wallace, 2009).

## **Conclusión**

Las características de este proyecto, como su dimensión, ubicación, costos, operación y mantenimiento hace de este un sistema con un impacto ambiental negativo prácticamente nulo. El único impacto negativo atribuible al proyecto sería en la etapa de construcción debido a la extracción de juncos de un ecosistema natural. Respecto a



esto, es fundamental tomar las medidas necesarias para mitigar este impacto y monitorearlo en el tiempo.

El impacto social es sumamente positivo. A partir de este sistema a escala piloto se podrá recopilar valiosa información para el diseño de eventuales sistemas de tratamiento basados en HC a escala real para mejorar la calidad de cuerpos de agua de la CMR como lo es el A. Morales, lo cual tiene un efecto positivo inmediato en el ambiente y en la sociedad.



## 9. Planos

Los planos de del proyecto están adjuntados en el Anexo II: Planos, indicándose número, tema y escala en los respectivos rótulos. Las cotas se encuentran expresadas en milímetros (mm). El nivel de referencia para el perfil hidráulico corresponde a la superficie del Arroyo Morales. Todos los planos están en hojas de tamaño A3.

En la tabla 9.1 se detalla el número y descripción de planos en el Anexo II y se describen las unidades numeradas en el Layout general del proyecto (Plano N°1).

**Tabla 9.1:** Descripción de planos y unidades del proyecto

Planos	
N°	Descripción
1	Layout general del Proyecto
2	Tratamiento Primario: Cámara de Sedimentación
3	- Cámara Niveladora N° 1 y 2 - Cámara de Aforo
4	Sistemas de distribución y recolección
5 (1 de 2)	Vista superior de Cama N°1 y 2
5 (2 de 2)	Corte longitudinal de Cama N° 1 y 2
6	Perfil Hidráulico



# Conclusiones Finales

## Conclusiones del Proyecto

El objetivo general de este proyecto final integrado fue alcanzado con éxito. La complejidad que representa un tratamiento mediante humedales construidos demanda aplicar criterios metódicos y basarse en la bibliografía más actualizada, y no en información obsoleta la cual puede conducir a serios errores de diseño.

El análisis de los valores de parámetros de calidad de agua provistos por la ACUMAR resulto fundamental para este proyecto, ya que pudo entenderse la contaminación del A. Morales desde una dimensión temporal y espacial, desarrollando criterios sólidos para el diseño y ubicación de humedal construido a escala piloto

La experimentación en laboratorio agrego mucho valor al proyecto. Los resultados obtenidos demostraron que es posible diseñar un humedal construido a partir de materiales locales y sumamente económicos, como lo es el escombros de construcción, y el uso de plantas autóctonas como el *S. californicus* o Junco, el cual demostró una gran adaptabilidad al escombros como sustrato.

El funcionamiento basado íntegramente en fuentes de energía renovables hace de este un sistema sumamente viable económicamente, teniendo gastos asociados principalmente a la inversión inicial, y al monitoreo del mismo. Un funcionamiento basado en energías renovables es posible en un diseño a escala real, aunque se deberá contemplar el hecho de generar un embalsamiento mínimo, como única forma de generar el gradiente de altura necesario para superar las pérdidas de fricción dentro del humedal construido.

Los países de climas tropicales y subtropicales como la Argentina presentan las condiciones climáticas óptimas para el uso de humedales construidos y la necesidad más urgente de aplicar sistemas de tratamiento económicos y versátiles. Paradójicamente hay muy poca bibliografía local frente a la de países Nórdicos, con climas más desfavorables para la aplicación de esta tecnología.

Se espera que la operación y monitoreo del humedal construido a escala piloto para el estudio del tratamiento de las aguas del A. Morales, sea un motor generador de información a nivel local, contribuyendo a la aplicación y desarrollo de los humedales



construidos como una tecnología de tratamiento eficiente y económica frente a las necesidades de saneamiento de los cuerpos de agua de la Cuenca Matanza Riachuelo.

## **Conclusiones Personales**

A lo largo de la carrera de Ingeniería Ambiental, tuve particular interés en los humedales construidos como tecnología de depuración. Siento que este interés, fue un viento a favor para el desarrollo y resultado de este trabajo.

Estoy muy conforme porque en el transcurso de este proyecto atravesé instancias muy diferentes entre sí; desde investigación bibliográfica, análisis de datos, campañas de muestreo, salidas a campo, experimentaciones y determinaciones analíticas en laboratorio, entrevistas, diseño y modelación entre otras. A lo largo de cada etapa me fui dando cuenta, lo valiosa que es mi formación académica en Ingeniería Ambiental de la UNSAM, ya que percibí una base sólida de conocimientos y criterios propios en cada una de estas disciplinas, facilitando el desafío de enfrentarme a la mismas.

Una búsqueda constante a lo largo del proyecto fue buscar una solución original e innovadora ante la problemática estudiada. Esto representó una meta desafiante, pero con resultados muy positivos en mi formación académica y personal.



## Bibliografía

- ACUMAR. (2018). *Plan de gestión ambiental y social por subcuenca. Subcuenca Morales*.
- Agency, E. P. (2001). Parameters of Water Quality. Interpretation and Standards. *Journal of Milk and Food Technology*, 35(12), 715–718. <https://doi.org/10.4315/0022-2747-35.12.715>
- Alarcón-Herrera, M. T., Zurita-Martínez, F., Lara-Borrero, J. A., & Vidal, G. (2018). *Humedales de Tratamiento: Alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*.
- Alarcón, H. T., Zurita, M. F., Lara, B. J. A., & Vidal, G. (2018). Humedales de tratamiento, Alternativa de tratamiento de aguas residuales aplicable a América latina, (June).
- Autoridad de Cuenca Matanza Riachuleo (noviembre de 2019). Recuperado de <http://www.acumar.gob.ar/indicadores/cumplimiento-uso-calidad-agua-superficial-subcuenca/>
- Brater, E. F., King, H. W., Lindell, J. E., & Wei, C. . (1996). Handbook of Hydraulics. *ChemTec Publishing*.
- Brix, H., Functions of macrophytes in constructed wetlands, *Wat. Sci. Tech*, 1994. Stephenson, M. et. al. *The Use and Potential of Aquatic Species for Wastewater Treatment. Appendix A. The Environmental Requirements of Aquatic P/ants*. SWRCB Publication No. 65. Sacramento, CA. October, 1980.
- Diagne, M. (2018). Determination of Hydraulic Conductivity of Recycled Clay Bricks and Recycled Concrete Aggregate for base Course Materials, 150(2), 152–158.
- E. Timothy Oppelt. (2000). Manual Treatment of Municipal Wastewaters, (September), 165. Retrieved from <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL>
- Edwards, C., & DuPoldt, R. (2000). *A handbook of constructed wetlands. Wetlands* (Vol. 1). Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.169.7471&rep=rep1&type=pdf>
- EPA. (2000). Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R-99/010. Office of Research and Development Cincinnati, Ohio., (September).
- EPA US. (1988). Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, (September), 92. <https://doi.org/EPA/625/1-88/022>



EPA, Nutrient Pollution (noviembre de 2019). Recuperado de :  
<https://www.epa.gov/nutrientpollution/issue>

Faggi, A. M. (2015). *LA CUENCA MATANZA-RIACHUELO una mirada ambiental para recuperar sus riberas.*

Fuentes Rivas, R. M., Ramos Leal, J. A., Jiménez Moleón, M. del C., & Esparza Soto, M. (2015). CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DISUELTA EN AGUA SUBTERRÁNEA DEL VALLE DE TOLUCA MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA DE FLUORESCENCIA 3D, *31(3)*, 253–264.

Henandez A., *Depuración de Aguas Residuales*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1992

Igoni, A. H. (2016). Adaptation of batch experiment data to the design of anaerobic continuous digesters. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *18(2)*, 378–387.

Kadlec, R. H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological Engineering*, *35(2)*, 159–174.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.04.008>

Kadlec, Robert H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetland (Second)*.

Kandus, P., Quintana, R., Minotti, P., Oddi, J., Baigún, C., Gonzalez Trilla, G., & Ceballos, D. (2010). Ecosistemas de humedal y una perspectiva hidrogeomórfica como marco para la valoración ecológica de sus bienes y servicios.

Lara-Borrero, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales*. Barcelona.

