

1 DE SEPTIEMBRE DE 2023



DISEÑO DE UN HUMEDAL DE
FLUJO SUBSUPERFICIAL POR
MEDIO
DE UN MODELO DE CAJA NEGRA
PARA TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES PARA UN COMPLEJO
TURÍSTICO
POST TRATAMIENTO
**TRABAJO FINAL INTEGRADOR DE LA CARRERA
DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

ESTUDIANTE: JUAN FRANCISCO SAMUDIO CABALLERO

DIRECTORES: MAURO FERRARESE Y MARTHA CECILIA RIAT

UNRN-5399

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO NEGRO-SEDE ANDINA-SAN CARLOS DE BARILOCHE-
ESCUELA DE PRODUCCIÓN, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



Río Negro
Universidad Nacional

1 AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a mis directores de carrera, tanto a Martha Cecilia Riat y Mauro Ferrarese ya que, me dieron la oportunidad y guiarme para realizar el trabajo final integrador. Además, incluir en esta mención a Fernando Martin.

Agradecer a Gilda que fue de gran ayuda y acompañamiento. A mis amigos Piuque y Cristian por ser como familia y ayudar siempre que necesite. A mi hermana Teresa por el cariño. A todos quienes de alguna u otra manera me brindaron su ayuda desinteresada para conseguir culminar este trabajo, gracias.

Finalmente agradecer a las personas más importantes que son mis padres, Mónica y Francisco, y Abuela porota que me impulsaban y animaban a seguir en la carrera cuando dudaba en cumplir esta meta. Aunque hoy ya no estén, este trabajo está dedicado a ustedes.

2 CONTENIDO

1	AGRADECIMIENTOS.....	2
2	CONTENIDO	3
3	ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
4	ÍNDICE DE TABLAS	11
5	INTRODUCCIÓN.....	15
5.1	EUTROFIZACIÓN	17
6	OBJETIVOS	19
6.1	GENERAL	19
6.1.1	ESPECÍFICOS	19
7	HIPÓTESIS	20
8	JUSTIFICACIÓN.....	21
9	MARCO TEÓRICO: AGUAS RESIDUALES, COMPONENTES Y TRATAMIENTOS	23
9.1	AGENTES DEGRADADORES DEL AGUA:	24
9.1.1	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	25
9.1.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	32
9.1.3	CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS	34
9.2	TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	35
9.2.1	TRATAMIENTO PRELIMINAR/PRETRATAMIENTO	35
9.2.2	TRATAMIENTO PRIMARIO	36
9.2.3	TRATAMIENTO SECUNDARIO	36
9.2.4	TRATAMIENTO TERCIARIO	37
9.3	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	38
9.4	TRATAMIENTO CONVENCIONAL	39
9.4.1	CÁMARA SÉPTICA.....	39
9.4.2	LECHO INFILTRACIÓN	43

9.4.3	IMPACTOS AMBIENTALES DEL TRATAMIENTO CONVENCIONAL	45
10	MARCO LEGISLATIVO	48
11	MARCO TEÓRICO: HUMEDALES CONSTRUIDOS	51
11.1	HISTORIA DE LOS HUMEDALES CONTRUIDOS	51
11.2	HUMEDALES: DEFINICIONES	53
11.3	HUMEDALES CONSTRUIDOS	54
11.3.1	TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS	56
11.4	COMPONENTES DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO	63
11.4.1	HIDROLOGÍA.....	63
11.4.2	SUSTRATO.....	66
11.4.3	MICROORGANISMOS.....	71
11.4.4	VEGETACIÓN.....	72
11.4.5	ANIMALES	74
12	HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL COMO TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	76
12.1	FORMAS Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS AGENTES CONTAMINANTES EN LOS HC	76
12.1.1	SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y SEDIMENTABLES.....	76
12.1.2	MATERIA ORGÁNICA	77
12.1.3	NITRÓGENO	77
12.1.4	FÓSFORO	79
12.2	EXPERIENCIAS EN CLIMAS FRÍOS CON HFSSH.....	79
12.2.1	EJEMPLOS DE HFSSH EN PEQUEÑA ESCALA	80
13	MARCO TEÓRICO: MODELADO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS	87
13.1	MODELOS “CAJA NEGRA”	88
13.1.1	MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL	88
13.1.2	MODELOS DE PRIMER ORDEN – MODELO K-C*:	89

13.1.3	TANQUES EN SERIE:	91
13.1.4	REDES NEURONALES ARTIFICIALES (ANN)	92
14	DISEÑO DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBUPERFICIAL HORIZONTAL	112
14.1	ESQUEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROPUESTO	112
14.2	TRATAMIENTO ANAERÓBICO.....	113
14.2.1	DISEÑO DEL TRATAMIENTO ANAERÓBICO.....	113
14.2.2	ESTIMACIÓN EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DE LA CÁMARA SÉPTICA	118
14.3	TEMPERATURA.....	121
14.3.1	SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMNA)	121
14.3.2	TEMPERATURAS REGISTRADAS EN EL DATTA LOGGER.....	122
14.4	DISEÑO DEL HFSSH PARA 20 PERSONAS APORTANTES	124
14.4.1	PARÁMETROS DE DISEÑO:.....	124
14.4.2	SUSTRATO DEL HFSSH PROPUESTO.....	125
14.5	DISEÑO DEL HFSSH	126
14.5.2	VEGETACIÓN PROPUESTA PARA EL HFSSH DEL PROYECTO	136
14.6	COMPONENTES IMPORTANTES DEL HFSSH AL MOMENTO DE SU CONSTRUCCIÓN 138	
14.6.1	IMPERMEABILIZANTE	138
14.6.2	DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN DE ALTURA DE AGUA ENTRADA- SALIDA.....	139
14.7	PLANO DEL HFSSH.....	144
15	ANÁLISIS ECONÓMICO	145
16	CONCLUSIONES	152
17	BIBLIOGRAFÍA.....	156
18	ANEXOS.....	166
18.1	ABREVIATURAS	166
18.1	BIOFILM- BIOPELÍCULA.....	168

18.2	MACRÓFITAS	169
18.3	CLASIFICACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS FRENTE AL USO Y PRESENCIA DEL OXÍGENO:.....	170
18.4	CLASIFICACION SEGÚN USO DEL CARBONO Y OBTENCIÓN DE ENERGIA	172
18.5	OXIDACIÓN:.....	172
18.5.1	OXIDACIÓN BIOLÓGICA.....	172
18.6	DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	173
18.7	FITOREMEDIACIÓN	177
18.8	SUSTRATO	179
18.9	MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN	179
18.9.1	USO DE EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL	179
18.9.2	MANTENIMIENTO DEL HUMEDAL	179
18.9.3	PUESTA EN MARCHA.....	180
18.9.4	ACTIVIDADES DE RUTINA	181
18.9.5	OPERACIONES A LARGO PLAZO.....	184
18.10	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN.....	186
18.11	TABLA DEL PRIMER REGISTRO DE TEMPERATURAS.	186
18.12	TABLA: SEGUNDO REGISTRO DE TEMPERATURAS	192
18.13	TABLA REGISTRO DEL SMN	202
18.14	PRESUPUESTO BEHA	203
18.15	PLANO DEL HFSSH PARA INFILTRACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA.....	204
18.1	PLANO DEL HFSSH PARA RIEGO DEL AGUA RESIDUAL TRATADA.....	205

3 ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: NOTA: EJEMPLO DE LAGO EUTROFIZADO. EXTRAÍDO DE AGUAYMASCOSAS BLOGSPOT...	18
FIGURA 2: NOTA: EJEMPLO DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE FUNDACIÓN ECOMAR	24
FIGURA 3: NOTA: ANÁLISIS DE LAS AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE EL CONFIDENCIAL	24
FIGURA 4: NOTA: PROCESO DE DESNITRIFICACIÓN. EXTRAÍDO DE MADIGAN, <i>ET AL.</i> (2015).	28
FIGURA 5: NOTA: CICLO REMOCIÓN DE NITRÓGENO EN AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE MADIGAN <i>ET AL.</i> , (2015)	30
FIGURA 6: NOTA: TEMPERATURAS DE LAS AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE TCHOBANOGLIOUS <i>ET AL.</i> (2016)	32
FIGURA 7: NOTA: CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS. EXTRAÍDO DE LAS CLASES DE INGENIERÍA AMBIENTAL UNRN/ AGUAS RESIDUALES	33
FIGURA 8: NOTA: CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS DE LAS AR. EXTRAÍDO DE BIBLIOTECAGBS	34
FIGURA 9: NOTA: SISTEMA DE CÁMARA SÉPTICA Y LECHO DE INFILTRACIÓN. EXTRAÍDO DE LA WEB DEL GOBIERNO DE LA CIUDAD DE EASTHAM MASSACHUSETTES	39
FIGURA 10: NOTA: SISTEMA DE CÁMARA SÉPTICA Y LECHO INFILTRACIÓN. EXTRAÍDO DE MUNICIPALIDAD DE SAN MARTIN DE LOS ANDES	40
FIGURA 11: NOTA: ILUSTRACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LA CÁMARA SÉPTICA. EXTRAÍDO DE MARIÑIELA (2006)	41
FIGURA 12: NOTA: CÁMARA SÉPTICA DE DOS CÁMARAS. EXTRAÍDO DE CÁCERES MAGNUS (2018)	42
FIGURA 13: NOTA: MOVIMIENTO DEL FÓSFORO EN EL SUELO. EXTRAÍDO DE UNIVERSIDAD DE FLORIDA	46
FIGURA 14: NOTA: MOVIMIENTO Y TRANSFORMACIONES DEL NITRÓGENO. EXTRAÍDO DE TCHOBANOGLIOUS, <i>ET AL.</i> , 2016	47
FIGURA 15: NOTA: TRABAJOS PUBLICADOS DE HC EN LATINOAMERICA. EXTRAÍDO DE RODRIGUEZ-DOMINGUEZ <i>ET AL.</i> (2020)	52
FIGURA 16: NOTA: VALOR DEL HUMEDAL. EXTRAÍDO DE STEFANAKIS <i>ET AL.</i> , (2014).	54
FIGURA 17: NOTA: EJEMPLO DE UN HC. EXTRAÍDO DE AGUAS CALIENTES MÉXICO	56
FIGURA 18: NOTA: ILUSTRACIÓN DE UN HFS. EXTRAÍDO DE STEFANIKIS (2016)	58
FIGURA 19: NOTA: ILUSTRACIÓN DE UN HFSSH. EXTRAÍDO DE MADRIMASD	60
FIGURA 20: NOTA: ILUSTRACIÓN DE UN HFV. EXTRAÍDO DE DEPURANATURA	61
FIGURA 21: NOTA: HUMEDAL DE FLUJO ASCENDENTE. EXTRAÍDO DE STEFANAKIS (2014)	62
FIGURA 22: NOTA: VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL AGUA SEGÚN LA ESTACIÓN DEL AÑO. EXTRAÍDO DE LA ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DEL AGUA (IWA) (2006)	64

FIGURA 23: NOTA: ENTRADAS, PERDIDAS Y SALIDAS DE LOS HUMEDALES. EXTRAÍDO DE DUPOLDT, ET AL., 1995.....	66
FIGURA 24: NOTA: EJEMPLOS DE PORCENTAJES DE POROSIDAD TOTAL DE ENSAYOS <i>IN SITU</i> REALIZADOS EN CALIFORNIA. EXTRAÍDO DE CRITES ET AL. (2014).....	70
FIGURA 25: NOTA: EJEMPLO PARA CÁLCULOS DE DIÁMETROS. EXTRAÍDO DE CUSTODIO & LLAMAS, 1983	71
FIGURA 26: NOTA: VEGETACIÓN DE LOS HUMEDALES CONSTRUÍDOS. EXTRAÍDO DE ANNA CORRELA, (2020)	73
FIGURA 27: NOTA: MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES. EXTRAÍDO DE MENA CABRERA (2016)	76
FIGURA 28: NOTA: HFSSH USADO POR EL-KHATEEB & EL-BAHRAWY (2013)	81
FIGURA 29: NOTA: ILUSTRACIÓN DE UN HFSSH MODIFICADO. EXTRAÍDO DE OUELLET-PLAMONDON ET AL, (2006)	84
FIGURA 30: NOTA: DIAGRAMA DE FLUJO DE HFSSH DE SUDARSAN ET AL, (2015)	85
FIGURA 31: NOTA: REPRESENTACIÓN DEL MODELO TIS. EXTRAÍDO DE KADLEC, (2000).....	92
FIGURA 32: NOTA: EJEMPLO DE FUNCIÓN QUE DETERMINA SI LA NEURONA SE DEBE ACTIVAR O APAGAR. EXTRAÍDO DE LIWA (2006)	94
FIGURA 33: NOTA: ILUSTRACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RED NEURONAL. EXTRAÍDO DE LA REVISTA “ELSEVIER”	94
FIGURA 34: NOTA: EJEMPLO DEL HC DISEÑADO POR AKRATOS. EXTRAÍDO DE AKRATOS Y TSIHRINTZIS (2007).	96
FIGURA 35: NOTA: SUPERFICIE REMOCIÓN DE DBO ₅ PARA TRH Y TEMPERATURA. EXTRAÍDO DE AKRATOS, ET AL., 2008.....	101
FIGURA 36: NOTA: SUPERFICIE REMOCIÓN DE P _T PARA TRH Y TEMPERATURA. EXTRAÍDO DE AKRATOS, ET AL., 2009.	102
FIGURA 37: NOTA: SUPERFICIE REMOCIÓN DE N _T PARA TRH Y TEMPERATURA. EXTRAÍDO	103
FIGURA 38: NOTA: RELACIÓN REMOCIÓN DE DBO ₅ DE VALORES MUESTREADOS VS VALORES DE OBSERVADOS POR OTROS AUTORES. EXTRAÍDO DE AKRATOS, ET AL., 2008.	107
FIGURA 39: NOTA: FLUJOGRAMA DE LA PROPUESTA. ELABORACIÓN PROPIA.....	112
FIGURA 40: NOTA: PD POR TEMPERATURA. EXTRAÍDO DE ENOHS, TOMO I “NORMAS DE ESTUDIO, CRITERIOS DE DISEÑO Y PRESENTACIÓN DE DISEÑO Y PRESENTACIÓN DE PROYECTO DE DESAGÜES CLOACALES”	116
FIGURA 41: NOTA: GRÁFICO DE TEMPERATURAS AMBIENTALES. EXTRAÍDO DE SNMA.	121
FIGURA 42: NOTA: REGISTRO DE TEMPERATURAS 2. ELABORACIÓN PROPIA.	123
FIGURA 43: NOTA: REGISTRO DE TEMPERATURAS. ELABORACIÓN PROPIA.....	123

FIGURA 44: NOTA: DISPOSITIVO DE ENTRADA CON PERFORACIONES QUE EVITAN LAS ZONAS MUERTAS. EXTRAÍDO DE ONU-HABITAT (2008).....	139
FIGURA 45: NOTA: ILUSTRACIÓN ENTRADA DE AGUA RESIDUAL Y ZONA BUFFER DEL HFSSH REQUERIDA. EXTRAÍDA DE ONU-HABITAT (2008)	139
FIGURA 46: NOTA: DISPOSITIVO DE REGULACIÓN DEL NIVEL DE AGUA RESIDUAL. EXTRAÍDO DE ONU- HABITAT, (2008).....	140
FIGURA 47: NOTA: ESQUEMA CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO DE LECHOS DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 DE SAN CARLOS DE BARILOCHE.....	141
FIGURA 48: NOTA: ESQUEMA CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO DE LECHOS DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 DE SAN CARLOS DE BARILOCHE.....	142
FIGURA 49: NOTA: COMPARACIÓN DE COSTOS SEGÚN OBJETIVOS DE TRATAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA.....	147
FIGURA 50: NOTA: BIODIGESTOR WATERPLAST TRATAMIENTO. EXTRAÍDO DE WATERPLAST	148
FIGURA 51: NOTA: BIODIGESTOR WATERPLAST TRATAMIENTO. EXTRAÍDO DE ROTOPLAST	149
FIGURA 52: NOTA: BIODIGESTOR ROTOPLAST. EXTRAÍDO DE ROTOPLAST	150
FIGURA 53: NOTA: COMPARACIÓN DE COSTOS DEL HFSSH CONTRA BIODIGESTORES COMERCIALES. ELABORACIÓN PROPIA.....	151
FIGURA 54: NOTA: FORMACIÓN DEL BIOFILM. EXTRAÍDO DE RESERCHGATE.....	169
FIGURA 55: NOTA: MICROORGANISMOS Y SU RESPIRACIÓN. EXTRAÍDO DE MADIGAN <i>ET AL</i> (2015).....	171
FIGURA 56: NOTA: PROCESO ANAERÓBICO. EXTRAÍDO DE AIDIS	173
FIGURA 57: NOTA: COMPARACIÓN DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA. EXTRAÍDO DE AIDIS.....	174
FIGURA 58: NOTA: DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA. EXTRAÍDO DE AIDIS	174
FIGURA 59: NOTA: DIAGRAMA DE FLUJO ANAERÓBICO. EXTRAÍDO DE BRES	177
FIGURA 60: NOTA: TIPOS DE FITOREMEDIACIÓN DE LAS PLANTAS. EXTRAÍDO DE BIBLOTECA DIGITAL UBA	178
FIGURA 61: NOTA: REUTILIZACIÓN DE LOS NUTRIENTES CAPTURADOS EN EL HUMEDAL EN FORMA DE COMPOST PARA GENERACIÓN DE PLANTAS ORNAMENTALES. EXTRAÍDO ALARCÓN HERRERA, <i>ET AL</i> ., 2018.....	185
FIGURA 62: NOTA: LANDFARMING EN TIERRA DEL FUEGO. EXTRAÍDO DE CURSO DE REMEDIACIÓN AMBIENTAL EN LA UTN.	185
FIGURA 63: NOTA: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN. EXTRAÍDO DE ELITECH.....	186
FIGURA 64: NOTA: PRESUPUESTO DE BEHA AMBIENTAL. EXTRAÍDO DE BEHA AMBIENTAL S.R.L..	203
FIGURA 65: NOTA: PLANO DEL HFSSH PARA INFILTRACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA	204
FIGURA 66: NOTA: PLANO DEL HFSSH PARA INFILTRACIÓN VISTA SUPERIOR. ELABORACIÓN PROPIA	204

FIGURA 67: NOTA: PLANO DEL HFSSH PARA REÚSO EN RIEGO. ELABORACIÓN PROPIA	205
FIGURA 68: NOTA: PLANO DEL HFSSH PARA REÚSO EN RIEGO. ELABORACIÓN PROPIA	205