Liikanen A., Huttunen J.T., Karjalainen S.M., Heikkinen K., Väisänen T.S., Nykänen H., Marikanen P.J. Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters. *Ecological Engineering*. (2006)

Mander Ü., Teiter S., Lohmus K., Muring T., Nurk K., Augustin J. Emission rates of N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> in riparian alder forests and subsurface flow constructed wetlands. In: *Wetlands - Nutrients, Metals, and Mass Cycling*, 2003

Malpartida, A. R. (2004). *La cuenca del Río Matanza-Riachuelo. Revisión de antecedentes de recursos naturales, compuestos xenobióticos y otros polutantes en la cuenca.*

Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering. Treatment and Resource Recovery*.  
OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico). *Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control*. Cooperative Programmers on



- Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate, OECD Paris, Final Report. France. 1982
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. *Revista*, 1, 34.
- Osorio, P. C., & Peña, D. (2012). Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región., 0–18.
- Quintana, R., Minotti, P., Kandus, P., Benzaquén, L., Blanco, D., Bo, R., & Lingua, G. (2017). *Regiones de Humedales de la Argentina*.
- Rahman, M. A., Imteaz, M. A., & Arulrajah, A. (2016). Suitability of reclaimed asphalt pavement and recycled crushed brick as filter media in bioretention applications. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 15(1), 32–48. <https://doi.org/10.1504/IJESD.2016.073333>
- Ramallo, R. S. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*.
- Rapisarda, R., Marzo, A., Milani, M., Ventura, D., Consoli, S., & Cirelli, G. . (2018). Assessment of the first-order kinetic removal models on constructed wetland in a Mediterranean area, (October).
- Ren, Y., Zhang, B., Liu, Z., & Wang, J. (2007). Optimization of four kinds of constructed wetlands substrate combination treating domestic sewage. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 12(6), 1136–1142. <https://doi.org/10.1007/s11859-007-0085-x>
- Riser-Roberts, E. (1998). *Remediation of petroleum contaminated soils: biological, physical, and chemical processes*.
- Rodgers, J. H., & Castle, J. W. (2008). Constructed wetland systems for efficient and effective treatment of contaminated waters for reuse. *Environmental Geosciences*, 15(1 PART 1), 1–8. <https://doi.org/10.1306/eg.11090707019>
- Rousseau, D. P. L., Vanrolleghem, P. A., & De Pauw, N. (2004). Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: A review. *Water Research*, 38(6), 1484–1493. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.12.013>
- Stein O.R., Towler B.W., Hook P.B., Beiderman J.A. On fitting the k-C\* first order model to batch loaded subsurface treatment wetlands. Dias V., Vymazal J. (eds.) Proceedings of the 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, September 2006
- U.S. EPA. (1993). *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. A technology assessment. Ecological Engineering* (Vol. 2).



[https://doi.org/10.1016/0925-8574\(93\)90009-5](https://doi.org/10.1016/0925-8574(93)90009-5)

Vijayaraghavan, K., & Raja, F. D. (2014). Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. *Water Research*, 63, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.012>

Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>

Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*.

Wallace, S. D., American, N., Engineering, W., Knight, R. L., & Solutions, W. (2006). *Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems. Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements*.

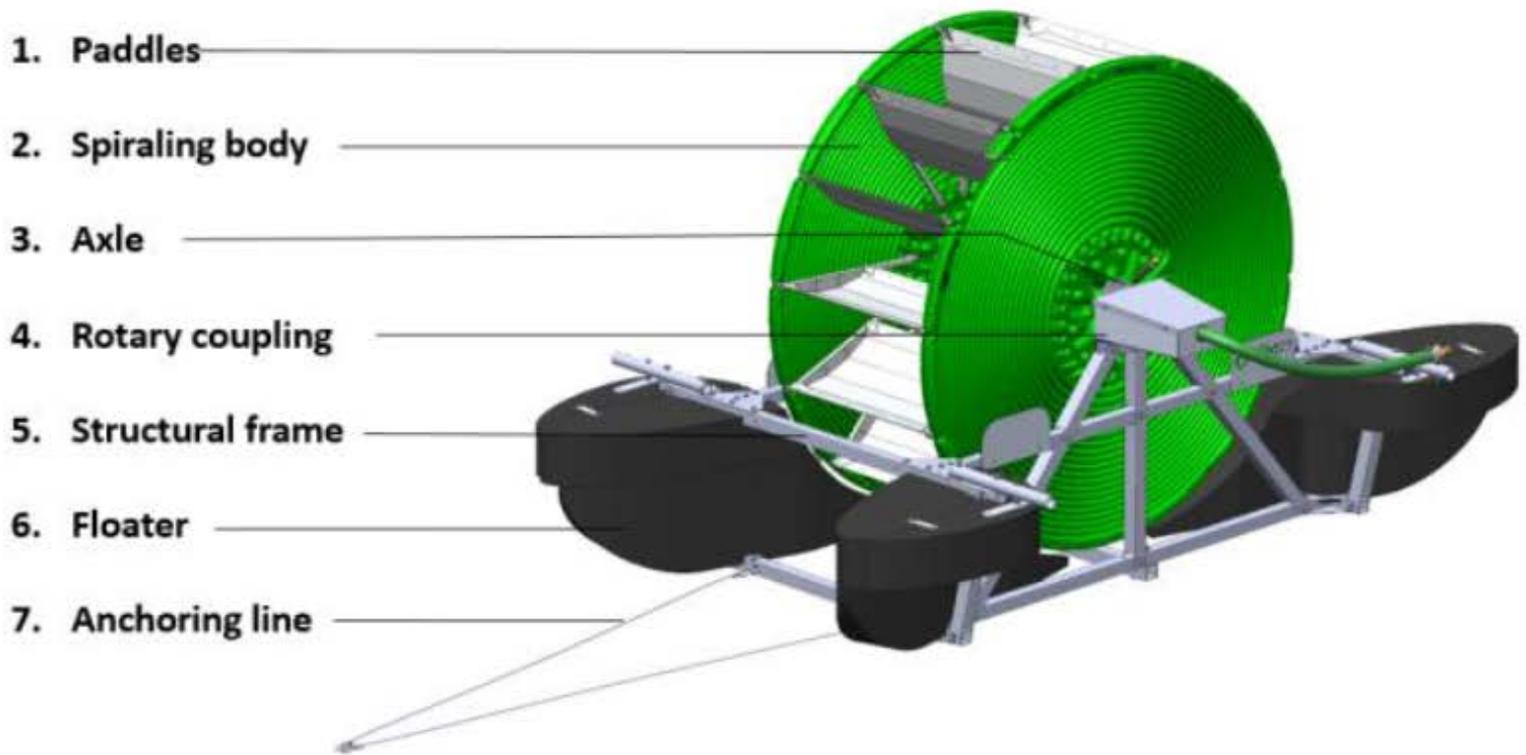
Weather Spark (agosto de 2019). Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/28981/Clima-promedio-en-Buenos-Aires-Argentina-durante-todo-el-a%C3%B1o>



# **Anexo I: Especificaciones técnicas de Equipos y Materiales**

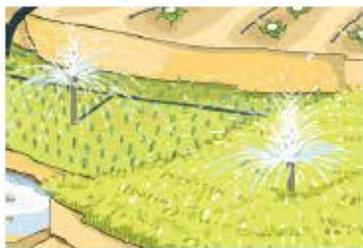
# The Barsha Pump

## Variants & Specifications



The Barsha Pump is a water-wheel propelled pump that utilizes the energy of flowing rivers and canals to pump water, **without requiring any fuel or electricity.**