4 ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE FUENTES CITADAS EN EL CUERPO DE LA TABLA.....	38
TABLA 2: LÍMITES DE VUELCO PARA MUESTRAS EXTRAÍDAS DE LOS AFOROS POST TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE LA RESOLUCIÓN 885/886 RÍO NEGRO	48
TABLA 3 PARÁMETROS DE CONTROL PARA MUESTRAS EXTRAÍDAS DE LOS AFOROS POST TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE LA RESOLUCIÓN 1423.....	49
TABLA 4: PARÁMETROS DE CONTROL DE NUTRIENTES EN TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES SEGÚN LA NORMATIVA EUROPEA. ELABORACIÓN A PARTIR DIRECTIVA 91/271/CEE.	50
TABLA 5: CLASIFICACIÓN DE HC SEGÚN DIFERENTES ATRIBUTOS. EXTRAÍDO DE STEFANKIS (2016).....	57
TABLA 6: EJEMPLOS DE DISTINTOS SUSTRATOS FRECUENTEMENTE UTILIZADOS EN HC. EXTRAÍDO DE ZIDAN, <i>ET AL.</i> , (2015).....	68
TABLA 7: VALORES DE POROSIDAD PARA CADA TIPO DE MATERIAL. ELABORADO A PARTIR DE INFORMACIÓN PUBLICADA POR LUREIRO C. YU <i>ET AL.</i> 1993.....	70
TABLA 8: EFICIENCIA DE UN HFSSH POST TRATAMIENTO DE CÁMARA SÉPTICA. EXTRAÍDO DE STEER <i>ET AL.</i> , (2002)	81
TABLA 9: PORCENTAJES DE REMOCIÓN ALCANZADOS PARA LOS DISTINTOS COMPONENTES EN ESTUDIO. EXTRAÍDO DE EL-KHATEEB & EL-BAHRAWY (2013).....	82
TABLA 10: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL SISTEMA 1. EXTRAÍDO DE MAEHLUM <i>ET AL.</i> , (1995)	83
TABLA 11: VALORES DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS DE ENTRADA Y SALIDA DE UN HFSSH. EXTRAÍDO DE HENNECK & AXLER	83
TABLA 12: EFICIENCIA DE LOS DISTINTOS HFSSH PARA DISTINTOS PARÁMETROS EVALUADOS. EXTRAÍDO DE ROZEMA <i>ET AL.</i> , (2016)	86
TABLA 13: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES QUE EXPLIEN LA REMOCIÓN DE DBO_5 EN LOS HSSFH. EXTRAÍDO DE AKRATOS, <i>ET AL.</i> , 2008.	98
TABLA 14: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LA REMOCIÓN DE P_T EN HFSSH. EXTRAÍDO DE AKRATOS, <i>ET AL.</i> , 2009	99
TABLA 15: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LA REMOCIÓN DE N_T . EXTRAÍDO DE AKRATOS, <i>ET AL.</i> , 2008.....	100
TABLA 16: ECUACIONES Y PARÁMETROS CALCULADOS PARA LOS DIFERENTES COMPONENTES PRINCIPALES COMPONENTES. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE LOS ARTÍCULOS PUBLICADOS POR AKRATOS.	104

TABLA 17: ESTUDIOS UTILIZADOS PARA LA VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES DE AKRATOS. ELABORADO A PARTIR DE (AKRATOS & TSIHRINTZIS, 2007).	105
TABLA 18: RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LAS FÓRMULAS PROPUESTAS POR AKRATOS SEGÚN LOS 5 CRITERIOS	111
TABLA 19: TABLA DE VALORES ASUMIDOS PARA EL CÁLCULO DE CAUDAL GENERADO. EXTRAÍDO DE TCHOBANOGLIOUS, <i>ET AL.</i> , (2016)	113
TABLA 20 TABLA DE VALORES DE CONTRIBUCIÓN DE LOS DISTINTOS COMPONENTES GENERADOS POR HABITANTE. EXTRAÍDO DE TCHOBANOGLIOUS, <i>ET AL.</i> , (2016)	113
TABLA 21: CRITERIOS ESTABLECIDOS DE DIMENSIONES Y CONDICIONES DE CONSTRUCCIÓN PARA LA CÁMARA SÉPTICA. ELABORACIÓN PROPIA	117
TABLA 22: EFICIENCIA DE LA CÁMARA SÉPTICA CON TRH 24-48 HS PARA LA REMOCIÓN DE DBO_5 . ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE AUTORES CITADOS EN EL CUERPO DE LA TABLA.	119
TABLA 23: EFICIENCIA DE LA CÁMARA SÉPTICA OBSERVADA PARA LA REMOCIÓN DE N_T . ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE VARIOS AUTORES.	120
TABLA 24: EFICIENCIA DE LA CÁMARA SÉPTICA OBSERVADA PARA LA REMOCIÓN DE P_T . ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE VARIOS AUTORES	120
TABLA 25: VALORES AFLUENTES AL HFSSH UTILIZADOS PARA FUTUROS CÁLCULOS. ELABORACIÓN PROPIA.....	120
TABLA 26: TEMPERATURAS PROPORCIONADAS POR EL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL ARGENTINO	121
TABLA 27: TABLA RESUMEN DEL TOTAL DE VALORES Y DÍAS REGISTRADOS POR EL EQUIPO. ELABORACIÓN PROPIA.....	122
TABLA 28: PARÁMETROS UTILIZADOS COMO GUÍA DE DISEÑO. EXTRAÍDO DE ZIDAN	124
TABLA 29: VALORES ESTABLECIDOS PARA EL DISEÑO EN LA SALIDA DEL HC PROPUESTO. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE REFERENCIAS EN NORMATIVA.....	125
TABLA 30: VALORES ESTABLECIDOS PARA EL DISEÑO PARÁMETROS DE REÚSO. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE REFERENCIAS EN NORMATIVA	125
TABLA 31: CARACTERÍSTICAS DEL SOPORTE FÍSICO. FUENTE EN TABLA	126
TABLA 32: RELACIÓN LARGO / ANCHO ESTABLECIDA. ELABORACIÓN A PARTIR DE TABLA 24.....	128
TABLA 33: TABLA DE CÁLCULOS DE LAS CONSTANTES UTILIZADAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL HFSSH. ELABORACIÓN PROPIA.....	129
TABLA 34: CÁLCULOS DE RENDIMIENTOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DEL HUMEDAL PARA EL CASO DE INFILTRACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA	129

TABLA 35: CÁLCULOS DEL ANCHO REQUERIDO PARA CADA TIPO DE AGENTE REQUERIDO PARA EL HUMEDAL EN EL CASO DE INFILTRACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.	130
TABLA 36: DIMENSIONES DEL HUMEDAL CONSTRUIDO DISEÑADO PARA 20 PERSONAS QUE TIENEN COMO DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LECHOS DE INFILTRACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA	130
TABLA 37: DIMENSIONES DEL HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL CASO DE INFILTRACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA	130
TABLA 38: TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA PARA EL CASO DE INFILTRACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA	131
TABLA 39: REMOCIÓN OBSERVADA EN EL HFSSH. ELABORACIÓN PROPIA	131
TABLA 40: CÁLCULO DE VALORES ESTIMADOS DE SALIDA A PARTIR DE LA ECUACIÓN 26. ELABORACIÓN PROPIA.....	132
TABLA 41: CÁLCULOS DE RENDIMIENTOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DEL HUMEDAL PARA EL CASO DE REÚSO DEL AGUA RESIDUAL. ELABORACIÓN PROPIA	133
TABLA 42: CÁLCULOS DEL ANCHO REQUERIDO PARA CADA TIPO DE AGENTE REQUERIDO PARA EL HUMEDAL EN EL CASO DE REÚSO DEL AGUA RESIDUAL. ELABORACIÓN PROPIA.	133
TABLA 43: DIMENSIONES DEL HUMEDAL CONSTRUIDO DISEÑADO PARA 20 PERSONAS QUE TIENEN COMO REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA	134
TABLA 44: DIMENSIONES DEL HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL CASO DE REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA	134
TABLA 45: TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA PARA EL CASO DE REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA	134
TABLA 46: REMOCIÓN OBSERVADA EN EL HFSSH. ELABORACIÓN PROPIA	134
TABLA 47: CÁLCULO DE VALORES ESTIMADOS DE SALIDA A PARTIR DE LA ECUACIÓN 40. ELABORACIÓN PROPIA.....	135
TABLA 48: RESUMEN DE DIMENSIONES DEL HFSSH SEGÚN LA DISPOSICIÓN FINAL.....	136
TABLA 49: VEGETACIÓN PROPUESTA PARA USO EN EL HUMEDAL. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA REFERENCIADA EN LA TABLA	137
TABLA 50: COMPONENTES DEL HUMEDAL, IMPERMEABILIZANTES. EXTRAÍDO DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, MÉXICO,	138
TABLA 51: INFORMACIÓN DE LAS DIMENSIONES TOTALES DEL HFSSH PARA EL CASO DE INFILTRACIÓN Y REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES SUMANDO EL ÁREA BUFFER. ELABORACIÓN PROPIA.....	140
TABLA 52 ANCHO TOTAL DEL LECHO DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 PARA 20 PERSONAS APORTANTES. ELABORACIÓN PROPIA	142

TABLA 53 LARGO TOTAL DEL LECHO DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 PARA 20 PERSONAS APORTANTES. ELABORACIÓN PROPIA	143
TABLA 54 ANCHO TOTAL DEL LECHO DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 PARA 20 PERSONAS APORTANTES. ELABORACIÓN PROPIA	143
TABLA 55 LARGO TOTAL DEL LECHO DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 PARA 20 PERSONAS APORTANTES. ELABORACIÓN PROPIA	144
TABLA 56: COSTOS DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA CONSTRUCCIÓN DE HFSSH NECESARIOS PARA CADA OBJETIVO DE TRATAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA	146
TABLA 57: COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL HFSSH DISEÑADO. ELABORACIÓN PROPIA	147
TABLA 58: COSTOS DE BIODIGESTORES CON VÍNCULOS ASOCIADOS. ELABORACIÓN PROPIA.....	150
TABLA 59: TIPOS DE RESPIRACIÓN REALIZADA POR LOS MICROORGANISMOS. EXTRAÍDO DE MADIGAN, <i>ET AL.</i> , (2015)	171
TABLA 60: CLASIFICACIÓN DE LOS ORGANISMOS SEGÚN LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA. EXTRAÍDO MADIGAN, <i>ET AL.</i> , 2015.....	172
TABLA 61: ETAPAS DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA POR ACCIÓN ANAERÓBICA. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE VARIOS AUTORES	175
TABLA 62: ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL.	179
TABLA 63: RESUMEN DE ACTIVIDADES DE RUTINA. ELABORACIÓN PROPIA	182
TABLA 64: CHECK LIST DE TAREAS. ELABORACIÓN PROPIA	183
TABLA 65: DETERMINACIONES NECESARIAS PARA REALIZAR EL CONTROL DE FUNCIONAMIENTO EN EL LABORATORIO.....	183
TABLA 66: PRIMER REGISTRO DE TEMPERATURAS CON DATALOGGER. ELABORACIÓN PROPIA.....	186
TABLA 67: SEGÚNDO REGISTRO DE TEMPERATURAS CON DATALOGGER. ELABORACIÓN PROPIA	192
TABLA 68: REGISTRO DE TEMPERATURAS AMBIENTALES SUMINISTRADO POR EL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL ARGENTINO. EXTRAÍDO DEL SMNA	202

5 INTRODUCCIÓN

El agua, al igual que otros recursos naturales, es un recurso finito en la tierra y se calcula que las masas de agua dulce corresponden con el 3% de la superficie terrestre ocupada. Y los ríos y lagos que no se distribuyen de manera uniforme ya que constituyen menos del 1% del volumen de agua dulce sobre la superficie terrestre (Gargallo Bellés, 2017). A pesar de esto, muchas de estas masas de agua están rodeadas de densos asentamientos de población y terrenos destinados a la agricultura.

Conforme a la UNESCO, el uso que se hace del agua va en aumento en relación con la cantidad disponible. Mientras que, la disposición final de las aguas residuales producidas por las diferentes actividades humanas representa un problema cuya magnitud está en constante incremento y que se ve agravado cuando se trata de grandes urbes.

El uso antropogénico del agua tiene un impacto significativo en su calidad, y esto se debe a diversos factores. Entre estos se incluye el aumento de compuestos químicos como nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados (como el arsénico, cromo y mercurio), así como compuestos orgánicos que provienen de diversas fuentes. Además de afectar la composición química del agua estos usos también pueden alterar sus propiedades físicas, como la temperatura, la turbidez y el color (Gargallo Bellés, 2017).

Particularmente, es preocupante el vertido de Aguas Residuales (AR) al ambiente, ya que esto puede tener un impacto negativo en el estado ecológico de los cuerpos de agua receptores. Esto, a su vez, reduce la calidad del agua para usos futuros y afecta a la comunidad biológica establecida en esos ecosistemas.

A pesar de los avances en la expansión de sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento, aún hay miles de millones de personas en todo el mundo que carecen de estos servicios. Sin embargo, seis de cada diez personas no tienen acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de manera segura lo que equivale a más de 4.000 millones de personas en todo el mundo. Esto significa que más del 80% del agua resultante de las actividades humanas se vierte sin ningún tipo de tratamiento (Aguado *et al.*, 2022).

Este problema conlleva graves consecuencias a nivel global porque se han registrado numerosos brotes de enfermedades y casos de intoxicación masiva debido a la falta de acceso a agua potable y saneamiento adecuado (Delgadillo *et al.*, 2010). Incluso en sistemas de pequeña escala, la mala concepción de los sistemas de saneamiento, como la construcción de pozos absorbentes a profundidades inadecuadas (a menudo en contacto con el nivel freático) y la ausencia de cámaras sépticas, contribuyen al deterioro de la calidad del agua (Cordoba *et al.*, 2015).

Encarar este problema plantea un dilema crucial ya que, por un lado, el agua residual se constituye en una fuente alternativa importante para el reúso en riego de los cultivos u otras aplicaciones. Por otro lado, su uso sin un adecuado tratamiento puede generar graves riesgos, especialmente, en la economía y la salud debido a la transmisión de enfermedades por el consumo de agua no potable. Los brotes de enfermedades gastrointestinales y otros problemas de salud pueden afectar la productividad laboral, los gastos de atención médica y disminuir la calidad de vida de las comunidades. Por lo tanto, el mantenimiento del buen estado ecológico de las masas de agua naturales se focaliza en dos puntos principales (Gargallo Bellés, 2017):

- El tratamiento de las aguas residuales previo a su vertido al medio natural;
- La recuperación de la calidad de las aguas naturales ya degradadas.

Es por ello que, el incremento en la generación de AR ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de depuración eficientes, autónomas y económicamente viables. Entre las soluciones más atractivas se encuentran los tratamientos que emulan los fenómenos que ocurren en la naturaleza (Arias & Brix, 2003).

Los Humedales Construidos (HC), están siendo cada vez más utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Esto se debe en parte a que los costos de construcción y mantenimiento de los HC suelen ser relativamente bajos. Además, esta tecnología permite reducir significativamente el consumo de energía en el proceso de tratamiento de AR (Aguado *et al.*, 2022).

Adicionalmente, los HC pueden retener y tratar volúmenes variables de aguas residuales, mitigando así las condiciones climáticas extremas (inundaciones y sequías) asociadas con el cambio climático (Kiiza, *et al.*, 2020). De la misma forma, estos sistemas posibilitan el reúso de las aguas residuales, promoviendo así el reciclaje, la reutilización y la recuperación de recursos hídricos. Adicionalmente, ayudan a aliviar el estrés hídrico y ofrecen beneficios sociales, económicos y ambientales (Aguado, *et al.*, 2022).

En comparación con los Humedales Construidos de Flujo Superficial (HFS), sus equivalentes subterráneos, conocidos como Humedales Construidos Subsuperficiales (HFSS), tienen la capacidad de admitir mayores cargas orgánicas. Además, ofrecen ventajas adicionales al reducir el riesgo de contacto con la población y prevenir la aparición de insectos no deseados.

Los HFSS están compuestos por un lecho de grava que actúa como soporte para el crecimiento de las plantas. Dependiendo de la configuración utilizada, las aguas residuales pueden fluir horizontal o verticalmente a través de este lecho que funciona como un biofiltro. Por este motivo, en el lecho de

HFSS ocurren una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, como sedimentación, filtración, precipitación, adsorción, absorción por las plantas y descomposición microbiana (Aguado *et al.*, 2022).

5.1 EUTROFIZACIÓN

La eutrofización es considerada uno de los problemas ambientales más significativos en los ecosistemas de agua dulce (Gargallo Bellés, 2017), ya que ejerce un impacto negativo considerable en los sistemas acuáticos. Este fenómeno afecta a los bienes y servicios proporcionados por los ecosistemas, la salud de las personas, el equilibrio ecológico y las actividades económicas (Chislock, *et al.*, 2020).

Se define como el proceso de enriquecimiento de cuerpos de agua con nutrientes, principalmente fósforo que provoca un rápido crecimiento de algas u otras formas de vida avanzadas (Belda Ibañez, 2015). Este crecimiento descontrolado de organismos perturba la homeostasis natural del cuerpo de agua de manera indeseada (Lemley & Adams, 2018) y puede dar lugar a eventos anóxicos (Belda Ibañez, 2015).

El proceso comienza cuando la demanda de oxígeno por parte de los descomponedores aumenta y eventualmente supera la cantidad disponible, en su mayoría durante las horas nocturnas. Como resultado, los descomponedores aeróbicos mueren y son reemplazados por formas anaeróbicas que generan grandes cantidades de biomasa y descomposición incompleta. Finalmente, el lago completo se vuelve anaeróbico lo que conduce a la muerte de la mayoría de los peces. Además, las algas se acumulan en la superficie del agua formando capas viscosas de color verde. Con el tiempo, el lago se llena de materia orgánica muerta y en descomposición, lo que da como resultado la formación de una turbera (Vesilind, *et al.*, 2004).

En general, es un proceso natural que puede tardar miles de años en desarrollarse, pero se ve acelerada debido a la contaminación de origen antrópico. Este proceso en particular se la conoce como eutrofización cultural o acelerada que causa los siguientes cambios en los cuerpos de agua (Mihelcic & Zimmerman, 2012):

- Disminución de la transparencia del agua;
- Aumento de la biomasa y modificación de la composición de la comunidad fitoplanctónica. Ésta pasa a estar dominada por algas cianofíceas, dado que su mayor capacidad de flotación les permite situarse en la zona más superficial de la columna de agua, donde la intensidad luminosa es óptima para su crecimiento;
- Proliferación de especies de algas tóxicas;

- Reducción de la vegetación sumergida debida al aumento de la turbidez.
- Cambio en la productividad, la biomasa y la composición de especies de la vegetación macrófita;
- Descenso de la diversidad de peces;
- Decaimiento del oxígeno disuelto en el agua;
- Problemas de sabor y olor del agua;
- Decrecimiento del valor de percepción estética de la masa de agua;
- Impactos económicos negativos, incluida la devaluación de la propiedad del bien y la reducción de los usos recreativos;



FIGURA 1: NOTA: EJEMPLO DE LAGO EUTROFIZADO. EXTRAÍDO DE
AGUAYMASCOSAS BLOGSPOT

6 OBJETIVOS

6.1 GENERAL

- ✓ Diseñar un Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Horizontal (HFSSH) como tratamiento de aguas residuales post pretratamiento utilizando un modelo de caja negra para un complejo turístico o plurifamiliar de hasta 20 personas.

6.1.1 ESPECÍFICOS

1. Identificar características favorables y desfavorables de los HFSSH como alternativa al tratamiento de aguas residuales;
2. Determinar la remoción de materia orgánica y nutrientes del agua residual dentro de un humedal construido con flujo subsuperficial mediante un modelo matemático de caja negra;
3. Establecer el diseño adecuado para la construcción de un HFSSH adecuado para S.C de Bariloche;
4. Estimar el costo económico necesario para la construcción de un HFSSH dimensionado en [3] para un complejo plurifamiliar o complejo turístico, y compararlo con otros costos de tratamiento terciario propuesto por la municipalidad de San Carlos de Bariloche.

7 HIPÓTESIS

Los Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal son una alternativa como tratamiento de aguas residuales provenientes de un complejo turístico para la reducción de nutrientes y materia orgánica. Esto permite que los parámetros requeridos para la reutilización sean compatibles con la normativa en sistemas de riego predial, a pesar de la estacionalidad de las temperaturas que se presenta en San Carlos de Bariloche.

8 JUSTIFICACIÓN

La tecnología de tratamiento de aguas residuales basada en lodos activados, en general, implica costos elevados y requiere un alto nivel de conocimiento para su adecuada operación (Wu *et al.*, 2015). Además, no siempre es viable en áreas sin sistemas de alcantarillado o en aquellos lugares donde las instalaciones de tratamiento centralizado se encuentran a una distancia considerable (Fu *et al.*, 2018). Además, la topografía del área, como en zonas montañosas (Jenssen *et al.*, 2010), puede añadir desafíos adicionales a la implementación de esta tecnología de tratamiento de grandes volúmenes. Por otro lado, en sistemas de menor escala, una gran cantidad de problemas surgen debido a que muchos propietarios no se encuentran en sitios con condiciones de entorno que permiten la correcta instalación o el correcto funcionamiento de un sistema convencional de cámara séptica – lecho de infiltración que cumpla con los límites de descarga (Kadlec, *et al.*, 2000; Jenssen, *et al.*, 2010). Los factores que pueden llegar a provocar el mal funcionamiento de estos sistemas son los siguientes:

- ❖ Diseño no apropiado o mal estimado;
- ❖ Mantenimiento nulo o no adecuado;
- ❖ Las condiciones del suelo no lo permiten (percolación, suelos anegados o arcillosos). (Kadlec, *et al.*, 2000).

Así, el lecho de infiltración termina teniendo un impacto negativo sobre el agua subsuperficial en la/s casa/s o establecimientos turísticos. Cabe destacar que, una parte de estos obtienen el agua para consumo desde la recarga que se produce en las aguas subsuperficiales (Steer, *et al.*, 2002).

No obstante, los HC se establecieron como una alternativa al sistema de tratamiento convencional para muchos de estos casos mencionados (Wu, *et al.*, 2014). Sumado a que, son una alternativa tecnológica eficiente y de bajo costo para el tratamiento, especialmente, para aquellas regiones en desarrollo (Wu, *et al.*, 2015). Sin embargo, el uso de este tipo de tratamiento es mucho menor que en aquellos países desarrollados de Europa o de los Estados Unidos (El-Khateeb & El Bahrawy, 2013). Por otro lado, los HC muestran un excelente rendimiento de tratamiento en condiciones frías y montañosas, pero ocupando un área mayor a las que ocuparía un tratamiento convencional compacto (Jenssen, *et al.*, 2010).

La implementación de los HFSS se presenta como una alternativa positiva para el caso de las ciudades turísticas, principalmente cuando se propone la utilización de especies nativas y/o ornamentales generando un realce estético y mayor atractivo para sostener el mantenimiento de la condición del humedal. Por otro lado, cabe destacar que, la imagen paisajística juega un rol

fundamental en la economía y el turismo (Vassallo, 2008) y esto se puede observar al ver que hay una gran cantidad de empresas que se dedican a el mejoramiento estético de parques y visión estética del entorno hotelero. Es así que, vinculando lo anteriormente detallado, la implementación de los HFSS evita problemas de malos olores e insectos en el tratamiento de AR (Ruiz, 2017; Alianza por el Agua, 2008) y se logra evitar una forma de desatender focos que deterioren la imagen natural de San Carlos de Bariloche.

Particularmente, en el entorno sur del Lago Nahuel Huapi, se manifiesta un crecimiento poblacional permanente, en consecuencia, se ven saturados los servicios de tratamiento de efluentes. En el ejido de San Carlos de Bariloche, debido a su configuración, la cobertura es aproximadamente el 60% de la población. A pesar de que el segundo módulo de tratamiento de efluentes permite duplicar el servicio actual, de 200.000 habitantes como máximo. El tratamiento no se efectuará hasta que las redes colectoras se extiendan a los barrios que no cuentan con servicio cloacal.

Asimismo, el plan director de cloacas próximo a presentarse, contempla la instalación de dos plantas futuras. Una que podrá hacer frente a la población instalada en Villa los Coihues, Villa Catedral, Kilómetros 10 al 15 y, la otra planta, para futuro crecimiento de la zona sur y este. Por lo que la única zona que dispondrá de tratamiento puntual será la población asentada a partir del Km 15 en adelante. No obstante, se requiere como mínimo un periodo de diseño (20 años), por consiguiente, los sistemas independientes de tratamiento y disposición de efluentes cloacales constituirán la única alternativa para la población que habita en esas zonas del ejido, principalmente para aquellas asentadas después del Km 15 ya que es zona altamente turística.

Actualmente la ordenanza N°2802-CM-16, a los sistemas independientes, se le exige un tratamiento por medio de Cámaras Séptica (CS) y una posterior disposición de los efluentes en lechos de infiltración (LI). Sin embargo, este tipo de sistema brinda un tratamiento inadecuado en áreas con suelos poco o altamente permeables, debido a que el agua residual percola rápidamente sin tratamiento a aguas subterráneas o en el caso contrario las aguas no logran penetrar en el suelo pudiendo escurrir a cuerpos de agua superficial. Además, puede verse afectada por niveles freáticos altos, provocando que no reciba el tratamiento adecuado o pueda aflorar en el terreno, siendo un posible foco de riesgo para enfermedades. Cabe destacar que, esta normativa no solicita parámetros en el caso de domicilios particulares, pero si demanda un control mínimo en casos turísticos.

9 MARCO TEÓRICO: AGUAS RESIDUALES, COMPONENTES Y TRATAMIENTOS

Las AR son aquellas que tiene composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso de aguas, que hayan sufrido degradación en su calidad original (Bermeo Garay, 2016; Tchobanoglous, *et al.*, 2016). En particular las Aguas Residuales Urbanas (ARU) son las provenientes de la mezcla de aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial.

Cada tipo de ARU está definida de la siguiente manera:

- ❖ **Aguas domésticas:** procedentes de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y símiles. Principalmente, generadas por el metabolismo humano y actividades domésticas (Fernández-Alba, *et al.*, 2006). Mayormente, se compone por desechos del cuerpo humano (heces y orina) junto con el agua utilizada para la descarga de inodoros, y el agua residual resultante del aseo personal, lavandería, preparación de alimentos y limpieza de utensilios de cocina (Mara, 2004).
- ❖ **Aguas industriales:** todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial. En general estas aguas residuales se las debe acondicionar previamente a su volcado en la red cloacal debido a sus altos niveles en su concentración de componentes. (Fernández-Alba, *et al.*, 2006)

Por otro lado, es importante mencionar que las aguas residuales domiciliarias pueden clasificarse en distintas categorías, como señala Allen, (2015):

- **Aguas Negras:** se refiere a las aguas que transportan heces y orina, provenientes del inodoro. Estas aguas son consideradas altamente contaminantes debido a la presencia de materia orgánica y microorganismos patógenos.
- **Aguas Grises:** se trata de las aguas jabonosas y que pueden contener grasas, así como aquellas que provienen de la ducha, el lavamanos, el lavaplatos, el lavadero y el lavarropa.

Como ya se mencionó antes, las aguas residuales sufrieron una degradación, por lo tanto, es necesario que pasen por un tratamiento con el objetivo de remover contaminantes para mejorar su calidad y hacerla apta para su disposición final. Básicamente, una vez que las aguas residuales hayan sido tratadas y que cumplan con los estándares de calidad (según la normatividad vigente), éstas puedan ser infiltradas o ser reutilizadas en diversas actividades productivas, por ejemplo, la reutilización en riego (Angeles Hernández, *et al.*, 2018).



FIGURA 2: NOTA: EJEMPLO DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE FUNDACIÓN ECOMAR

9.1 AGENTES DEGRADADORES DEL AGUA:

Las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja, sin embargo, no es práctico o posible obtener un análisis completo de ellas (Ramalho, 2003). Por esta razón, se evalúan una serie de métodos que dan una idea de la concentración de sus constituyentes más comunes a la hora de evaluarlas (Ramalho, 2003).

Los diferentes compuestos se los suele agrupar como físicos, químicos o biológicos y se los detalla en las siguientes secciones. (Tchobanoglous, *et al.*, 2016; Von Sperling, s.f.)



FIGURA 3: NOTA: ANÁLISIS DE LAS AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE EL CONFIDENCIAL

9.1.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

9.1.1.1 MATERIA ORGÁNICA

Por lo general, se mide en términos de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Si esta es descargada al ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de oxígeno desarrollando condiciones sépticas.

9.1.1.1.1 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

La DBO es uno de los parámetros más utilizados en la caracterización de los contaminantes orgánicos (Menendez Gutierrez & Pérez Olmo, 2007). Se define como la cantidad de oxígeno requerido en el proceso de oxidación bioquímica para estabilizar la materia orgánica en un lapso de tiempo, a la temperatura de 20°C (Tchobanoglous, *et al.*, 2016; Mara, 2004).

La oxidación bioquímica es un proceso lento, y en general muy largo. Existen dos DBO utilizadas, la DBO₅ y la DBO_{última} o DBO₂₀ donde la oxidación de la materia orgánica es del 95 al 99% de la materia carbonosa. Mientras que, en los 5 días de ensayo, DBO₅, arroja que se oxidó entre el 60 al 70% de la materia orgánica. (Tchobanoglous, *et al.*, 2016)

9.1.1.1.2 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

El ensayo de DQO también se emplea para medir el contenido de materia orgánica en muestras de agua. Este método utiliza un agente químico fuertemente oxidante, como el dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇)¹, en un medio ácido para determinar el equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede ser oxidada (Tchobanoglous, *et al.*, 2016; Von Sperling, s.f.).

La DQO suele ser mayor que la DBO₅ debido a que los valores de DQO obtenidos reflejan compuestos biológicamente resistentes a la oxidación (Mara, 2004).

9.1.1.2 pH

La concentración de ion hidrógeno, es un parámetro fundamental de calidad, entre otras cosas, tanto en aguas naturales como en aguas residuales. Este parámetro establece el intervalo de concentraciones adecuado para la proliferación y desarrollo biológico, el cual es estrecho y crítico (Tchobanoglous, *et al.*, 2016).

En general, se ha observado que la oxidación biológica tiende a reducir el valor de pH, llevándolo a niveles más ácidos (Von Sperling, s.f.). Este fenómeno se debe a la producción de

¹ Métodos estandarizados 5220 B.

ácidos orgánicos durante la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales (Von Sperling, s.f.).

Mantener un equilibrio en el pH durante el tratamiento de aguas residuales es esencial para garantizar un funcionamiento adecuado de los procesos biológicos y evitar la inhibición de los microorganismos responsables de la degradación de contaminantes.

9.1.1.3 NUTRIENTES

El control de cargas contaminantes ha sido aplicado principalmente a la materia orgánica y sólidos, pero en menor medida a la eliminación de nutrientes (González & César Saldarriaga, 2008). Es relevante mencionar que, cuando nos referimos a los nutrientes en las aguas residuales urbanas se consideran los dos nutrientes principales, nitrógeno y fósforo (Bermeo Garay, 2016). La importancia radica en que cuando se vuelcan en el ambiente acuático, pueden acelerar la eutrofización. De igual forma, cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas, pueden derivar en una contaminación en el agua subterránea (Delgadillo, *et al.*, 2010).

9.1.1.3.1 NITRÓGENO

Uno de los elementos esenciales para el crecimiento de microorganismos y plantas es el nitrógeno, ya que se requiere para la síntesis de proteínas. Por lo tanto, es de vital importancia comprender en qué forma y cantidad está presente en las aguas residuales y cómo se puede tratar mediante procesos biológicos (Tchobanoglous, *et al.*, 2016).

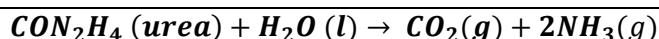
La química del nitrógeno es compleja debido a las múltiples etapas de oxidación que este elemento puede experimentar, y además, los organismos pueden influir en su estado de oxidación. Asimismo, la etapa de oxidación depende de si las condiciones son aeróbicas o anaeróbicas. El contenido Total de Nitrógeno (N_T) comprende:

- ❖ Nitrógeno orgánico (nitrógeno asociado a moléculas orgánicas);
- ❖ Amoníaco (NH_3)
- ❖ Amonio (NH_4^+)
- ❖ Nitrito (NO_2^-)
- ❖ Nitrato (NO_3^-)

Los desechos humanos pueden considerarse como una fuente de nitrógeno. En aguas residuales frescas, el nitrógeno, puede encontrarse como materia proteínica y urea (nitrógeno

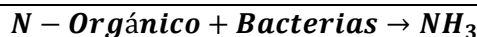
orgánico), aunque su paso a N-amoniacal se produce rápidamente debido a que las bacterias descomponen el nitrógeno orgánico. La urea contenida en la orina, se descompone en N-Amoniocal por la siguiente ecuación:

ECUACIÓN 1



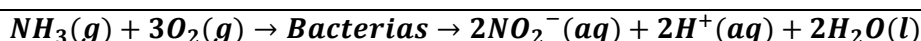
El N-Orgánico puede ser transformado a N-Amoniocal por la siguiente ecuación:

ECUACIÓN 2: ESTA REACCIÓN QUÍMICA REPRESENTA EL PROCESO MEDIANTE EL CUAL EL NITRÓGENO ORGÁNICO SE CONVIERTE EN NITRÓGENO AMONICAL, ES DECIR, EN FORMA DE AMONÍACO (NH_3).



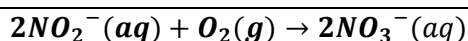
En un medio aerobio, se produce la **nitrificación**, donde por acción de las bacterias puede oxidar el nitrógeno amoniacal (NH_4^+) a nitratos (NO_3^-) siendo los nitritos (NO_2^-) un producto intermedio. La presencia de iones nitrito en un agua destinada al consumo humano puede ser considerada también como indicativo de contaminación fecal. La primera etapa de la oxidación se describe a continuación:

ECUACIÓN 3: EL AMONÍACO (NH_3) SE OXIDA Y ES TRANSFORMADO POR BACTERIAS EN NITRITO (NO_2^-) Y AGUA (H_2O), FENÓMENO CONOCIDO COMO NITRITACIÓN.



Por acción de la Nitrobacter, este proceso de nitrificación continua de la siguiente forma:

ECUACIÓN 4: LAS BACTERIAS NITROBACTER OXIDAN LOS IONES NITRITO (NO_2^-) EN PRESENCIA DE OXÍGENO MOLECULAR (O_2), TRANSFORMÁNDOLOS EN IONES NITRATO (NO_3^-). FENÓMENO CONOCIDO COMO NITRATAción.



En general el requerimiento en oxígeno del proceso de nitrificación ha sido calculado en 4,57mg de O_2 por mg de NH_4^+ oxidado y transformado en NO_x .

La siguiente etapa de la remoción de nitrógeno de las AR, es la **desnitrificación**. Esta etapa involucra la acción catalizadora de la enzima **nitrato-reductasa**, la cual se encuentra asociada a la membrana que contiene molibdeno. Sin embargo, la presencia de oxígeno inhibe la síntesis de esta enzima. De manera coordinada, todas las enzimas posteriores en la ruta de la desnitrificación también son inhibidas por el oxígeno. Posteriormente, interviene la **nitrito-reductasa**, la cual reduce los nitritos a óxido nítrico (NO) (Madigan, *et al.*, 2015).

El óxido nítrico (NO), junto con otros gases como el óxido nitroso (N_2O) y el nitrógeno molecular (N_2) se producen como productos intermedios y finales en el proceso de desnitrificación. Estos gases, se pueden dispersar en el ambiente, y su producción biológica se llama desnitrificación. Para la agricultura, la desnitrificación es un proceso perjudicial, porque elimina del suelo el nitrato, que a menudo se añade en los fertilizantes. Sin embargo, para un proceso como el tratamiento de aguas residuales, la desnitrificación es beneficiosa porque elimina de los vertidos de aguas residuales el nitrógeno, que es uno de los grandes estimuladores del crecimiento de las algas en ríos y lagos.