### Applications



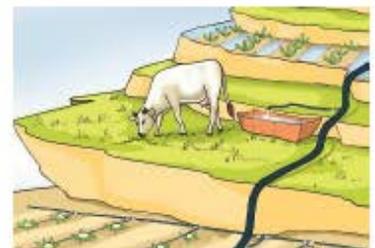
Irrigation



Drinking Water



Aquaculture



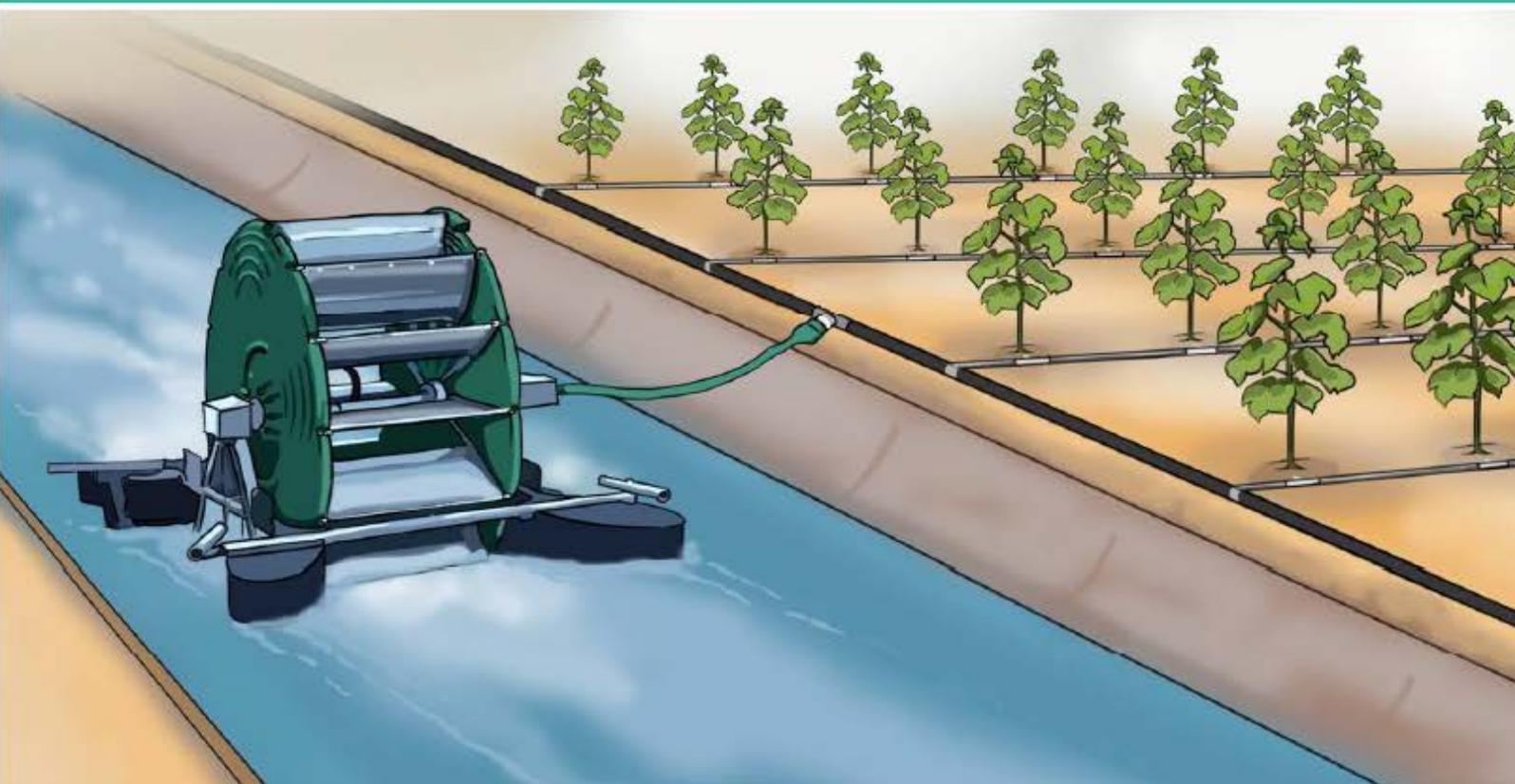
Livestock



**aQysta**  
Innovating for Impact

W: [aQysta.com](http://aQysta.com)  
M: [info@aQysta.com](mailto:info@aQysta.com)  
T: +31 623 47 47 57  
F: [www.facebook.com/aQysta](http://www.facebook.com/aQysta)

# Barsha Pump - Big Canals – Floating Version



		Narrow	Wide
Output [Pipe size: - 1.5 inches(40mm) for distance greater than 200 meters - 1.25 inch (32mm) otherwise]	Max. Height*	20 meters	20 meters
	Max. Distance*	2 kilometers	2 kilometers
	Max. Flow Rate*	0.5 liters/second 40,000 liters per day	0.5 liters/second 40,000 liters per day
Input Conditions Required	Min. width required	160 cm	180 cm
	Min. Depth required	30 cm	30 cm
	Min. speed required	1 m/s	0.8 m/s
	Min. Flow rate required	300 liter/second	300 liter/second
Dimension	Width	155 cm	175 cm
	Length	286 cm	286 cm
	Height	159 cm	159 cm
	Weight	92 kg	97 kg

*\*The performance values mentioned above are the maximum values at the optimum input conditions.*

## FlexPlan® ST 0,42

Geomembrana sintética de policloruro de vinilo (PVC) apta para ser utilizada como barrera impermeable de líquidos o gases.

### PROPIEDADES MECÁNICAS

Resistencia a la tracción	mínima	10	MPa	ASTM D 882
Elongación a la rotura	mínima	200	%	ASTM D 882
Resistencia al desgarre	mínima	3	daN/mm	ASTM D 1004
Doblado a baja temperatura	-20°C	No quiebra		ASTM D 1790
Estabilidad dimensional (100°C 15min)	máximo	5	%	ASTM D 1204

### CARACTERÍSTICAS

Color	Negro			
Espesor	0,42	mm	IRAM 78004-1	IRAM 78004-2

### PRESENTACIÓN

Ancho x Largo	mínima	2,20 x 60 4,2 x 50	m x m
Superficie	mínima	132 210	m <sup>2</sup>

SOLDADURA ENTRE PAÑOS (IRAM 78008): La unión de las láminas puede obtenerse por:

- termofusión
- soldadura química
- cinta adhesiva
- alta frecuencia

VERIFICACIÓN SOLDADURAS: en todos los casos las soldaduras deberán seguir los lineamientos de la norma IRAM 78008.

*Todos los valores de esta tabla son medios corresponden a resultados de ensayos estándar propios o provistos por nuestros proveedores.*

*Las especificaciones y características descritas pueden ser modificadas a partir de desarrollos tecnológicos adoptados por nuestros proveedores.*

*En todos los casos el proyectista debe verificar, en las condiciones particulares de cada obra, la aptitud del producto y los resultados que pueden derivarse de su aplicación. La decisión de uso del producto es exclusiva responsabilidad del proyectista y el usuario.*

FlexPlan® es marca registrada de Coripa S.A.

# Tubos de PVC rígido ranurados para drenaje

## APLICACIONES

- Drenaje de campos deportivos y espacios verdes.
- Drenaje de submuraciones y muros de contención.
- Drenaje profundo en caminos o estacionamientos.
- Depresión de napas freáticas.
- Sistemas de captación de agua.
- Lechos nitrificantes.
- Captación de gases.



## PRESENTACIÓN

Código de producto	Diámetro (mm)	Largo (m)	Espesor (mm)	Ranuras			Área ranurada por tubo (cm <sup>2</sup> )	Capacidad captación v=5cm/s (lts/h)	Capacidad captación v=2,5cm/s (lts/h)
				Largo (mm)	Ancho (mm)	Separación (mm)			
TDR 063/4/32	63	4	3,2	25	1,2	10	118	8460	4230
TDR 110/4/32	110	4	3,2	56	1,2	10	271	19476	9738
TDR 160/4/32	160	4	3,2	81	2,2	34	209	15012 (*)	7506 (*)
TDR 200/4/28	200	4	2,8	100	2,2	34	259	18612 (*)	9306 (*)
TDR 250/6/49	250	6	4,9	120	2,2	34	311	33588 (*)	16794(*)

Consultar por fabricación especial de otros diámetros y espesores de tubos.

(\*) Otras capacidades de captación disponibles.

### Sistemas de Unión

Uno de los extremos acampanado para acople por enchufe. Puede realizarse roscado de tubos de espesor adecuado o suministrarse otro sistema de unión.

### Ranurado

Consulte diferentes longitudes de ranuras y separaciones entre estas, así como la cantidad de cuadrantes a ranurar.

### Filtro Geotextil

Los tubos TDR pueden proveerse envueltos con un filtro de geotextil notejido.

### Accesorios

Pueden complementarse con accesorios standard para desagües cloacales. Diámetro exterior normalizado.

## CARACTERÍSTICAS

### MAYOR SUPERFICIE DE CAPTACIÓN

La tecnología del ranurado de los tubos **TDR**, permite obtener una secuencia y longitud de abertura que logran superficies de captación mucho mayores a las de los productos tradicionales.

### ÓPTIMA DIMENSIÓN DE RANURAS

El ancho de las ranuras dificulta el ingreso de materiales granulares al interior de los tubos, mientras que su separación constituye un eficaz soporte para filtros sintéticos livianos (geotextiles) o naturales (piedra partida o similar).

### ELEVADA RESISTENCIA QUÍMICA

El policloruro de vinilo -PVC- es un termoplástico de elevada resistencia química, tanto a sustancias ácidas como alcalinas. Por ello, los tubos **TDR** no sufren corrosión y poseen una larga vida útil, aún estando expuestos a suelos o fluidos agresivos.

### NOTABLE COMPORTAMIENTO MECÁNICO

La disposición alternada de las ranuras garantiza una resistencia al aplastamiento similar a los tubos lisos. Su elasticidad y resistencia a los impactos evitan roturas o deterioros durante su manipuleo e instalación.

### EXCELENTE DESEMPEÑO HIDRÁULICO

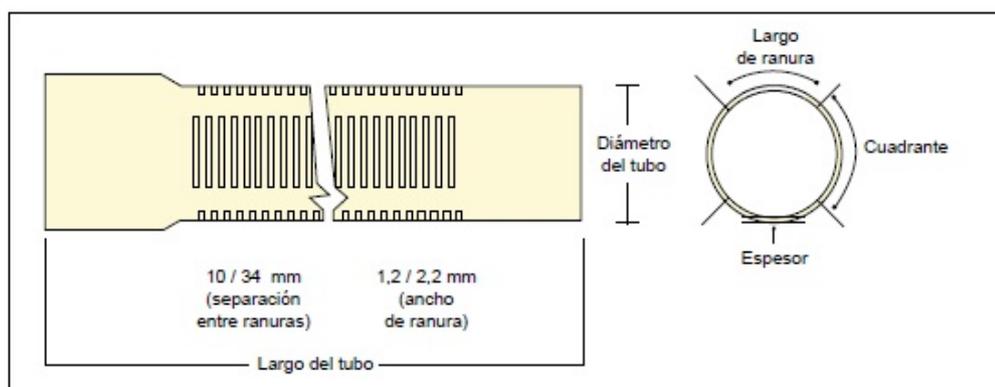
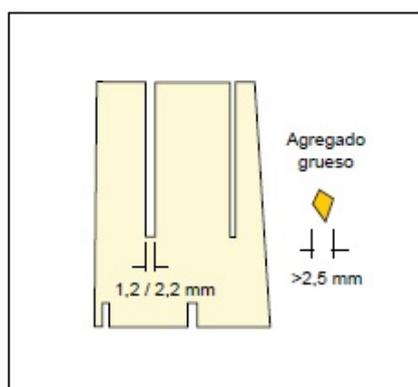
La superficie interior lisa de los tubos **TDR** no genera prácticamente resistencia al paso de los fluidos, permitiéndoles un excelente desempeño hidráulico respecto de las tuberías de drenaje convencionales. El uso de PVC -polímero químicamente inerte- más la terminación interior "espejada" del tubo, evita el peligro de incrustaciones o la adherencia de elementos extraños.

### ECONÓMICOS

Los tubos **TDR** son altamente competitivos frente a otras alternativas, incluso ante el ranurado o perforado manual de las tuberías plásticas.

Permite reducir las dimensiones habituales de las trincheras drenantes, con el consiguiente ahorro de excavaciones y de material granular de relleno. Una mayor disminución puede lograrse utilizando tubos **TDR** envueltos directamente en un filtro geotextil.

Bajo costo de transporte e instalación, debido a su reducido peso y facilidad de montaje.



Solicite mayor información a nuestra Oficina Técnica sobre otros productos y servicios complementarios.

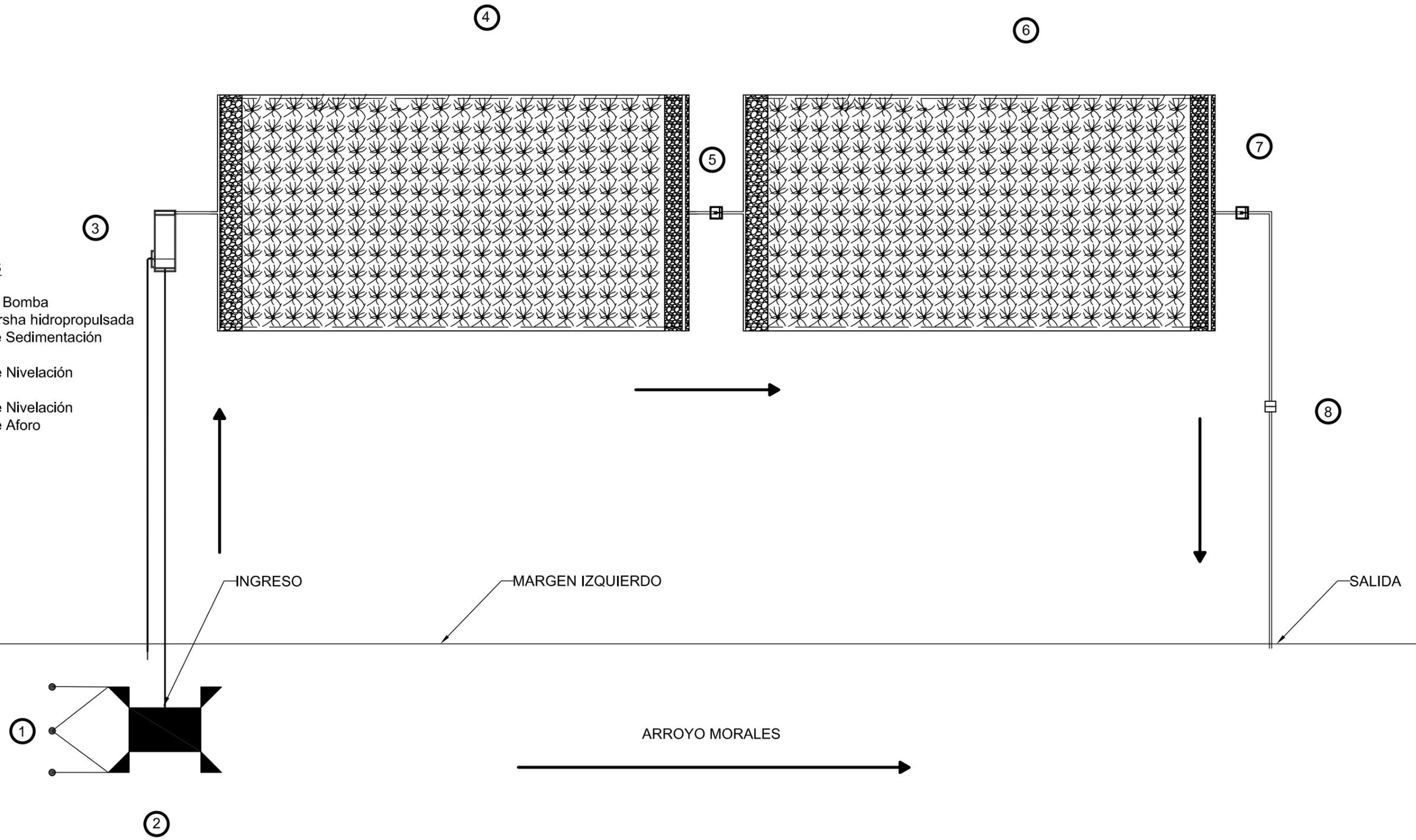
El diseño de un sistema de drenaje suele requerir el cálculo hidráulico de los drenes y los filtros a emplear. Si bien existen criterios generales orientativos al respecto, es siempre recomendable contar con una asistencia técnica adecuada. Las especificaciones y características descriptas pueden modificarse sin previo aviso.

# **Anexo II: Planos**



**REFERENCIAS**

- 1. Anclaje de Bomba
- 2. Bomba Barsha hidropulsada
- 3. Cámara de Sedimentación
- 4. Cama 1
- 5. Cámara de Nivelación
- 6. Cama 2
- 7. Cámara de Nivelación
- 8. Cámara de Aforo



MARGEN DERECHO

	FECHA	NOMBRE	Diseño de un Humedal Construido a escala piloto para el tratamiento de las aguas contaminadas del Arroyo Morales
DIBUJÓ			
REVISÓ			
APROBÓ			
Escala: 1:15	LAYOUT GENERAL DEL PROYECTO		
PLANO N° 1			