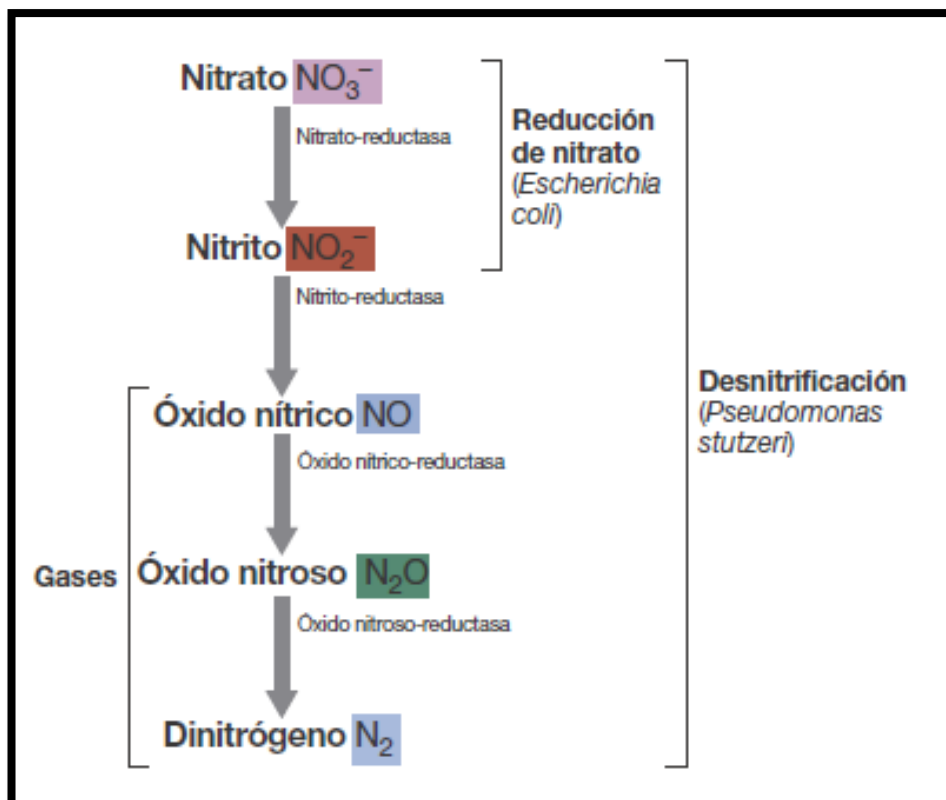
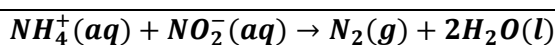


FIGURA 4: NOTA: PROCESO DE DESNITRIFICACIÓN. EXTRAÍDO DE MADIGAN, ET AL. (2015)

Por otro lado, en condiciones anóxicas, el amoníaco también puede ser oxidado por un grupo altamente especializado de bacterias en un proceso conocido como ANAMMOX (Oxidación Anaerobia de Amonio). Este proceso es catalizado por un conjunto inusual de bacterias anaerobias estrictas. La reacción ANAMMOX implica la oxidación del amoníaco utilizando el nitrito como aceptor de electrones para convertirlo directamente en nitrógeno, liberando así energía en el proceso, lo que lo hace termodinámicamente favorable (Madigan, *et al.*, 2015):

ECUACIÓN 5



Este proceso es autotrófico y es impulsado por un grupo particular de bacterias conocidas como ANAMMOX (Van der Star, *et al.*, 2009). Sus ventajas sobre los métodos convencionales de nitrificación y desnitrificación incluyen una menor demanda de oxígeno y la ausencia de la necesidad de fuentes externas de carbono. En otras palabras, pueden llevar a cabo la desnitrificación sin la necesidad de degradar materia orgánica. Sin embargo, un desafío crítico que limita su aplicación son los largos tiempos de retención hidráulica (Di Domenico, *et al.*, 2015).

Las Bacterias Oxidantes de Amonio (BOA) desempeñan un papel crucial al transformar el amonio en nitrito, lo cual asegura un suministro constante de nitrito para las bacterias ANAMMOX. Al mismo tiempo, las BOA consumen el oxígeno disuelto y crean un entorno anaeróbico propicio para las bacterias ANAMMOX. Igualmente, se ha constatado que las Arqueas Oxidantes de Amonio (AOA) también coexisten con este tipo de bacterias. En situaciones con bajos niveles de oxígeno, las AOA pueden suministrar nitrito a las bacterias ANAMMOX. Las arqueas oxidantes de amonio se destacan por su alta afinidad hacia este compuesto, lo que les permite lograr tasas de oxidación de amonio aún más elevadas (Di Domenico, *et al.*, 2015).

Una de las ventajas medioambientales sobresalientes del proceso ANAMMOX radica en su capacidad para evitar la emisión de óxido nitroso (N₂O) a la atmósfera, en contraposición a otros métodos de eliminación de nitrógeno que pueden generar este poderoso gas de efecto invernadero; lo que lo convierte en una opción sostenible y eficiente (Van der Star, *et al.*, 2009).

A continuación, se presenta un resumen de todos los procesos mencionados:

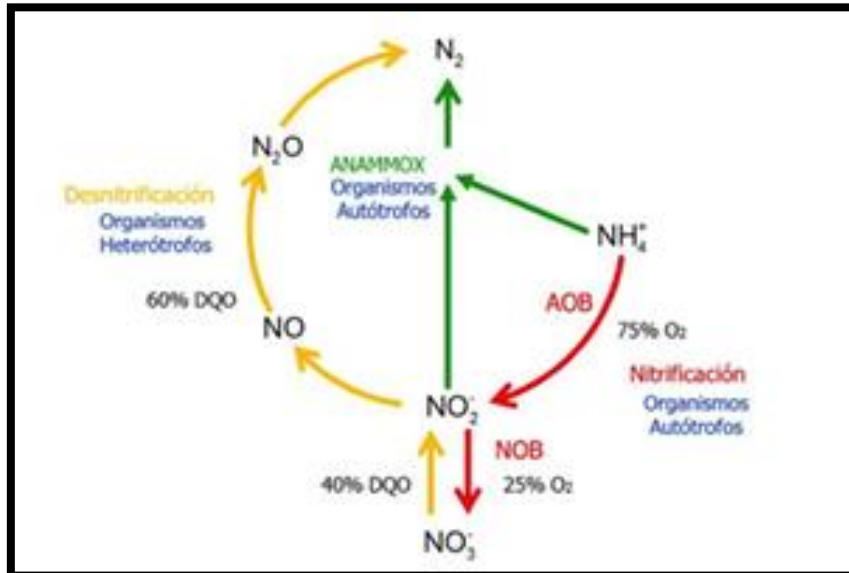


FIGURA 5: NOTA: CICLO REMOCIÓN DE NITRÓGENO EN AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE MADIGAN *ET AL.*, (2015)

9.1.1.3.2 FÓSFORO

El fósforo es un compuesto esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. (Tchobanoglous, *et al.*, 2016). Además, este puede precipitar en los sedimentos, lo que provoca que pueda persistir en los lagos por tiempos considerables, manteniendo latente el riesgo de que se desarrolle proliferación excesiva de algas (Chandra, *et al.*, 2018).

Las formas más frecuentes en las que encontramos el fósforo son (Tchobanoglous, *et al.*, 2016):

- ❖ Ortofosfatos: PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4 ;
- ❖ Polifosfatos: moléculas que tienen 2 o más átomos de fósforo;
- ❖ Fosfato orgánico.

La sumatoria de estos compuestos representa la forma en la que se mide en los laboratorios conocida como Fósforo Total (P_T). Las aguas residuales domésticas en general presentaban valores de fósforo de 2 a $5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y las formas orgánicas variaban entre 0,5 a $1,0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Sin embargo, muchos compuestos usados hoy en día para la limpieza, y el uso intensivo de detergentes, adicionan grandes cantidades de fósforo, lo que denota en su incremento en las aguas residuales (Menendez Gutierrez & Pérez Olmo, 2007).

9.1.1.4 OXÍGENO DISUELTO (OD)

En un cuerpo de agua se produce y consume oxígeno de manera simultánea. La producción de oxígeno está relacionada con la fotosíntesis, mientras que el consumo dependerá de la respiración, descomposición de sustancias orgánicas y otras reacciones químicas. Además, el intercambio de oxígeno entre agua y la atmósfera pueden involucrar difusión, advección, convección, entre otros. Estos procesos contribuyen a la dinámica del oxígeno en el cuerpo de agua y afectan su concentración total.

Si el consumo de oxígeno es mayor que la producción y captación en el sistema, el nivel de oxígeno disuelto disminuirá, pudiendo alcanzar niveles por debajo de lo necesario para mantener la vida de muchos organismos acuáticos. Esto puede resultar en condiciones de hipoxia, donde la cantidad de oxígeno disuelto es insuficiente para sostener una biodiversidad saludable.

Asimismo, es importante considerar que la temperatura del agua también influye en la concentración de oxígeno disuelto. A temperaturas más cálidas, el agua tiene una capacidad menor para disolver oxígeno. Por lo tanto, una descarga de agua caliente en el cuerpo de agua puede llevar a una disminución del OD a niveles insuficientes para la vida de ciertas formas de vida acuática.

El oxígeno disuelto se expresa comúnmente en miligramos por litro ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y su medición es esencial para evaluar la calidad del agua y asegurar la salud de los ecosistemas acuáticos. En el caso de las AR la presencia de oxígeno disuelto en las aguas crudas es un indicador de frescura, y su presencia en un efluente de una planta de tratamiento nos puede servir como indicador durante el proceso o evidenciar que se ha logrado el proceso de oxidación con las etapas del tratamiento.

9.1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

9.1.2.1 TEMPERATURA

La temperatura del agua es un parámetro crítico debido a su influencia tanto en el desarrollo de la vida acuática como en la solubilidad de los gases y en la velocidad de las reacciones químicas, especialmente en la descomposición de la materia orgánica (Tchobanoglous, *et al.*, 2016). Por lo general, la temperatura de las aguas **residuales tiende a ser unos grados más alta que la temperatura del aire**, excepto durante los meses de verano, debido a su alto calor específico (Gray, 2004).

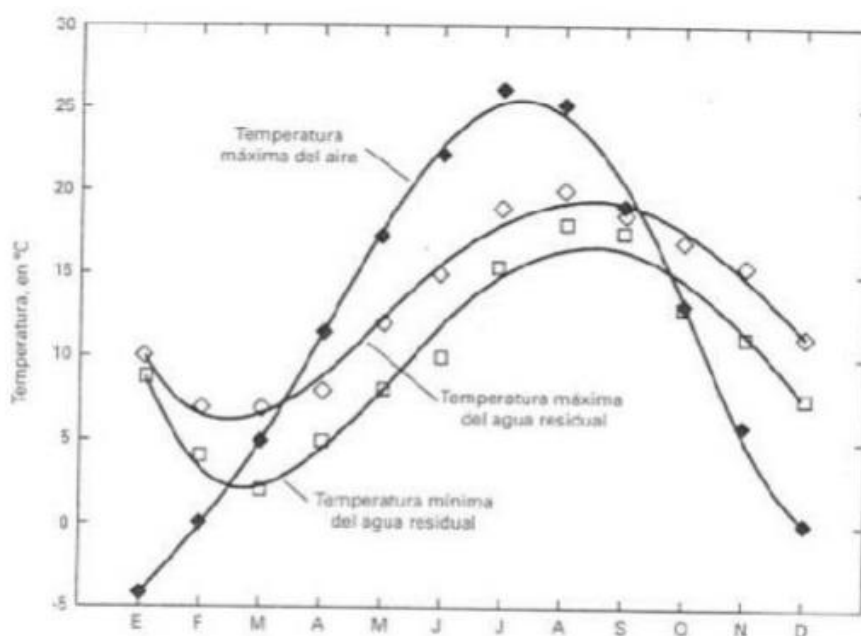


FIGURA 6: NOTA: TEMPERATURAS DE LAS AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE TCHOBANOGLIOUS ET AL. (2016)

9.1.2.2 SÓLIDOS

En general, la concentración es bastante superior en las aguas residuales que en los cursos naturales. Es por esto que, la característica física más relevante del agua residual es el contenido Total de Sólidos (S_T), un término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta (Tchobanoglous, *et al.*, 2016). Es considerada la porción que permanece a un secado a 103°C-105°C, siendo el residuo resultante al evaporar la porción líquida. Todos ellos pueden ser de naturaleza inorgánica u orgánica (Menendez Gutierrez & Pérez Olmo, 2007).

Todos los sólidos pueden ser clasificados según:

- **Clasificación por tamaño:** se clasifican en sólidos suspendidos y de los sólidos disueltos, y se requiere filtrar la muestra para la determinación
- **Sólidos suspendidos (TSS):** partículas con tamaño mayores a las dimensiones del filtro que no logran pasar, considerado como sólidos suspendidos (sólidos filtrables).
 - **Sólidos disueltos (TDS):** por convención se dice que las partículas pequeñas pueden pasar un tamaño específico de papel filtro (o sólidos no filtrables) y refieren a cualquier mineral, sal, metal, en forma de moléculas, átomos, cationes o aniones disuelto en el agua. Los sólidos totales disueltos comprenden las sales inorgánicas (principalmente calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en el agua.

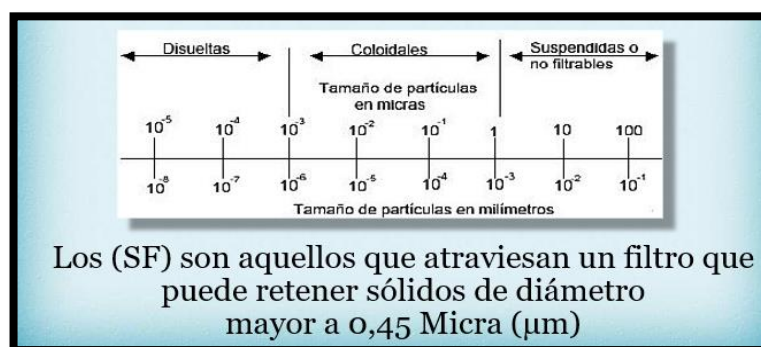


FIGURA 7: NOTA: CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS. EXTRAÍDO DE LAS CLASES DE INGENIERÍA AMBIENTAL UNRN/ AGUAS RESIDUALES

- **Clasificación por sedimentación**
- **Sedimentables (SS):** son considerados sedimentables a aquellos sólidos que se depositan por la fuerza de gravedad en un cono Imhoff. El volumen de sólidos acumulados en el fondo del recipiente es expresado en $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$.
 - **No sedimentables,** es la fracción que no sedimentó en el ensayo del cono Imhoff.

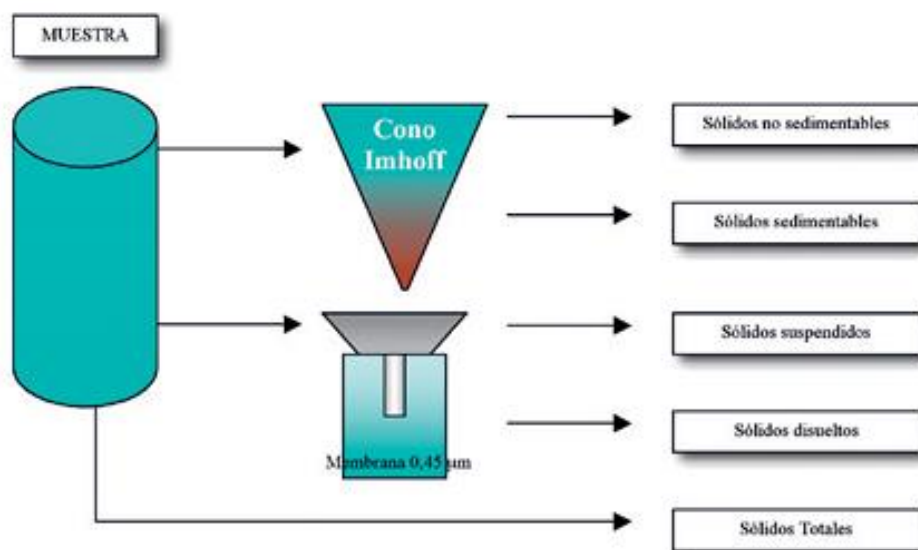


FIGURA 8: NOTA: CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS DE LAS AR. EXTRAÍDO DE [BIBLIOTECAGBS](#)

➤ **Clasificación química:**

- **Volátiles (SV):** Los sólidos volátiles son aquella fracción que se volatiliza entre 500 y 600°C. La concentración de sólidos volátiles se suele considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica, o en ciertos casos, de las concentraciones de sólidos biológicos tales como bacterias o protozoos. Los sólidos volátiles pueden determinarse sobre la muestra original (sólidos volátiles totales), sobre la fracción suspendida (sólidos suspendidos volátiles) o sobre la fracción filtrada (sólidos disueltos volátiles).
- **Fijos (SF):** Este último se denomina sólidos fijos o cenizas y constituyen los residuos que permanecen como cenizas después de ser calcinados a 500-600°C. Es una medida del contenido inorgánico de las aguas residuales.

9.1.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

Las aguas residuales, dependiendo de su composición y concentración, pueden llevar en su seno gran cantidad de organismos. Estos microorganismos son capaces de transformar, descomponer o fermentar la materia orgánica y servir como indicadores (Arciniega Tenemaza & Salazar Chacha, 2021). Algunos de los principales grupos de organismos que se encuentran en las AR son (Espigares García & Pérez López, s.f.):

- ❖ **Bacterias:** pueden ser de origen fecal o bacterias implicadas en procesos de biodegradación, tanto en la naturaleza como en las plantas de tratamiento. Las bacterias coliformes se utilizan como indicador de polución por vertidos de origen humano, ya que cada persona elimina diariamente de 100.000 a 400.000 millones de coliformes a través de las heces, además de otras clases de bacterias.
- ❖ **Virus:** proceden de la excreción, por parte de individuos infectados, ya sean humanos o animales.
- ❖ **Algas:** su crecimiento está favorecido por la presencia en las aguas residuales de distintas formas de fósforo y nitrógeno, así como de carbono y vestigios de elementos tales como hierro y cobalto.
- ❖ **Protozoos:** los que se encuentran más frecuentemente en las aguas residuales son amebas, flagelados y los ciliados libres y fijos. Estos organismos juegan un papel muy importante en los procesos de tratamiento biológico, especialmente, en filtros percoladores y fangos activados. Pueden eliminar bacterias suspendidas en el agua, ya que éstos no sedimentan, evitando la producción de efluentes con turbidez.
- ❖ **Hongos:** la mayoría son aerobios estrictos, pueden tolerar valores de pH relativamente bajos, y tienen baja demanda de nitrógeno. Esto les hace desempeñar una función importante en el tratamiento de aguas residuales industriales.

9.2 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Para adecuar las aguas residuales al uso al que se desee destinarlas, se llevan a cabo diversos procesos de tratamiento. Estos procesos se dividen en etapas que incluyen el pretratamiento, el tratamiento primario, el tratamiento secundario y el tratamiento terciario y/o avanzado. En líneas generales, el tratamiento primario se centra en la aplicación de procesos físicos unitarios, mientras que el tratamiento secundario se basa en procesos químicos y biológicos. El tratamiento terciario implica la combinación de los tres tipos de procesos (Tchobanoglous *et al.*, 2016).