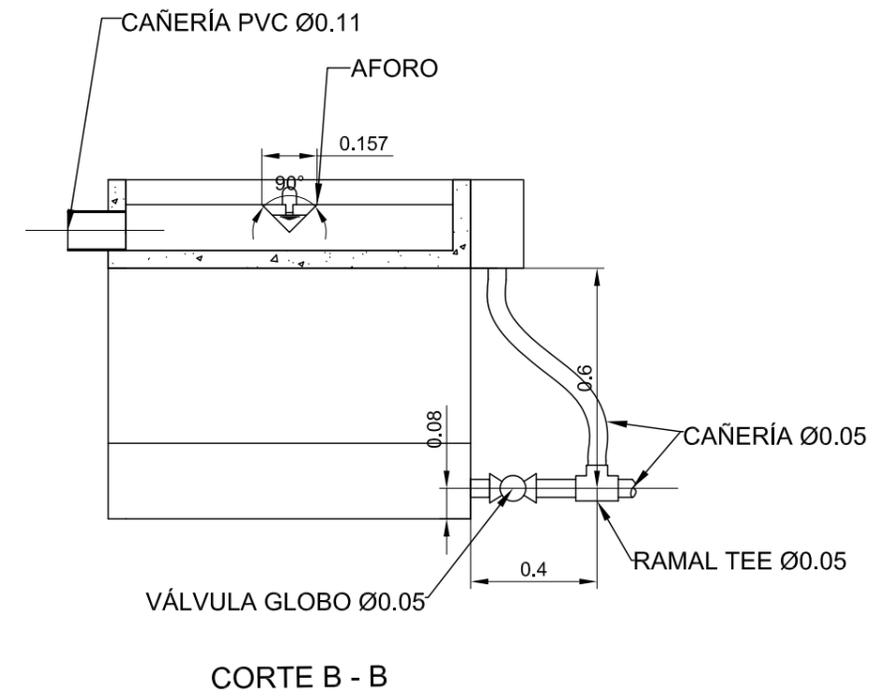
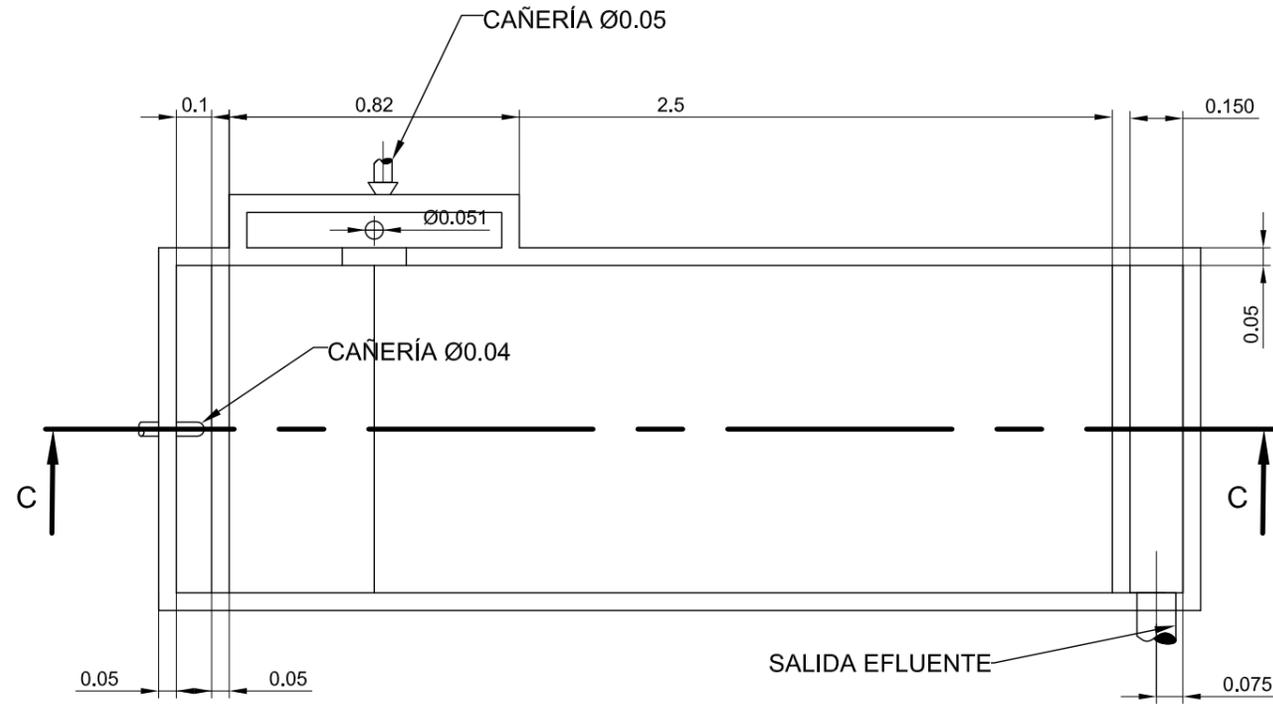


**3iA**  
Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental

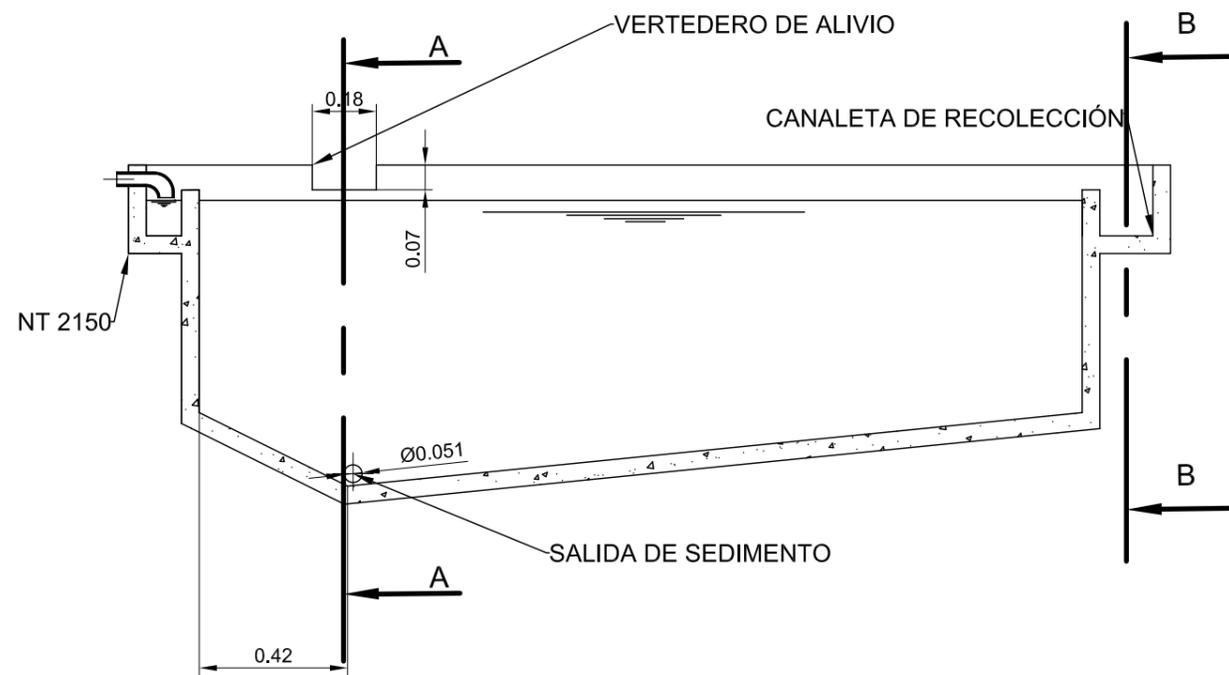
Alumno: Juan Pedro Sajoux

Carrera: Ingeniería Ambiental

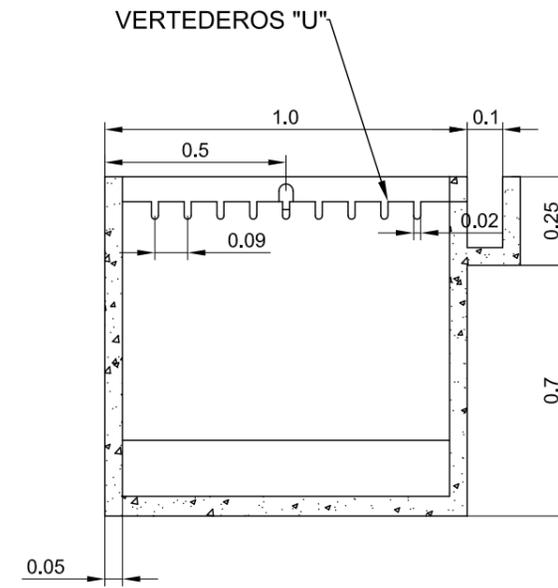
VISTA SUPERIOR



CORTE B - B



CORTE C - C



CORTE A - A

	FECHA	NOMBRE	Diseño de un Humedal Construido a escala piloto para el tratamiento de las aguas contaminadas del Arroyo Morales
DIBUJÓ			
REVISÓ			
APROBÓ			
Escala: 1:20	TRATAMIENTO PRIMARIO: CÁMARA DE SEDIMENTACIÓN		
PLANO N° 2			