Cada etapa del tratamiento tiene un propósito específico y contribuye de manera significativa a mejorar la calidad del agua residual, permitiendo su posterior reutilización o su descarga segura en el ambiente.

9.2.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR/PRETRATAMIENTO

Los tratamientos preliminares se utilizan principalmente para eliminar los componentes presentes en el agua residual que podrían afectar tanto el funcionamiento de la planta como el

proceso de tratamiento de aguas residuales en general. Por ejemplo, se lleva a cabo la eliminación de elementos como trapos, arena y otros materiales gruesos suspendidos, como latas, botellas, plásticos, ladrillos y piedras, los cuales podrían causar daños en los equipos o bloquear las tuberías y otros dispositivos.

Además, uno de los objetivos específicos de los tratamientos preliminares es eliminar aceites y grasas de diversas naturalezas. Esto es crucial, ya que la presencia de aceites y grasas no tratadas ralentizaría el proceso biológico y reduciría el rendimiento del tratamiento en su conjunto.

9.2.2 TRATAMIENTO PRIMARIO

El tratamiento primario en el proceso de tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo principal reducir los sólidos en suspensión presentes en el agua residual. Estos sólidos, que incluyen materia orgánica, son responsables en gran medida de DBO en el agua. El tratamiento primario logra esta reducción principalmente a través del proceso de sedimentación, en el cual los sólidos más pesados se depositan en el fondo debido a la acción de la gravedad, formando lodos que luego se pueden retirar.

En instalaciones de mayor envergadura, es común el uso de clarificadores primarios para tratar grandes caudales de agua residual. Por otro lado, en aplicaciones más pequeñas, las cámaras sépticas son una opción habitual para llevar a cabo el tratamiento primario.

Es fundamental destacar que el tratamiento primario prepara el agua residual para el tratamiento secundario al eliminar una parte significativa de los sólidos en suspensión y reducir la carga de DBO.

9.2.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO

Los tratamientos secundarios son procesos biológicos que se basan en la oxidación biológica de la materia orgánica fácilmente biodegradable para purificar el agua residual. En este proceso, los microorganismos adecuados al entorno consumen la materia orgánica, transformándola en diversos gases y tejido celular.

Existen dos tipos principales de procesos biológicos: aerobios y anaerobios. En la práctica, ambas técnicas pueden utilizarse de manera complementaria, según las necesidades específicas de tratamiento.

En términos generales, se considera que los procesos biológicos con una eficiencia de remoción de DBO₅ soluble mayor al 80% cumplen con los criterios para ser clasificados como tratamiento secundario (Bermeo Garay, 2016; Tchobanoglous *et al.*, 2016).

9.2.4 TRATAMIENTO TERCIARIO

El tratamiento terciario se emplea principalmente para eliminar componentes específicos del agua residual o para lograr un nivel de tratamiento más avanzado que el obtenido mediante los tratamientos primario y secundario. La elección del tratamiento terciario dependerá de qué componentes se deseen eliminar o refinar del agua residual, y esto puede variar según las condiciones del cuerpo receptor o las necesidades de reutilización.

Los objetivos del tratamiento terciario incluyen:

- ❖ **Reducción de microorganismos fecales y patógenos:** su finalidad es eliminar o reducir aún más la presencia de microorganismos causantes de enfermedades en el agua residual;
- ❖ **Disminución de la demanda de oxígeno:** se elimina la materia orgánica nitrogenada, lo que ayuda a reducir la demanda de oxígeno en el agua;
- ❖ **Precipitación de fósforo mediante insolubilización:** busca eliminar el fósforo del agua residual al convertirlo en una forma insoluble que puede separarse del líquido tratado;
- ❖ **Eliminación de materia orgánica refractaria:** se aplica un proceso de adsorción utilizando carbón activo para eliminar o reducir la presencia de materia orgánica refractaria, que es más difícil de tratar mediante los procesos primario y secundario;
- ❖ **Tratamiento de compuestos tóxicos:** se centra en eliminar o reducir la presencia de sustancias tóxicas y contaminantes en el agua residual;

9.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

A continuación, se presenta una caracterización del agua residual obtenida de diversas fuentes. Estos valores serán utilizados posteriormente en el diseño del HFSSH:

TABLA 1: CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE FUENTES CITADAS EN EL CUERPO DE LA TABLA

PARÁMETRO	UNIDAD	CONTAMINANTE			REFERENCIA
		BAJO	MEDIO	ALTO	
SÓLIDOS TOTALES	mg*L ⁻¹	537	806	1612	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)
	mg*L ⁻¹	Intervalo 700-1350/ Valor típico 1100			(Von Sperling, s.f.)
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	mg*L ⁻¹	130	195	389	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)
	mg*L ⁻¹	Intervalo 200-450/ Valor típico 350			(Von Sperling, s.f.)
	mg*L ⁻¹	244			(Zanuttín , 2018)
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	mg*L ⁻¹	8	12	23	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)
	mg*L ⁻¹	Intervalo 10-20/ típico 15			(Von Sperling, s.f.)
DBO ₅	mg*L ⁻¹	133	200	400	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)
	mg*L ⁻¹	Intervalo: 250-400 Valor típico 300			(Von Sperling, s.f.)
	mg*L ⁻¹	Intervalo: 180-290/Valor típico: 223,7			(Zanuttín , 2018)
	mg*L ⁻¹	200	350	500	(Mara, 2004)
	mg*L ⁻¹	244			(Municipalidad de San Martin de los Andes- Alvarez Mario, 2018)
DQO	mg*L ⁻¹	339	508	1016	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)
	mg*L ⁻¹	Intervalo 450-800/ Valor típico 600			(Von Sperling, s.f.)
	mg*L ⁻¹	Intervalo 420-790/ valor típico 520,4			(Zanuttín , 2018)
NT	mg*L ⁻¹	23	35	69	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)
	mg*L ⁻¹	Intervalo 35-60 /Valor típico 45			(Von Sperling, s.f.)
	mg*L ⁻¹	Intervalo 33-56 / Valor típico 42,9			(Zanuttín , 2018)
	mg*L ⁻¹	50,81			(Municipalidad de San Martin de los Andes- Alvarez Mario, 2018)
PT	mg*L ⁻¹	3,7	5,6	11	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)
	mg*L ⁻¹	Intervalo 4-15/Valor típico 7			(Von Sperling, s.f.)
	mg*L ⁻¹	Intervalo 6.1-9.1 / Valor típico 7,4			(Zanuttín , 2018)
	mg*L ⁻¹	8,13			(Municipalidad de San Martin de los Andes- Alvarez Mario, 2018)
GRASAS Y ACEITES	mg*L ⁻¹	51	76	153	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)
	mg*L ⁻¹	Intervalo: 46-122 /valor típico 78,1			(Zanuttín , 2018)

9.4 TRATAMIENTO CONVENCIONAL

Los tratamientos convencionales de aguas residuales hacen referencia a aquellos que son aceptados debido a su amplia aprobación social, estableciéndose como prácticas habituales. En contraposición, lo alternativo se refiere a enfoques que se oponen a lo convencional, pero que son capaces de lograr resultados similares o equivalentes. Bajo estas premisas, las tecnologías convencionales son aquellas que la mayoría de la población utiliza, mientras que las alternativas surgen en respuesta a las insuficiencias de las tecnologías convencionales, algunas de las cuales pueden eventualmente desplazar a las ya establecidas en un proceso dialéctico de cambio constante.

El sistema de tratamiento para aguas residuales, conocido como cámara séptica y lecho de infiltración, es un sistema individual, *in situ* y a escala reducida, que se utiliza convencionalmente para el tratamiento de aguas residuales producidas por familias o viviendas colectivas que habitan en zonas residenciales poco pobladas. Estas áreas suelen estar dispersas y carecen de colectores debido a su ubicación topográfica. Además, en ciudades donde no existe acceso a otros sistemas colectivos de tratamiento, estos sistemas individuales también se emplean habitualmente. Por su parte, es utilizado para el tratamiento de efluentes provenientes de instituciones como escuelas y hospitales en pequeñas comunidades. (Rosales Escalante, 2005)

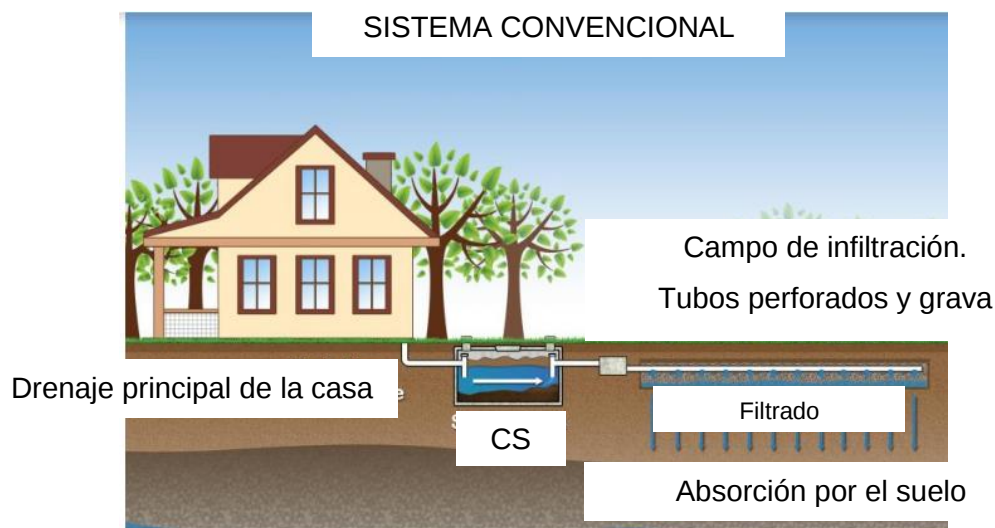


FIGURA 9: NOTA: SISTEMA DE CÁMARA SÉPTICA Y LECHO DE INFILTRACIÓN. EXTRAÍDO DE LA WEB DEL GOBIERNO DE LA CIUDAD DE [EASTHAM MASSACHUSETTES](#)

9.4.1 CÁMARA SÉPTICA

La cámara séptica (CS) o también conocido como tanque séptico, es una estructura fundamental en el tratamiento primario de aguas residuales (Cáceres Magnus, 2018). Esencialmente, se trata de

un sedimentador cubierto donde el agua residual se mantiene en reposo durante un período determinado. Durante esta fase, los sólidos se acumulan en el fondo del tanque (Municipalidad de San Martín de los Andes - Alvarez Mario, 2018), y al mismo tiempo, se permite la eliminación de material flotante (Mikkelsen Jensen, 2020).

Debido a la acumulación de partículas, se establecen dos etapas de tratamiento. En la primera, se retienen parte de los sólidos, y en la segunda, se inicia una descomposición biológica de la materia aprovechando las condiciones anaeróbicas presentes en el tanque (Rosales Escalante, 2005).

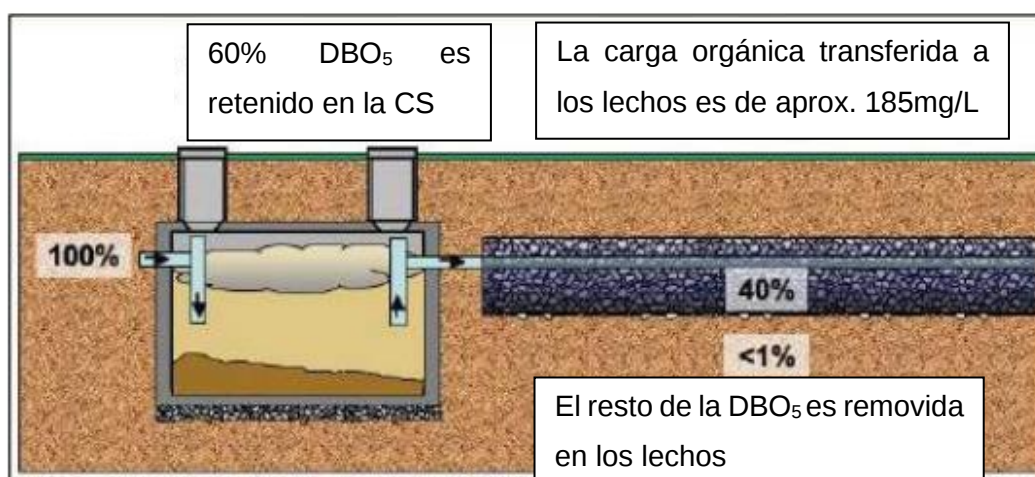


FIGURA 10: NOTA: SISTEMA DE CÁMARA SÉPTICA Y LECHO INFILTRACIÓN. EXTRAÍDO DE MUNICIPALIDAD DE SAN MARTIN DE LOS ANDES

El diseño de la cámara séptica debe garantizar dimensiones adecuadas para crear una situación de estabilidad hidráulica en su interior, lo que proporciona condiciones favorables para los procesos de sedimentación y flotación, así como para los procesos biológicos (Mikkelsen Jensen, 2020).

En la ordenanza CM-2802-16 se cita a Mariñelarena (2006), donde el autor describe la cámara séptica como un compartimento hermético que funciona por rebalse. Esto significa que el agua residual ingresa al tanque y, debido a la retención de sólidos, el nivel de líquido se eleva hasta alcanzar una salida, momento en el cual el agua tratada sale del tanque mientras que los sólidos sedimentados permanecen en su interior. Este proceso de rebalse permite una separación efectiva de los sólidos y una adecuada retención de materia orgánica antes de que el efluente tratado continúe su camino hacia la siguiente etapa del tratamiento o la disposición final.

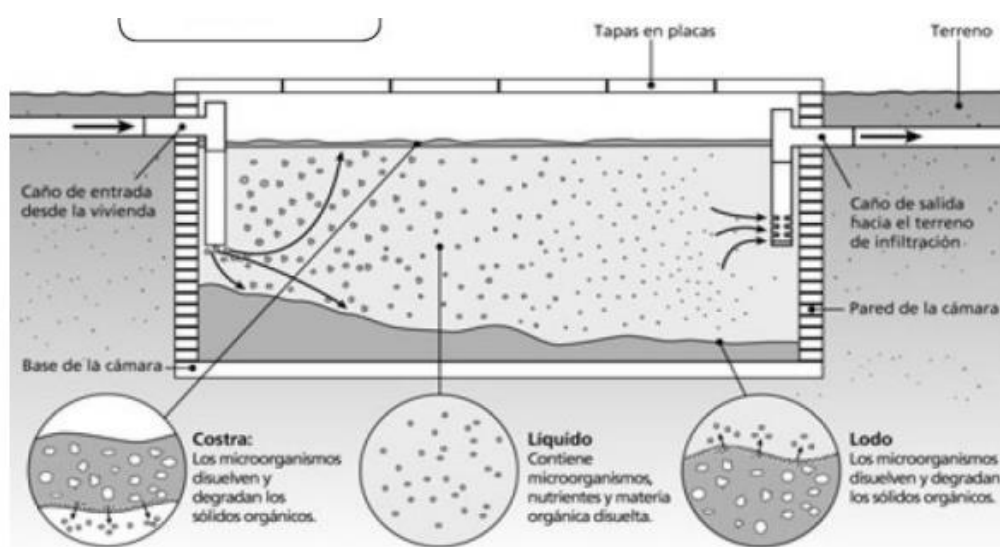


FIGURA 11: NOTA: ILUSTRACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LA CÁMARA SÉPTICA. EXTRAÍDO DE
MAÑIRELARENA (2006)

Las cámaras sépticas de doble compartimento han demostrado ser más eficientes que las de un solo compartimento. En ambos casos, ocurren procesos de sedimentación y digestión anaeróbica. En la parte central de la cámara se encuentra la zona de sedimentación, donde las partículas caen por su propio peso y se acumulan en el fondo. En la parte inferior se forman los lodos de materia orgánica que son consumidos por las bacterias anaeróbicas, lo que contribuye al tratamiento del agua residual (Cáceres Magnus, 2018).

La cámara séptica de **doble compartimento** cuenta con una pantalla que cumple tres funciones importantes (Cáceres Magnus, 2018):

- i. Bloquea el paso de los lodos formados por materia sedimentada proveniente del primer compartimento.;

- ii. Optimiza el rendimiento de la cámara, ya que permite la sedimentación de la materia orgánica y sólidos suspendidos sedimentables en el segundo compartimento
- iii. Detiene las natas del primer compartimento, las cuales se caracterizan por ser más pesadas y densas que las del segundo compartimento.

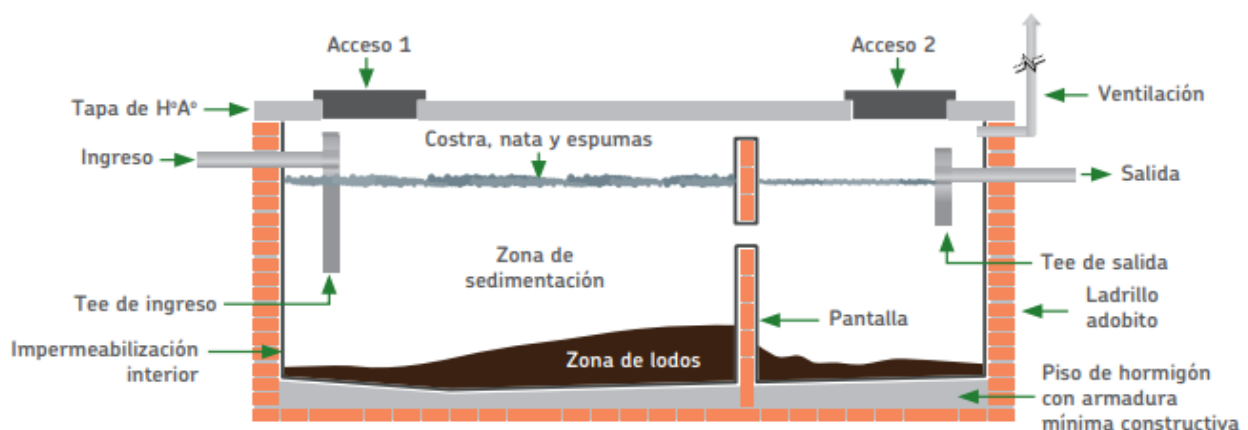


FIGURA 12: NOTA: CÁMARA SÉPTICA DE DOS CÁMARAS. EXTRAÍDO DE CÁCERES MAGNUS (2018)

El material sedimentado forma una capa de lodos o fango en el fondo del depósito, que se degrada biológicamente con el tiempo de permanencia y la acción de los microorganismos. Este fango debe ser extraído periódicamente (Rosales Escalante, 2005) debido a que el tiempo de retención hidráulico va disminuyendo con el tiempo, y por consiguiente, se reduce el volumen efectivo de la cámara para el tratamiento biológico del agua residual (Ministerio de Turismo – Presidencia de la Nación, 2018).

El exceso de lodos generados dentro de la cámara es retirado por las empresas de camiones atmosféricos que se encargan de su transporte. En el caso específico de San Carlos de Bariloche, estos lodos son llevados a la CEB (Cooperativa de Electricidad Bariloche) con el propósito de mantener la eficiencia del tanque séptico y asegurar su correcto funcionamiento.

Por otro lado, las grasas y aceites que son retenidos pueden ser removidos manualmente en intervalos de tiempo más cortos, similar al caso de las cámaras desengrasadoras. Dependiendo del volumen de residuos recolectados, las grasas pueden ser retiradas por camiones atmosféricos o dispuestas en bolsas de consorcio para ser llevadas al vertedero. En algunos casos existen empresas que utilizan estas grasas y aceites como materia prima para ser reacondicionadas y generar biocombustibles.

Existen diversos estudios que han establecido valores de remoción que son alcanzados para las cámaras sépticas. En el caso de la Municipalidad de San Martín de los Andes y Álvarez Mario *et al.* (2018), se encontró que la remoción de materia orgánica es del 60%, mientras que Mariñelarena (2010) establece que la remoción de materia orgánica varía entre un 30% y un 50%, y la remoción de sólidos suspendidos se sitúa en un rango de entre un 60% y un 70%.

Por otro lado, Zanuttín (2018) en su presentación final de trabajo para la especialización en tratamiento de efluentes y residuos orgánicos, señala que las cámaras sépticas reducen un 40% solamente de DBO₅, valor que utilizó para el tratamiento de efluentes de un hotel de aproximadamente 300 personas.

En estudios realizados por Viraraghavan (1985), se observó que a temperaturas entre 4-10°C con un Tiempo de Residencia Hidráulico (TRH) de 2 días, la remoción de la DBO₅ es del 70-77%. Mientras que en temperaturas de 0,6-15°C con un TRH de 4,5 días, la remoción es de 49-52%.

Sin embargo, la eliminación de nutrientes por las cámaras sépticas es generalmente baja. Investigaciones llevadas a cabo por Darby y Leverenz (2004) indican que la cantidad de nitrógeno total removida en comparación con la salida es de entre 12,5% y 23,5%. En cuanto al fósforo total, la remoción no fue significativa en ninguno de los sistemas estudiados (Darby & Leverenz, 2004). Lusk *et al.* detalla que, la remoción observada en su estudio de N_T por medio de las cámaras sépticas es menor al 5%, y casos similares se observan para la remoción de P_T debido a la deposición de sólidos en el fondo.

En conclusión, la cámara séptica es una opción de tratamiento tradicional para aguas residuales aplicado a nivel domiciliario individual y en comunidades con poca población. Su diseño y dimensionamiento adecuado permiten retener sólidos, llevar a cabo procesos de sedimentación, y lograr cierta remoción de materia orgánica. No obstante, es importante tener en cuenta que la remoción de nutrientes es limitada en este tipo de sistemas, pudiendo verse afectados sectores circundantes, y por ende, en casos donde se requiera una mayor eliminación de contaminantes, puede ser necesario utilizar tratamientos avanzados complementarios.

9.4.2 LECHO INFILTRACIÓN

En la etapa de infiltración, se lleva a cabo la disposición final de las aguas residuales tratadas. Durante este proceso, se desarrollan tres etapas fundamentales para el agua residual que sale del tanque séptico.

En primer lugar, se realiza la distribución uniforme del agua tratada en todo el campo de infiltración. Para optimizar el espacio y prevenir posibles obstrucciones en los drenajes, se diseñan las zanjas en dos o más ramales.

En el segundo proceso, en los lechos de infiltración tiene lugar una depuración biológica del agua residual tratada (Rosales Escalante, 2005). Se forma una biopelícula alrededor del ripio o piedra que se coloca en la zanja, la cual contiene bacterias que consumen parte de la materia orgánica que aún está presente en el agua residual (Cáceres Magnus, 2018).

Finalmente, el tercer proceso, que es el más crítico, consiste en la infiltración del agua residual tratada hacia el subsuelo (Cáceres Magnus, 2018). El éxito de este sistema de tratamiento depende en gran medida de la capacidad de absorción del suelo. Por lo tanto, es crucial realizar pruebas de infiltración (Rosales Escalante, 2005) para asegurar el adecuado funcionamiento del sistema. Su buen funcionamiento depende de que el tanque sedimentador cumpla apropiadamente con la retención de los sólidos más pesados y las grasas.

Según el manual METCALF & EDDY, no aconseja el uso de estos sistemas debido a que existe un riesgo de potencial contaminación de las aguas subterráneas subyacentes (Tchobanoglous, *et al.*, 2003). En este sentido de ideas, Seoanez Calvo, plantea que este tipo de tratamiento presenta problemas en términos de vida útil en los lugares de aplicación, ya que una cantidad de productos no biodegradables son volcados a estos sistemas y, consecuencia, el terreno pierde su aptitud como superficie de vertido. Por otro lado, este mismo autor menciona que un factor limitante son la presencia de nitratos en aguas residuales y recomienda el uso de varias perforaciones para controlar la evolución de la composición del agua.

Además, como ya se mencionó en la parte de justificación, para que la infiltración de aguas residuales sea tratada adecuadamente requiere una velocidad de infiltración correcta. No obstante, tal y como menciona el Departamento Ambiental de Calidad de Michigan, muchas veces los suelos no son adecuados a la instalación de este tipo de tratamiento pudiendo ser que drenen muy rápido siendo que éstas no logren ser filtradas correctamente, o que el drenaje sea muy lento provocando que el agua residual vuelva por la cañería o se escurra.

Por otro lado, cuando los sólidos entran en la red de drenaje de las cañerías, puede llevar a que el sistema se obstruya provocando que el campo de drenaje se vuelva húmedo acumulándose en el jardín. Desafortunadamente, muchos propietarios no se dan cuenta o siempre que el agua residual del sistema drene fuera del terreno, no evalúan el funcionamiento correctamente hasta que ocurre en una falla siendo una potencial fuente de nutrientes y patógenos para cuerpos o cursos de agua cercanos (Estado de Michigan, Departamento Ambiental de Calidad, 2017).

9.4.3 IMPACTOS AMBIENTALES DEL TRATAMIENTO CONVENCIONAL

En base a lo anteriormente detallado en las secciones anteriores, en cuerpos de agua y aguas subsuperficiales que están cerca de tratamientos convencionales, se evidenciaría el incremento de nutrientes. Por ejemplo, en el documento del gobierno de Michigan se publica que, debido al gran uso de este tipo de tratamientos convencionales, en 64 ríos muestreados encontraron microorganismos específicos del sistema digestivo humano y altas concentraciones de nutrientes. El principal responsable de este impacto era la cámara séptica con sistemas de drenaje inadecuados. Por otro lado en este documento, también mencionan que el servicio geológico de los Estados Unidos y la Universidad de Grand Valley, encontraron que la eutrofización en el lago al Oeste de Michigan fue producto del tratamiento convencional de casas ubicadas cercanas al lago mencionado (Estado de Michigan, Departamento Ambiental de Calidad, 2017).

Por otro lado, Lusk *et al.*, detalla que las cámaras sépticas contribuyen al incremento de carga de N_T en los ecosistemas debido al ingreso de agua subsuperficial contaminada con este compuesto, especialmente en áreas cercanas a las costas. El mismo autor remarca que es necesario implementar un tratamiento avanzado para adecuar a los límites de vertido.

En este mismo sentido, reportes de la Universidad de Florida publican que, en sitios donde se utilizan CS, el suelo se encontró enriquecido en P_T en un factor de 2 a 4 dentro de un radio cercano a las tuberías. Esto evidencia que el fósforo es movilizado teniendo diversos sumideros, principalmente cuando el suelo ya muestra signos de que los sitios disponibles para adsorción de fósforo están ocupados. Además, a pesar de que los suelos pueden retener el fósforo (fijación de fósforo), este puede ser reversible en largos periodos de tiempo dependiendo del tipo de suelo. Al mismo tiempo, detallan que se desarrollaron columnas de fósforo avanzando en dirección al agua subterránea, a pesar de que el sistema esté funcionando correctamente. Lo expresado anteriormente sobre el movimiento del fósforo puede verse a continuación:

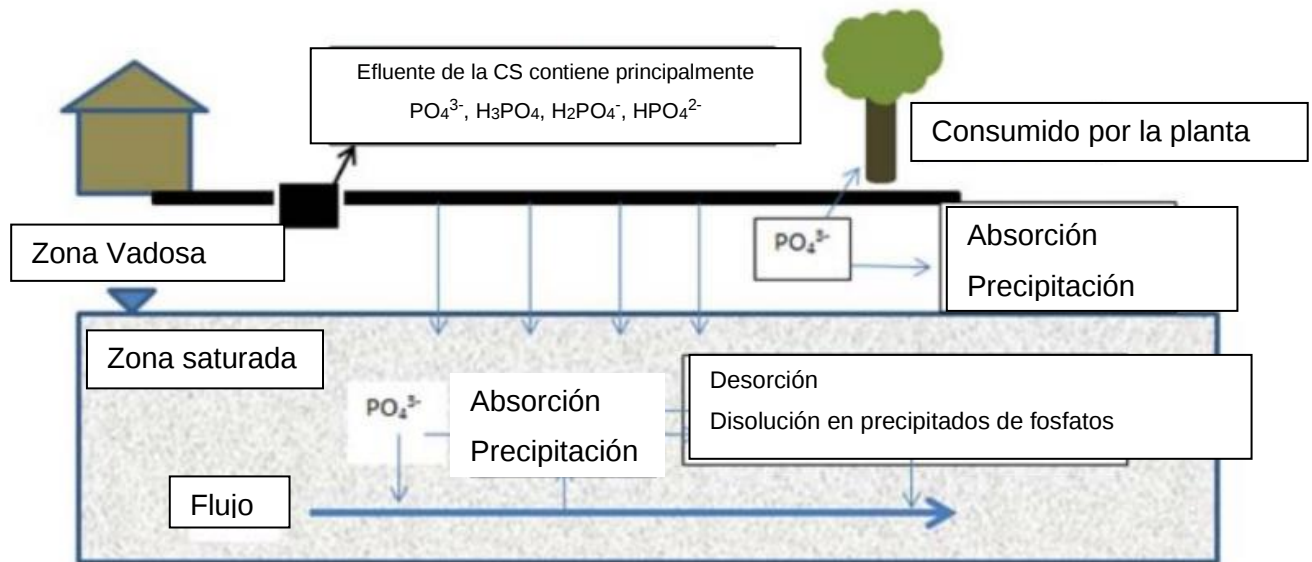


FIGURA 13: NOTA: MOVIMIENTO DEL FÓSFORO EN EL SUELO. EXTRAÍDO DE [UNIVERSIDAD DE FLORIDA](#)

El nitrógeno que por un lado es un factor de eutrofización como ya mencionamos, pero por el otro lado, presenta toxicidad para la vida acuática (González & César Saldarriaga, 2008) y, por ende, puede provocar la pérdida de biodiversidad en los ecosistemas acuáticos (Di Domenico, *et al.*, 2015) siendo una preocupación ambiental adicional.

Los iones amonio pueden ser atraídos por partículas como la arcilla y materia orgánica sólida y de esta forma ser resistentes a percolar. Sin embargo, los iones amonio pueden empezar a percolar cuando la capacidad de intercambio catiónico del suelo sea satisfecha (Pacheco Avila, *et al.*, 2002).

Por lo general, los niveles elevados de nitrato en las aguas subterráneas se deben, en parte, a la contaminación causada por el tratamiento deficiente de las aguas residuales (Departamento de Servicios de Salud de California, 2006; Rodríguez, *et al.*, 2012; Giuliano Albo & Blarasin, 2014). Este compuesto se vuelve altamente móvil producto de su solubilidad y, también, porque su forma aniónica no es absorbida por la vegetación. Por lo tanto, puede llegar a cuerpos de agua ubicados a grandes distancias. La lixiviación del nitrato desde el suelo representa tanto una pérdida de fertilidad como una amenaza para el ambiente y la salud humana. Por lo tanto, el nitrato se ha convertido en un indicador ambiental crucial en los ecosistemas subterráneos (Moschione, 2011).

Si un acuífero se contamina con nitratos y supera los límites establecidos por el Código Alimentario Argentino (CAA), esto plantea dos preocupaciones principales: la salud y el impacto ambiental. En lo que respecta a la salud, el nitrato en el agua potable se ha asociado con casos de

metahemoglobinemia en bebés, así como con enfermedades cardíacas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019; Pacheco Ávila, *et al.*, 2002).

Es importante destacar que el nitrito y los nitratos rara vez se encuentran en aguas residuales crudas, y cuando están presentes en las aguas residuales sin tratar, suelen ser características de las aguas residuales industriales (Menéndez Gutiérrez & Pérez Olmo, 2007).

A continuación, se muestran las transformaciones del nitrógeno en el suelo y en las aguas subsuperficiales:

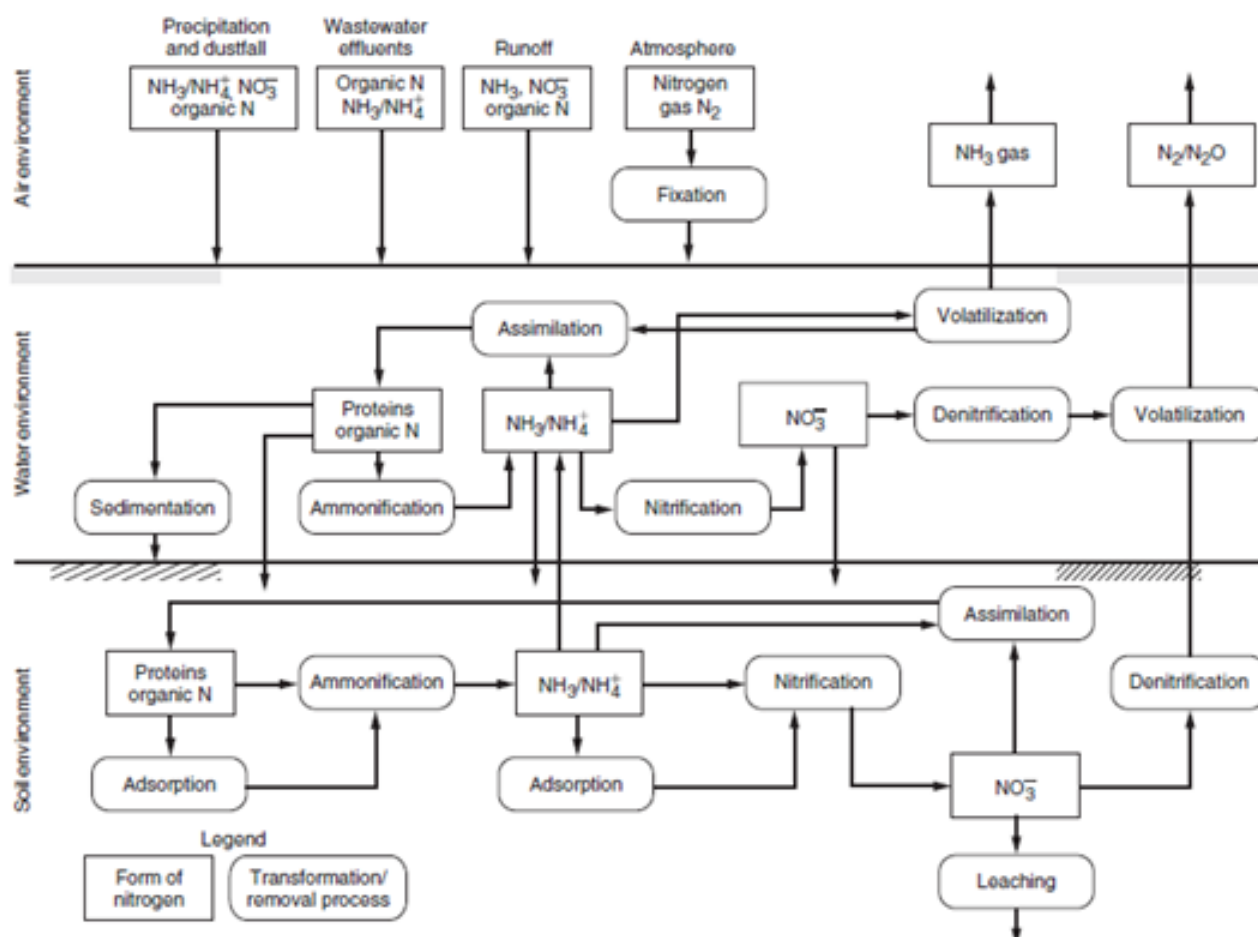


FIGURA 14: NOTA: MOVIMIENTO Y TRANSFORMACIONES DEL NITRÓGENO. EXTRAÍDO DE TCHOBANOGLIOUS, *ET AL.*, 2016

10 MARCO LEGISLATIVO

La regulación establece los parámetros límite listados en la tabla 2 para el vertido de aguas residuales en Bariloche. Estos parámetros deben cumplirse de acuerdo con el cuerpo receptor, como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 2: LÍMITES DE VUELCO PARA MUESTRAS EXTRAÍDAS DE LOS AFOROS POST TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE LA RESOLUCIÓN 885/886 RÍO NEGRO

LEGISLACIÓN	PARÁMETRO	UNIDAD	COLECTORA DE DRENAJE Y PLUVIAL	COLECTORA CLOACAL	INFILTRACIÓN SUBSUPERFICIAL	RÍOS Y ARROYOS
(Departamento provincial de aguas- Provincia de Río Negro, 2015)-Res. 885/15	pH	-	6-9	6-9	6-9	6-9
	Temperatura	°C	45	45	45	30
	SS en 10min	mL*L ⁻¹	-	0.5	-	-
	SS en 2Hs	mL*L ⁻¹	1	1	5	1
	Grasas y aceites	mg*L ⁻¹	50	50	50	30
	DBO	mg*L ⁻¹	50	200	100	50
	DQO	mg*L ⁻¹	250	500	500	250
	N _T	mg*L ⁻¹	30	100	30	15
	P _T	mg*L ⁻¹	5	5	5	5

Para el caso de reúso de aguas residuales, el Departamento Provincial de Aguas ha emitido la Resolución N.º 1423, Expte. N.º 35577-IGRH-08 (Boletín Oficial N.º 5394), en la cual se establecen los siguientes lineamientos:

TABLA 3 PARÁMETROS DE CONTROL PARA MUESTRAS EXTRAÍDAS DE LOS AFOROS POST TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. EXTRAÍDO DE LA RESOLUCIÓN 1423.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES MÁXIMOS / RECOMENDADOS	FRECUENCIA DE MUESTREO
CONDUCTIVIDAD	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	3000	Mensual
pH	-	6-9	Mensual
GRASAS Y ACEITES	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	10	Mensual
SS EN 10' y 2Hs	$\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$	5	Mensual
DBO	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	50	Semestral
DQO	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	250	Semestral
FÓSFORO TOTAL	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	10	Bimestral
NITRATOS	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	10	Bimestral
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	NMP/100ml	1000	Mensual

En relación con la disposición final de aguas residuales, la normativa Ordenanza 2802-CM-16 establece los lineamientos en San Carlos de Bariloche, y está reglamentada por la Resolución 200-I-2018.