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN**

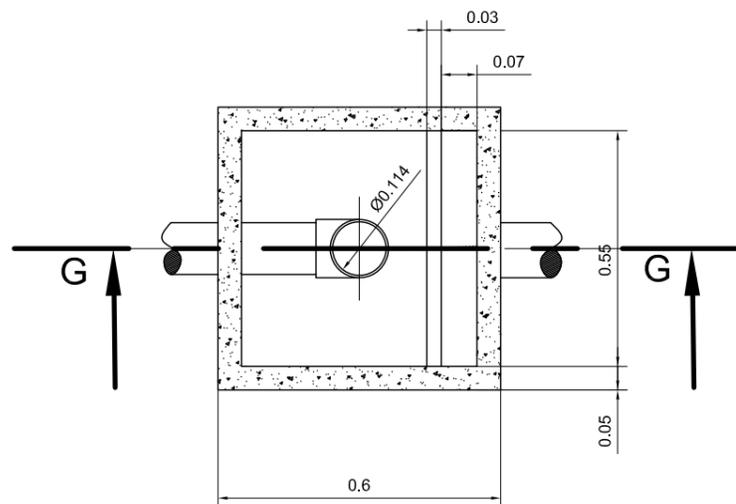


Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental

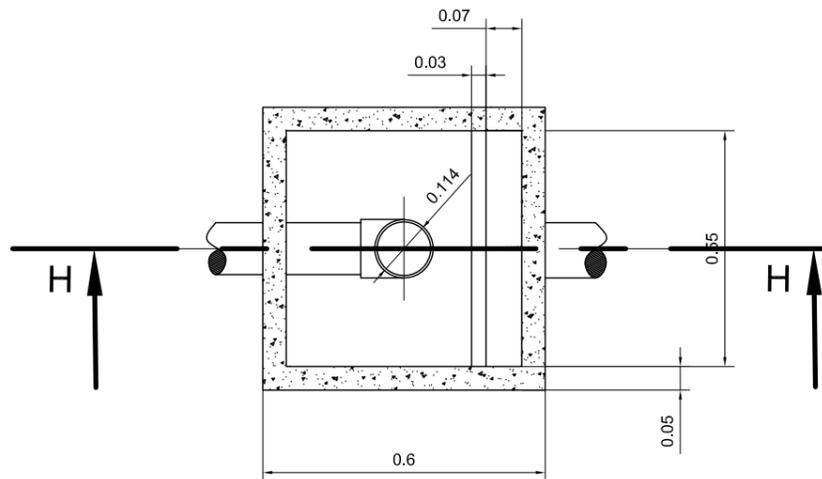
Alumno: Juan Pedro Sajoux

Carrera: Ingeniería Ambiental

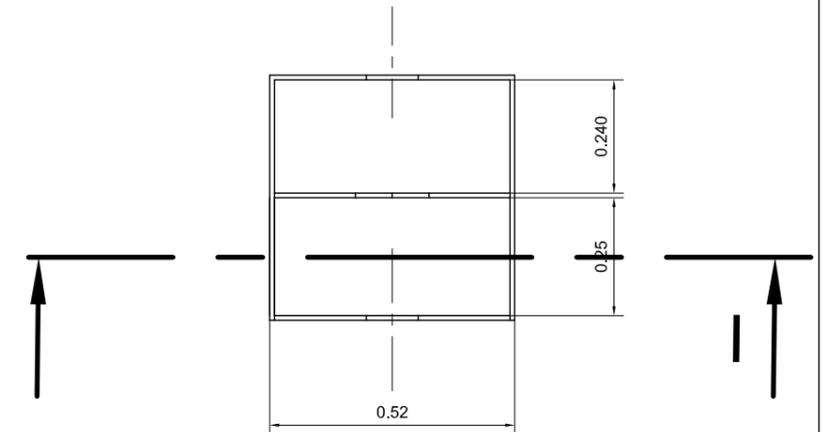
VISTA SUPERIOR CAMARA N° 1



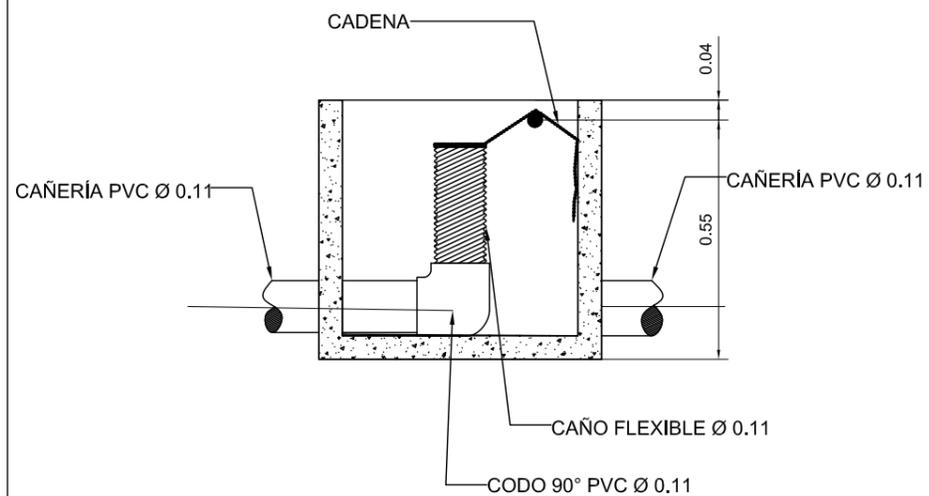
VISTA SUPERIOR CAMARA N° 2



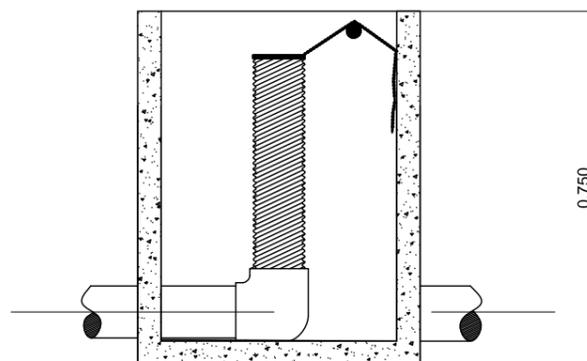
VISTA SUPERIOR CAMARA AFORO



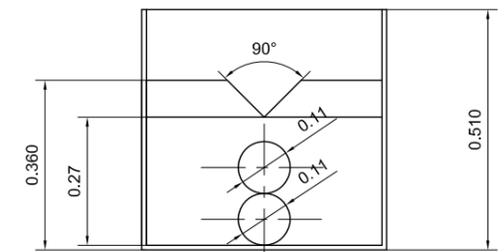
CORTE G - G



CORTE H - H



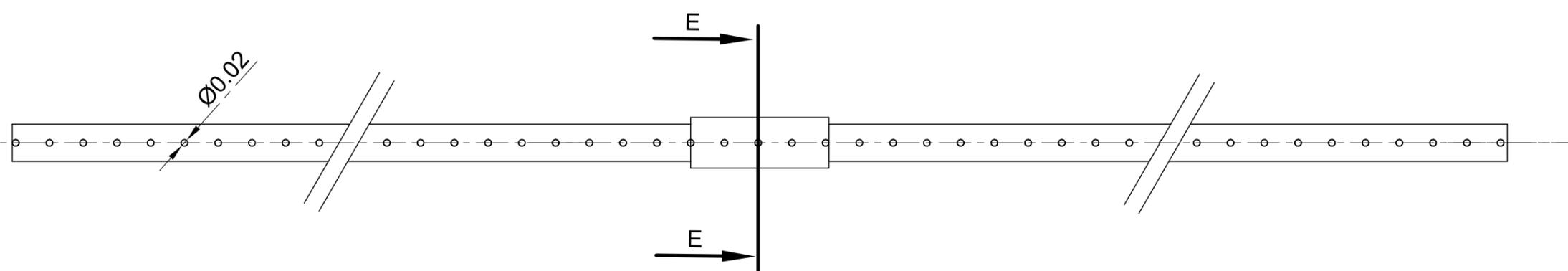
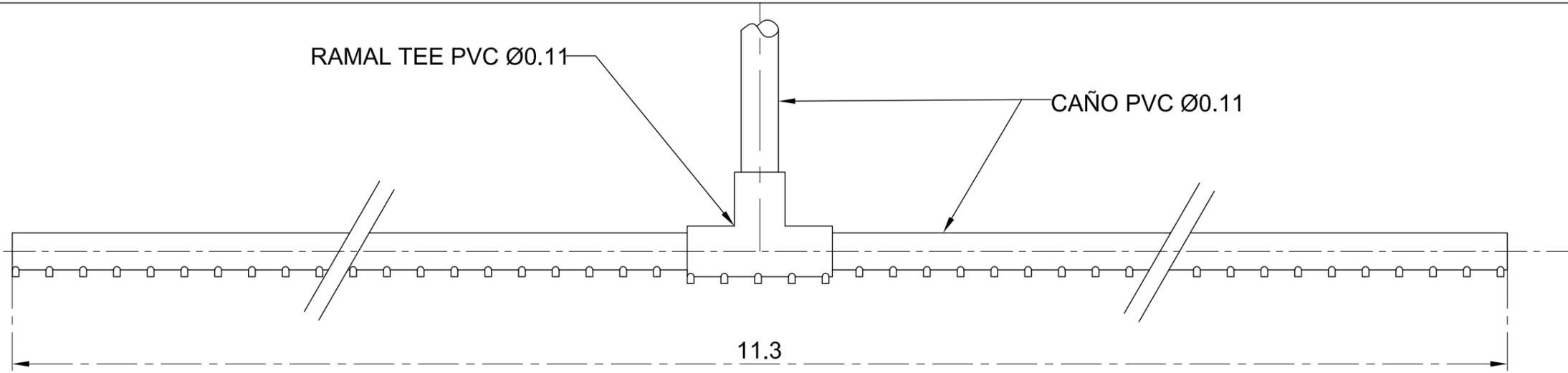
CORTE I - I