Por otro lado, se optó por incluir la directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de aguas residuales en la Unión Europea. Esta adopción se debe a que la directiva aborda la problemática de la eutrofización cultural y establece parámetros límite de vertido, así como porcentajes mínimos de reducción, con el propósito de mitigar posibles impactos en los cuerpos de agua receptores. La Directiva 91/271/CEE tiene como objetivo fundamental asegurar un nivel adecuado de tratamiento de aguas residuales, y nos permite alinearlos con los estándares internacionales de protección ambiental

TABLA 4: PARÁMETROS DE CONTROL DE NUTRIENTES EN TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES SEGÚN LA
NORMATIVA EUROPEA. ELABORACIÓN A PARTIR DIRECTIVA 91/271/CEE.

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN	PORCENTAJE DE REMOCIÓN MÍNIMO
FÓSFORO TOTAL	2mg*L ⁻¹	80%
NITRÓGENO TOTAL	15mg*L ⁻¹	70-80%

11 MARCO TEÓRICO: HUMEDALES CONSTRUIDOS

11.1 HISTORIA DE LOS HUMEDALES CONTRUIDOS

El uso de vegetación para el tratamiento de aguas residuales es una práctica antigua cuyos orígenes no pueden especificarse con exactitud. Se cree que hace aproximadamente 300 años se empezó a experimentar con el uso de plantas como tratamiento de las aguas residuales (Chandra, *et al.*, 2018).

El aprovechamiento de zonas húmedas era una práctica habitual en las civilizaciones antiguas que vertían sus aguas servidas en zonas adyacentes a lagos y ríos. Evidentemente, la razón primordial era deshacerse de las aguas residuales más que depurarlas, pero gracias a la capacidad de estas zonas húmedas, el potencial de contaminación de las aguas negras se reducía antes de que se incorporaran a los cauces. Como beneficio agregado, las aguas estabilizadas del humedal aportaban nutrientes aprovechables para el sostenimiento de fauna y flora. La investigación científica y sistemática amplió el horizonte de aplicaciones de los humedales como sistemas de control de contaminación (Arias & Brix, 2003).

El documento más antiguo, registrado por Brix (1994), que utiliza el término humedales contruidos data de 1904. Sin embargo, no fue hasta 1950 donde Seidel empezó a desarrollar y divulgar esta tecnología (Vymazal, 2022; Delgadillo, *et al.*, 2010). En un reporte enviado al Max-Planck Institute, Seidel detalló que, utilizando las plantas adecuadas, se podía disminuir la sobre fertilización y, además, reducir la contaminación en las aguas, permitiendo que este brinde soporte a la vida nuevamente (Brix, 1994). En la década del 60', Seidel continuó desarrollando esta tecnología en áreas rurales usando macrófitas (Vymazal, 2022).

No obstante, el primer humedal construido operacional a gran escala empezó en 1974 en Othfresen en Alemania, el tratamiento fue llamado "Root-Zone Method" (RZM). Consistía en una cama de plástico que contenía macrófitas emergentes en el suelo. Sin embargo, la baja conductividad hidráulica provocó que el agua residual entrara en contacto con la rizosfera y no sea tratada. El problema fue resuelto utilizando un medio más poroso como la grava. (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006)

En las décadas de los 80' y 90', la tecnología de humedales contruidos experimentó una rápida expansión y se implementó en todo el mundo. Este crecimiento fue impulsado por la realización de numerosas conferencias internacionales enfocadas en esta tecnología, las cuales tuvieron lugar en Europa, Asia, Australia y América, bajo el nombre de la Asociación Internacional del Agua (Vymazal, 2022). Estos eventos permitieron difundir los beneficios y avances de los humedales

construidos como sistemas de tratamiento de aguas residuales y su aplicación en diferentes contextos geográficos y ambientales.

Rodríguez-Domínguez *et al.* (2020) explica que, a pesar de los beneficios de este tipo de tecnologías, existe una gran brecha en su uso en comparación con la tecnología convencional en la región Latinoamericana (LA). De todo el total registrado, solo el 0,22% corresponde a sistemas de humedales construidos; esto se debe a que la mayoría de los documentos publicados que tratan sobre experiencias con HC son de carácter experimental. A esto se suma la **escasez de pautas de diseños** locales y la falta de conocimiento por parte de las partes interesadas y tomadores de decisiones en la región. Además, en Latinoamérica, las soluciones basadas en la naturaleza no son un enfoque común en la ingeniería.

Según el estudio realizado por este mismo autor, Rodríguez-Domínguez *et al.* (2020), entre 2009 y 2019 se revisaron un total de 169 documentos en Latinoamérica, de los cuales solo fue posible extraer 512 experiencias con HC. Gráficamente, la distribución de estos estudios estaba ilustrada de la siguiente forma:



FIGURA 15: NOTA: TRABAJOS PUBLICADOS DE HC EN LATINOAMERICA. EXTRAÍDO DE RODRIGUEZ-DOMINGUEZ ET AL. (2020)

En la región, particularmente en Esquel, Argentina, Manzo *et al.* (2020) publicó un documento sobre el tratamiento de aguas residuales, donde sugiere que los HC ofrecen beneficios ambientales y soluciones ecológicas para mejorar el ciclo de agua urbana. Argentina se destacó como el segundo país con mayor cantidad de publicaciones, principalmente con un enfoque en el tratamiento de AR.

11.2 HUMEDALES: DEFINICIONES

Existe una variedad de tipos de humedales lo que hace difícil de definirlos. Una de las definiciones más usadas es la que brinda el Ramsar como (Stefanakis, *et al.*, 2014):

“Extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas, naturales o artificiales, permanentes o temporales, con agua estancada o corriente, dulce, salobre o salada, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda seis metros”.

La Asociación Internacional del Agua (IWA) (2006) también define al humedal como una zona inundada o saturada, ya sea por aguas superficiales o por aguas subterráneas. Esto puede ocurrir con una frecuencia, duración y profundidad suficientes para mantener especies de plantas predominantemente adaptadas a crecer en suelos saturados. Este término de humedales engloba un abanico de ecosistemas o entornos húmedos, incluyendo pantanos, ciénagas, prados húmedos, humedales de marea, llanuras aluviales y cinturones (ribereños) a lo largo de canales de arroyos (DuPoldt, *et al.*, 1995). No obstante, la definición de humedal también incluye áreas donde el suelo no esté inundado (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

Los humedales se pueden definir según su génesis, pudiendo ser naturales (HN) o artificiales/construidos. Los primeros son aquellos que se han originado sin influencias antropogénicas directas o indirectas (Gargallo Bellés, 2017). Mientras que, los HC fueron diseñados y utilizados por los seres humanos para algún fin en específico.

La importancia de los humedales naturales radica en su importancia ecológica, como la diversidad de especies y densidades de población a las que brinda un hábitat (Stefanakis, *et al.*, 2014). Además, ofrecen bienes y servicios a los seres humanos, tales como:

- ❖ Absorción del dióxido de carbono;
- ❖ Control/modificación de incidentes de inundaciones (amortiguadores protectores);
- ❖ Captura de sedimentos y otras sustancias;
- ❖ Almacenamiento y liberación de calor;
- ❖ Absorción de la radiación solar y respectivo apoyo a las cadenas alimentarias;

Entre los valores también se puede dividir a los humedales como:



FIGURA 16: NOTA: VALOR DEL HUMEDAL. EXTRAÍDO DE STEFANAKIS ET AL, (2014).

11.3 HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los Humedales Construidos (también llamados biofiltros, bioceldas, humedales artificiales o constructed wetlands) son sistemas ingenieriles diseñados de forma antrópica, que han demostrado ser una alternativa a los sistemas convencionales de depuración de aguas residuales de diversos tipos (Cordoba, *et al.*, 2015). Estos sistemas mimetizan las condiciones y/o procesos que tienen lugar en los humedales naturales (Gargallo Bellés, 2017).

Al igual que otros sistemas de saneamiento, los HC realizan la depuración mediante procesos físicos, químicos y biológicos bajo condiciones definidas donde se desarrollan comunidades de plantas y microorganismos (Cordoba, *et al.*, 2015). Por medio de ellos se busca mejorar y optimizar ciertos procesos físicos y bioquímicos (Gargallo Bellés, 2017) para ser utilizados como fitodepuración (Delgadillo, *et al.*, 2010). Tanto la vegetación como la cama filtrante desempeñan un rol importante en la remoción de contaminantes (Liolios, *et al.*, 2016). Los HC pueden remplazar así el tratamiento secundario e, incluso, bajo ciertas condiciones, el terciario y primario de las aguas residuales (Delgadillo, *et al.*, 2010).

De esta manera, los HC se utilizan para mejorar la calidad de las fuentes puntuales y difusas de contaminación del agua, incluida la escorrentía de aguas pluviales. Entre los diferentes focos de contaminación de AR, se destacan las aguas residuales domésticas y agrícolas. Además, se emplean en el tratamiento de aguas residuales provenientes de refinerías de petróleo, residuos, compost y lixiviados de vertederos, descargas de estanques de piscicultura, drenajes de minas de carbón, aguas

residuales de fabricación de papel, farmacéuticas, cosméticas, alimenticias, mataderos y pretratados industriales, como las de pulpa, molinos y textiles. Los humedales artificiales pueden ser el tratamiento único para algunas aguas residuales, mientras que para otras, forman parte de una secuencia de procesos de tratamiento (DuPoldt, *et al.*, 1995; Delgadillo, *et al.*, 2010).

Es importante destacar que no se limitan exclusivamente a la función de tratamiento de AR, sino que también se aplican actualmente en el tratamiento de una gran variedad de aguas superficiales, incluyendo el tratamiento de aguas eutróficas. En igual forma, se los utiliza como creación de hábitat para distintas especies, como áreas recreativas, mitigación de impactos o la restauración ambiental (Gargallo Bellés, 2017).

Independientemente, de las aplicaciones mencionadas, es necesario desarrollar un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas posibilita una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas mediante las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo, *et al.*, 2010).

El término "macrófitas", utilizado en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluyendo plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos. Estas constituyen "fitosistemas", ya que emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, captan la luz solar y la transforman en energía química, utilizada en su metabolismo para llevar a cabo funciones vitales y colaborar así en el tratamiento de las aguas (Delgadillo, *et al.*, 2010).

El funcionamiento de los humedales construidos se fundamenta en tres principios básicos:

- ❖ La actividad bioquímica de microorganismos;
- ❖ El aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día;
- ❖ El soporte físico de un lecho inerte que permite el enraizamiento de las plantas y actúa como material filtrante.

En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos (Delgadillo, *et al.*, 2010)

Los HC son generalmente sistemas fiables, autoajustables y robustos que producen efluentes de buena calidad teniendo un buen rendimiento en la depuración de aguas residuales domésticas. Sin embargo, deben ser diseñados, construidos, mantenidos y operados de forma en que se ajusten a las características del agua residual y a las condiciones climáticas del emplazamiento de humedal (DuPoldt, *et al.*, 1995; Arias & Brix, 2003).



FIGURA 17: NOTA: EJEMPLO DE UN HC. EXTRAÍDO DE AGUAS CALIENTES MÉXICO

11.3.1 TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los humedales construidos para tratamiento fueron creados para enfatizar una característica específica de los humedales naturales y mejorar esa capacidad de tratamiento (Kadlec & Wallace, 2008). En la actualidad, existen diversos tipos de HC que se clasifican tradicionalmente, para el tratamiento de aguas residuales, en dos categorías según la hidrología del humedal:

- Humedales Construidos de Flujo Superficial (HFS): similares a los humedales naturales, con un flujo superficial de aguas residuales sobre un sustrato saturado.
- Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial (HFSS): donde las aguas residuales fluyen Horizontalmente (HFSSH) o Verticalmente (HFV) a través del sustrato que sustenta el crecimiento de las plantas.

Sin embargo, algunos autores proponen una reclasificación más detallada, como se muestra resumidamente en el siguiente cuadro:

TABLA 5: CLASIFICACIÓN DE HC SEGÚN DIFERENTES ATRIBUTOS. EXTRAÍDO DE STEFANKIS (2016).

ATRIBUTO FÍSICO	ASPECTO ESPECÍFICO	DESCRIPCIÓN	CATEGORÍA DEFINIDA PARA CADA ASPECTO	SUBCATEGORÍA
HIDROLOGÍA	Posición del agua	Posición de la superficie del agua respecto del suelo o el sustrato	Flujo superficial (HFS)	
			Flujo subsuperficial (HFSS)	
	Dirección del flujo	Dirección predominante del flujo a través del sistema	Horizontal	Descendente
			Vertical	Ascendente
				Mixto
	Saturación del medio	Grado de saturación del medio	Drenaje libre	
			Intermitente	
			Constante	
	Inundación de la superficie	Tipo de inundación del medio	Ninguna	
			Efímera	
			Permanente	
VEGETACIÓN	Sensibilidad	Locación de las raíces: Fijas en los sedimentos o flotando	Sésil	Herbáceo
			Flotante	
			Emergente	
	Forma de crecimiento	Forma de crecimiento dominante según la posición respecto al agua	Sumergido	Leñoso
			Con hojas flotantes	
			Flotantes libre	

11.3.1.1 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUPERFICIAL (HFS).

Los humedales construidos de flujo superficial (conocidos en inglés como Surface Flow Constructed Wetlands o Free Water Surface Constructed Wetlands) son una modificación del sistema de lagunas convencionales (Delgadillo, *et al.*, 2010), donde las aguas residuales se vierten en la superficie en un extremo del lecho, trasiegan expuestas a la atmósfera de manera lenta y horizontal. Generalmente, tienen poca profundidad en relación con el medio que sustenta las raíces de la vegetación, y cuentan con una estructura de control que mantiene el nivel del agua. En este tipo de sistemas, la capa cercana al pelo de agua es aeróbica, mientras que alejándose de la superficie, el oxígeno disminuye hasta volverse anaeróbico.

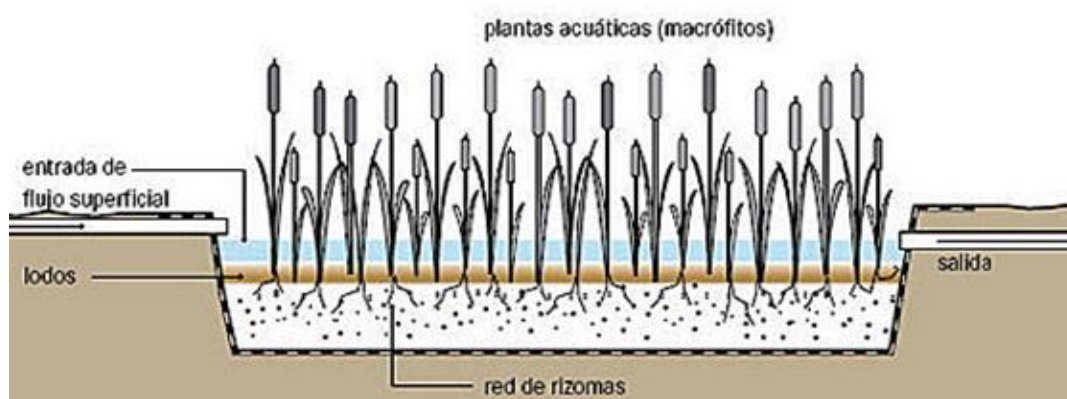


FIGURA 18: NOTA: ILUSTRACIÓN DE UN HFS. EXTRAÍDO DE STEFANIKIS (2016)

En términos de paisaje, este sistema es similar a las marismas (DuPoldt, *et al.*, 1995), y presenta la capacidad, en algunos casos, de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etc. (Kadlec & Wallace, 2008). Estos humedales pueden constituirse como lugares turísticos y sitios de estudio de diferentes disciplinas debido a las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen en su entorno (Delgadillo, *et al.*, 2010).

Diferentes autores lo han utilizado como tratamiento secundario o terciario, pero también, es aplicado en distintos tipos de climas. Cabe destacar que en la formación de hielo puede influir en la hidráulica, disminuyendo la tasa de remoción de contaminantes, principalmente porque reduce la transferencia de oxígeno, aunque aumenta la remoción de TSS en invierno (Kadlec & Wallace, 2008).

11.3.1.2 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Los sistemas de HFSS (conocidos en inglés como subsurface flow constructed wetlands) se caracterizan por mantener el agua residual por debajo de la superficie. La circulación del agua en

estos sistemas se realiza a través de un medio poroso granular, que permite que las raíces y rizomas de las plantas entren en contacto con el agua residual (Delgadillo *et al.*, 2010; Kadlec & Wallace, 2008).

Existen dos tipos de HFSS en función de la forma de aplicación de agua al sistema:

- ❖ Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal (HFSSH);
- ❖ Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Vertical. (HFSSV);

Los HFSS se utilizan principalmente para reducir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y presentan algunas ventajas respecto a los HFS (DuPoldt, *et al.*, 1995):

- ❖ Minimización de olores;
- ❖ Reducción de vectores de contaminación (Cáceres Magnus, 2018);
- ❖ Tolerancia a bajas temperaturas ambientales;
- ❖ Mejor asimilación por unidad de área;

Está comprobado que los medios porosos brindan un área de tratamiento mayor que los HFS, lo que implica una mayor eficiencia de los HFSS en comparación. Como resultado, ocupan áreas menores que los sistemas HFS para tratar el agua residual (Cordoba, *et al.*, 2015). Además, el tratamiento del agua residual de este tipo de humedales es subsuperficial, lo que reduce la probabilidad de que esté en contacto con personas o animales. Sin embargo, una desventaja de los HFSS frente a los HFS es que, en general, son más costosos y requieren un mayor mantenimiento, operación y reparación, debido a que muchos sistemas presentan problemas con obstrucciones y flujos superficiales no deseados (DuPoldt, *et al.*, 1995).