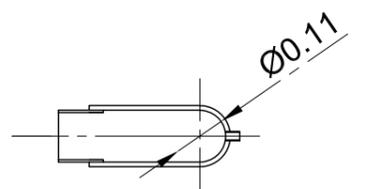
	FECHA	NOMBRE	Diseño de un Humedal Construido a escala piloto para el tratamiento de las aguas contaminadas del Arroyo Morales	
DIBUJÓ				
REVISÓ				
APROBÓ				
Escala: 1:15	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CÁMARAS NIVELADORAS N° 1 Y N° 2</li> <li>- CÁMARA DE AFORO</li> </ul>		 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN</b>  Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental	
PLANO N° 3				Alumno: Juan Pedro Sajoux
				Carrera: Ingeniería Ambiental

RAMAL TEE PVC Ø0.11

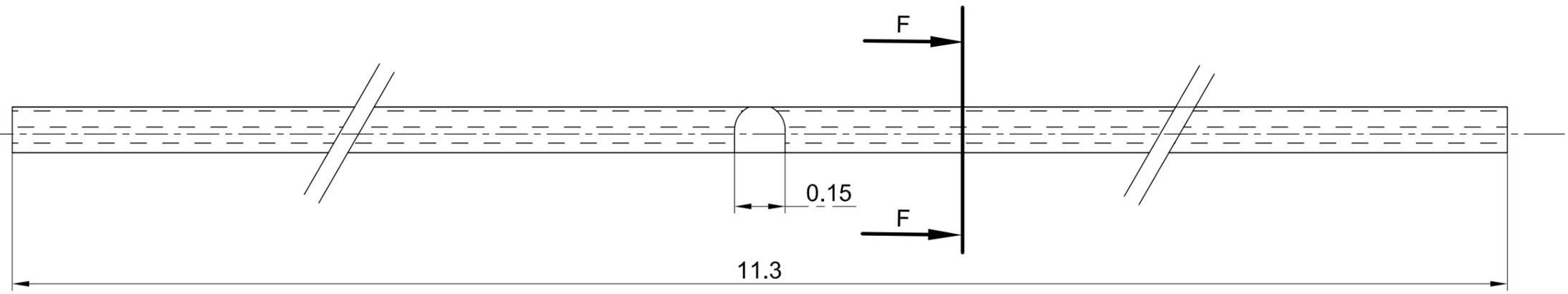
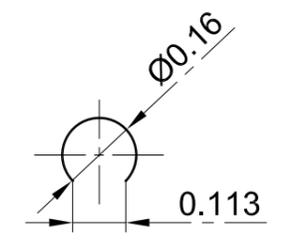
CAÑO PVC Ø0.11



CORTE E-E



CORTE F-F



	FECHA	NOMBRE	Diseño de un Humedal Construido a escala piloto para el tratamiento de las aguas contaminadas del Arroyo Morales
DIBUJÓ			
REVISÓ			
APROBÓ			
Escala: 1:15	SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN Y RECOLECCIÓN DE FLUJO		
PLANO N° 4			



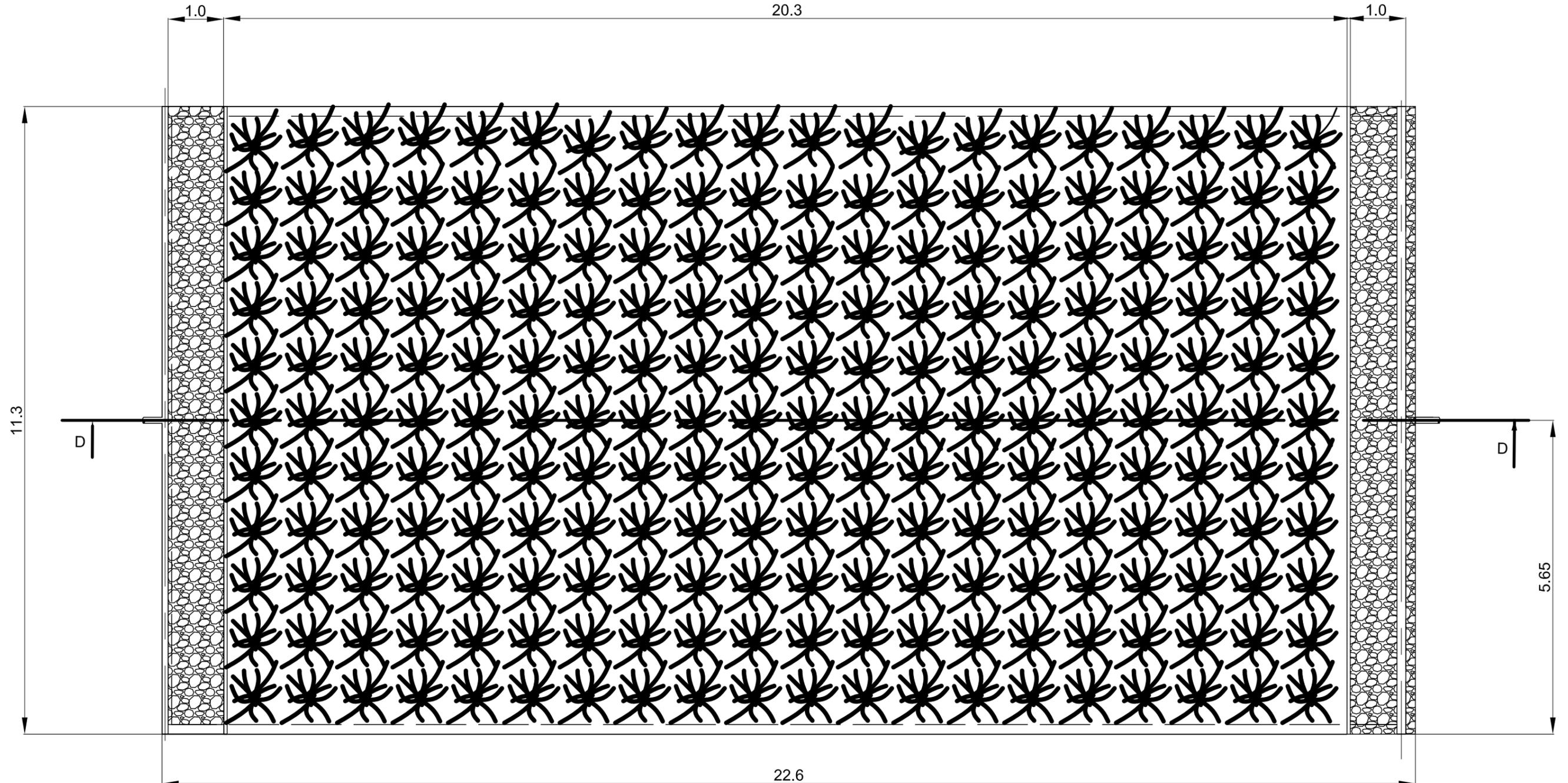
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN**

**3iA**  
Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental

Alumno: Juan Pedro Sajoux

Carrera: Ingeniería Ambiental

VISTA SUPERIOR



	FECHA	NOMBRE	Diseño de un Humedal Construido a escala piloto para el tratamiento de las aguas contaminadas del Arroyo Morales
DIBUJÓ			
REVISÓ			
APROBÓ			
Escala: 1:75	VISTA SUPERIOR DE CAMA N° 1 y 2		
PLANO N° 5 HOJA N° 1/2			

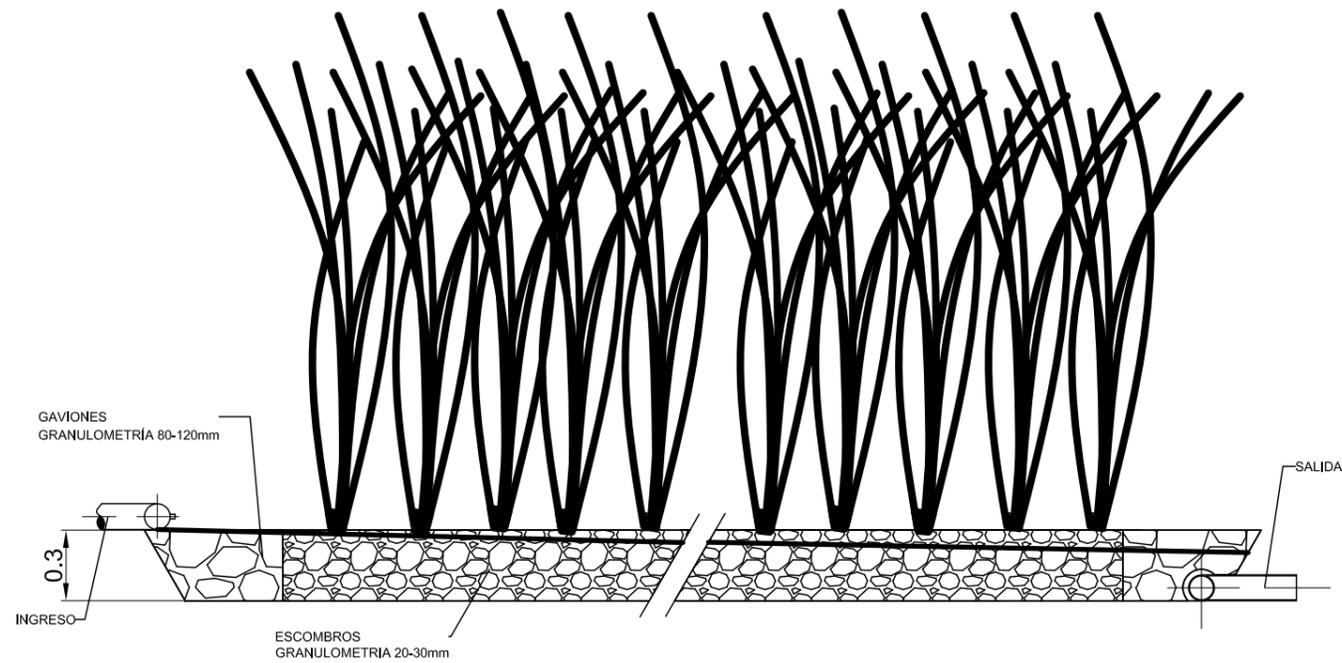
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN

 Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental

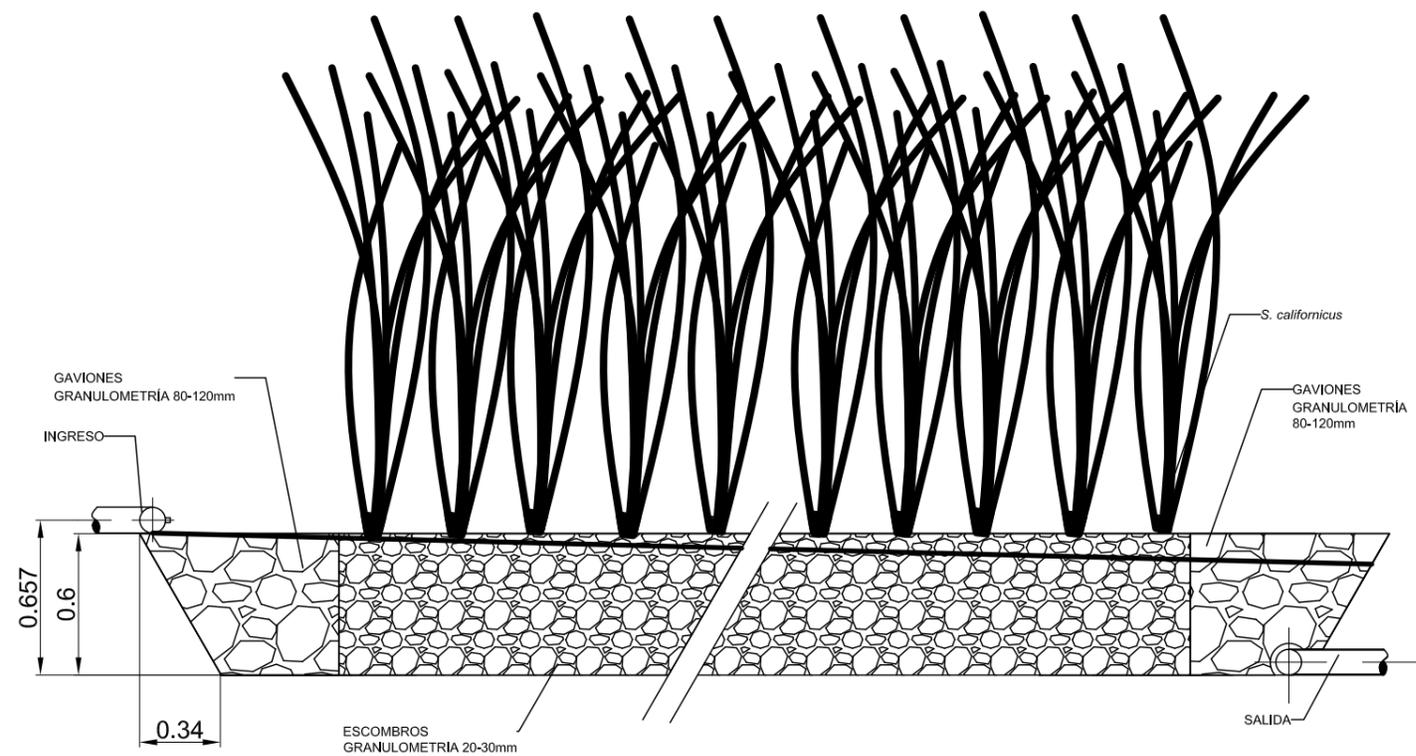
Alumno: Juan Pedro Sajoux

Carrera: Ingeniería Ambiental

CAMA 1 - CORTE D - D



CAMA 2 - CORTE D - D



	FECHA	NOMBRE	Diseño de un Humedal Construido a escala piloto para el tratamiento de las aguas contaminadas del Arroyo Morales
DIBUJÓ			
REVISÓ			
APROBÓ			
Escala: 1:30	CORTE LONGITUDINAL DE CAMA N° 1 Y N° 2		
PLANO N° 5 HOJA N° 2/2			

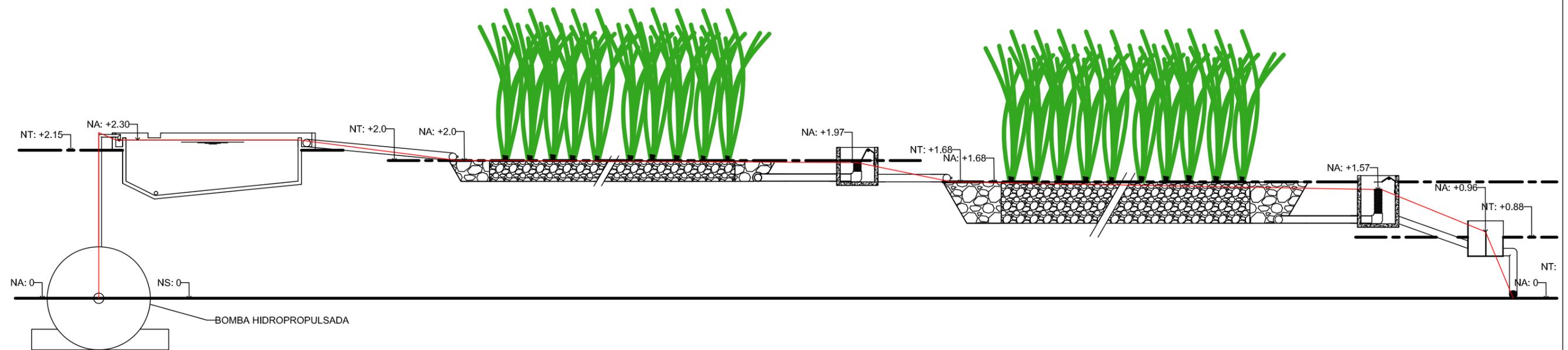


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN**

**3iA**  
Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental

Alumno: Juan Pedro Sajoux

Carrera: Ingeniería Ambiental



**REFERENCIAS**

1. NA: Nivel de Agua
2. NS: Nivel de Suelo
3. NT: Nivel de Terreno

	FECHA	NOMBRE	Diseño de un Humedal Construido a escala piloto para el tratamiento de las aguas contaminadas del Arroyo Morales
DIBUJÓ			
REVISÓ			
APROBÓ			
Escala: 1:60	PERFIL HIDRÁULICO		 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN</b>  <b>3iA</b> Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental
PLANO N° 6			
			Alumno: Juan Pedro Sajoux
			Carrera: Ingeniería Ambiental