11.3.1.2.1 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIALES HORIZONTALES

Los HFSSH consisten en que el agua residual se distribuye en uno de los extremos del lecho, ingresando al medio poroso por debajo de la superficie, trasiega en sentido horizontal a través de un medio granular de relleno y entre las raíces de las plantas de forma lenta (Arias & Brix, 2003; Cordoba *et al.*, 2015). El agua residual interactúa con una red de zonas aeróbicas cercanas a las raíces o rizomas que liberan oxígeno, zonas anóxicas y zonas anaeróbicas. De esta manera, el agua residual es tratada mediante degradación microbiológica, física y química.

Al final y en el fondo del lecho, el agua tratada se recoge y se evacua por medio de tuberías y/o vertederos (Arias & Brix, 2003; Mariñelarena, 2006).

Es importante destacar que el agua residual no ingresa directamente al medio granular principal, sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño. Además, el sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio (Delgadillo *et al.*, 2010).

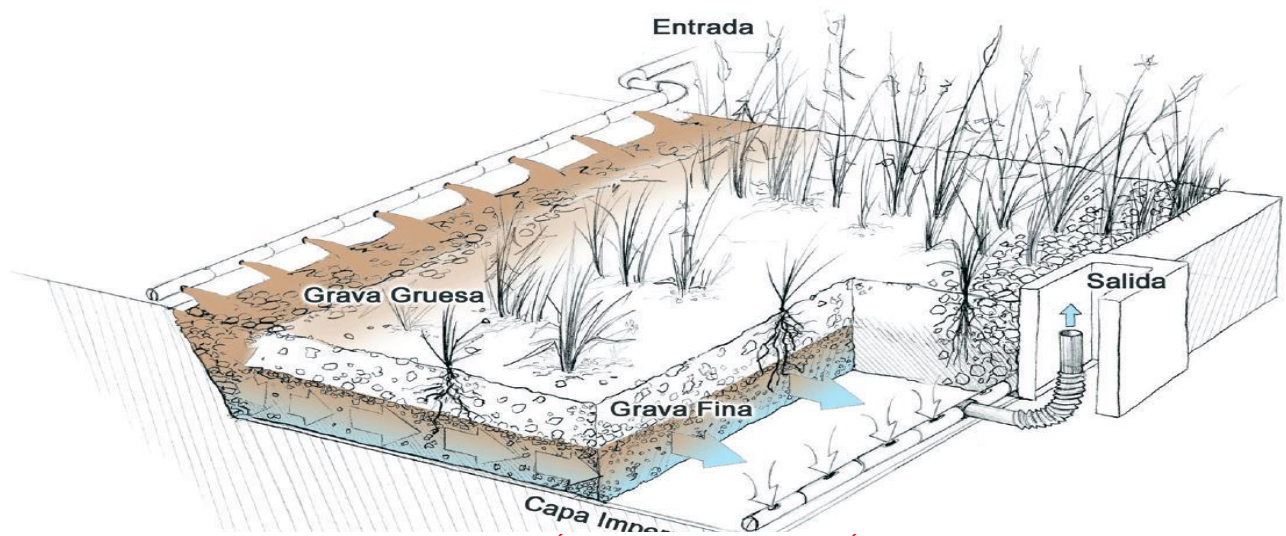


FIGURA 19: NOTA: ILUSTRACIÓN DE UN HFSSH. EXTRAÍDO DE MADRIMASD

Las características generales de los HFSSH son las siguientes (Arias & Brix, 2003; Delgadillo, *et al.*, 2010):

- **Profundidades variables:** estos humedales suelen tener profundidades que oscilan entre 0,3 m y 0,60 m.
- **Pendiente del fondo:** se construyen con una leve pendiente en el fondo, generalmente entre 0,5% y 1%, para facilitar el flujo del agua, procurando mantener condiciones hidráulicas de flujo laminar.
- **Aislamiento del suelo subyacente:** para evitar la contaminación de los suelos y las aguas subterráneas los lechos de los humedales deben ser aislados por una membrana impermeable.
- **Nivel del agua residual:** es crucial que el agua residual que ingrese al sistema se mantenga a un nivel inferior al de la superficie, generalmente unos 5-10 cm por debajo, lo cual se logra mediante la regulación del dispositivo de salida según este requisito.

11.3.1.2.2 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO VERTICAL

Existen diferentes variaciones de este tipo de humedales que se explicaran a continuación:

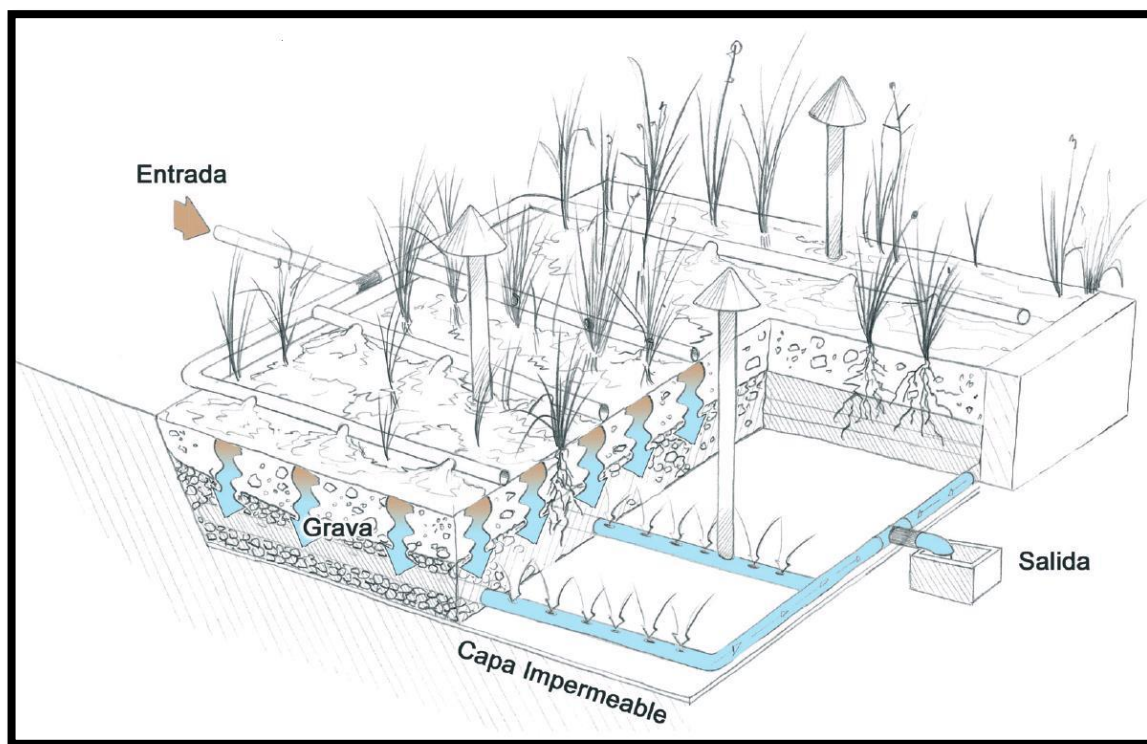


FIGURA 20: NOTA: ILUSTRACIÓN DE UN HFV. EXTRAÍDO DE DEPURANATURA

11.3.1.2.2.1 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO VERTICAL ASCENDENTE (HFVA):

En este tipo de humedales, el agua residual entra por el fondo del lecho mediante una red adecuada de tuberías. El movimiento ascendente del agua residual ocurre gradualmente a través de los poros de las diferentes capas del lecho y las raíces de las plantas, luego el agua residual tratada es recolectada en la superficie o a unos centímetros bajo la superficie (Stefanakis *et al.*, 2014).

Una ventaja significativa de este proceso es que el tiempo de residencia es superior, lo que permite un mayor contacto entre el agua residual y los distintos componentes del sistema, mejorando así la remoción de nutrientes. Varios autores han informado que un aumento en el tiempo de residencia hidráulica mejora significativamente la remoción de nitrógeno por las plantas.

Al igual que en otros tipos de HC, en las capas superiores del lecho predominan las condiciones aeróbicas. Sin embargo, el movimiento del agua residual desde el fondo anaeróbico hacia las capas superiores aeróbicas y, la producción de metano en el fondo anaeróbico, hace que los

HFVA sean atractivos para la degradación de compuestos clorados y la remoción de contaminantes. Se utiliza en casos de industria textil para la remoción de color y algunos compuestos orgánicos ácidos y básicos. Es importante destacar que el manejo del TRH permite tratar diferentes tipos de aguas residuales, como las agrícolas, las que requieren tratamiento secundario, las que necesitan tratamiento terciario y las provenientes de tanques sépticos. Además, un TRH alto permite aumentar la remoción de fósforo (Stefanakis *et al.*, 2014).

En Argentina, existen antecedentes del uso de esta tecnología para la depuración de aguas residuales de una escuela rural en Hudson, Partido de Berazategui. Este sistema fue diseñado a partir de ensayos a escala de mesocosmos, utilizando la modalidad ascendente en un humedal a escala experimental para evitar el clogging y el encharcamiento (Cordoba *et al.*, 2015).

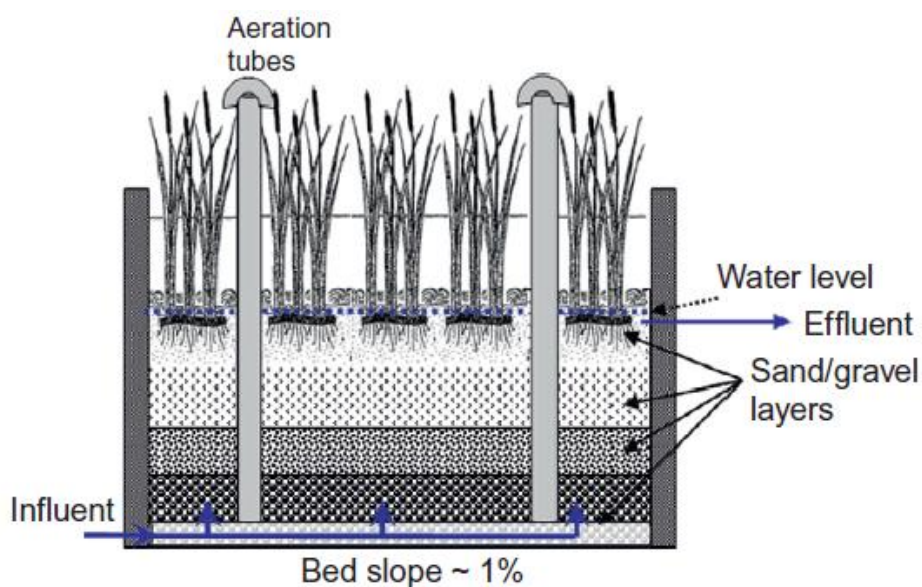


FIGURA 21: NOTA: HUMEDAL DE FLUJO ASCENDENTE. EXTRAÍDO DE STEFANAKIS (2014)

11.3.1.2.2 HUMEDAL CONSTRUIDO DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL DESCENDENTE

El AR es distribuida por un sistema de cañerías sobre toda la superficie del HFVD en un periodo corto de tiempo intermitentemente, para posteriormente fluir de manera descendente y percolar en el humedal (Stefanakis *et al.*, 2014; Arias & Brix, 2003). El rápido volcado del AR crea una superficie temporal de agua residual, ya que es vertido en pulsos, lo que provoca alternancia entre condiciones de saturación con agua en el lecho y períodos de insaturación (Delgadillo *et al.*, 2010; Stefanakis *et al.*, 2014). En algunos casos, para favorecer las condiciones aerobias del

medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que consisten en tuberías cribadas con salidas al exterior.

El AR percola por gravedad entre las diferentes capas de material filtrante a medida que es tratado y se recoge en una red de drenaje situada en el fondo del humedal (Delgadillo *et al.*, 2010). También, a medida que es drenado, permite recuperar las condiciones aeróbicas de la cama para la oxidación de la materia orgánica acumulada y evitar el clogging del lecho (Stefanakis *et al.*, 2014).

El lecho debe tener una profundidad de no menos de 1 m. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, siendo las más finas ubicadas en la parte superior, mientras que el diámetro de la grava aumenta hacia mayores profundidades del lecho, manteniendo una pendiente del 1 al 2%.

11.4 COMPONENTES DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO

Los componentes de un humedal son altamente variables y están influenciados por diversos factores. A continuación, se describen en detalle cada uno de estos componentes (Asociación Internacional del Agua - IWA, 2006):

11.4.1 HIDROLOGÍA

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal construido, ya que engloba todas las funciones del humedal y suele ser el factor determinante en su éxito o fracaso. Los cambios en la hidrología pueden tener efectos significativos en el desempeño del humedal y en la eficacia de su tratamiento. Al diseñar un humedal, es fundamental tener en cuenta los siguientes aspectos relacionados con la hidrología (Delgadillo, *et al.*, 2010):

- **Relación entre área superficial y profundidad:** La dimensión del humedal construido, en términos de su área superficial y profundidad, afecta directamente su eficiencia en el tratamiento del agua residual. La interacción de factores como la lluvia, los caudales afluentes (especialmente los caudales picos), las concentraciones de distintos compuestos y la evapotranspiración impactan la función del humedal y su capacidad para tratar adecuadamente el agua.
- **Densidad de la vegetación:** La densidad de la vegetación en el humedal tiene un papel crucial en su hidrología. Una densa vegetación puede obstruir los caminos de flujo del

agua, haciendo que su movimiento a través de la red de raíces y rizomas sea más sinuoso y dificultando la exposición al viento y al sol.

Las condiciones hidrológicas también influyen en el suelo y los nutrientes presentes en el humedal, lo que a su vez tiene un impacto en la vida biológica del sistema. El flujo y la capacidad de almacenamiento determinan el tiempo que el agua permanece en el humedal y, por lo tanto, la oportunidad de interacción entre las sustancias presentes y el ecosistema. Por otro lado, la hidrología es un factor crucial que interrelaciona todas las funciones del humedal, y su consideración adecuada es esencial en el diseño de un HC (Cordoba, *et al.*, 2015; Arias & Brix, 2003; DuPoldt, *et al.*, 1995).

Es decir, la hidrología es relevante para determinar qué tipos de plantas pueden prosperar dentro del humedal ya que muchas de ellas dependen de la disponibilidad de oxígeno en el suelo. Existen dos conceptos interdependientes relacionados con la hidrología:

- **Periodo hídrico:** es la duración del periodo en el cual el suelo estará inundado o saturado.
- **Régimen del agua:** se refiere a la profundidad y duración de la "inundación" en el humedal.

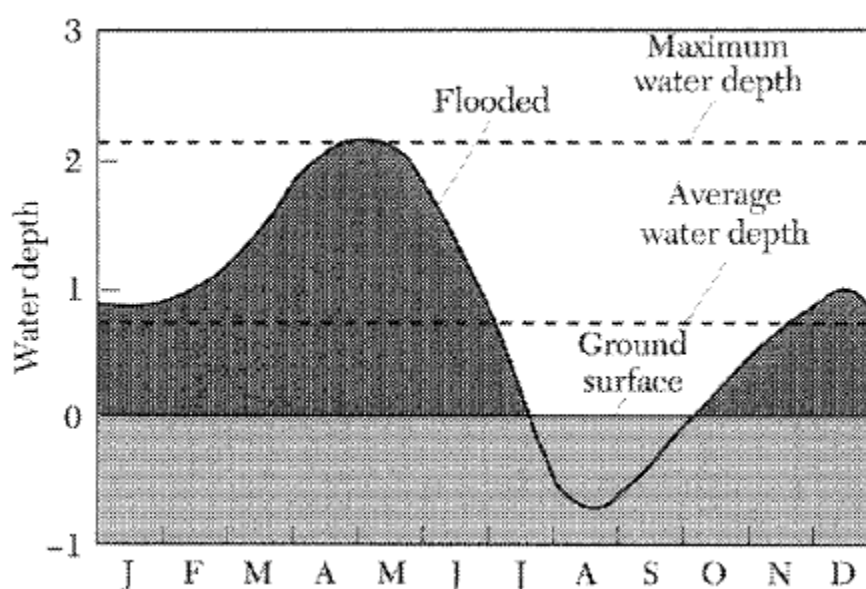


FIGURA 22: NOTA: VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL AGUA SEGÚN LA ESTACIÓN DEL AÑO. EXTRAÍDO DE LA ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DEL AGUA (IWA) (2006)

Exagerar estos valores puede causar una mala selección de tipo de plantas derivando en un deficiente tratamiento de efluentes. La duración y la profundidad de la inundación afecta la fisiología de la planta, la concentración de oxígeno en el suelo y el pH del suelo, la concentración de macronutrientes y la concentración de compuestos tóxicos (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

11.4.1.1 BALANCE HÍDRICO

La importancia de conocer el comportamiento del balance hídrico permite saber a qué tipo de humedal se evoluciona, ya que mantener un flujo con características medianamente similares hace que el ecosistema del humedal se mueva a una situación ecológica diferente a un humedal estocástico.

El agua que ingresa al humedal, ya sea por escorrentía, precipitación, humedad de suelo, fusión de la nieve, riego, agua subterránea y descargas, posee afluentes cuyos valores son más del tipo variables. Sin embargo, cuando se habla de humedales construidos, los valores de descarga son medianamente continuos, mientras que los valores de escorrentía y agua proveniente por ríos subsuperficial son prácticamente nulos.

En el caso de las vías de salida de agua del humedal, nos referimos a escorrentías, evapotranspiración (ET) y recarga de agua subsuperficial. Pero en general, los humedales construidos se encuentran aislados del medio evitando pérdidas por aguas subsuperficiales. Es por ello que la mayoría del agua se escurría por la salida del sistema. La ET ocurre con fuertes ciclos diurnos y estacionales, pudiendo ser una importante forma de salida de agua del sistema e importante a la hora de realizar los balances hídricos.

Otro factor relevante en los humedales es la variación en los niveles de agua debido a los períodos de sequía, ya que esto tiene un impacto significativo en la estructura vegetativa del humedal. En contraste, los humedales construidos suelen contar con estructuras que permiten regular el nivel de agua, lo que minimiza la variación en los niveles de agua, excepto en casos de precipitaciones o nieve en el sistema. Por lo tanto, las sequías en estos sistemas no son comunes y solo la vegetación adaptada a un entorno con abundante agua sobrevive en ellos.

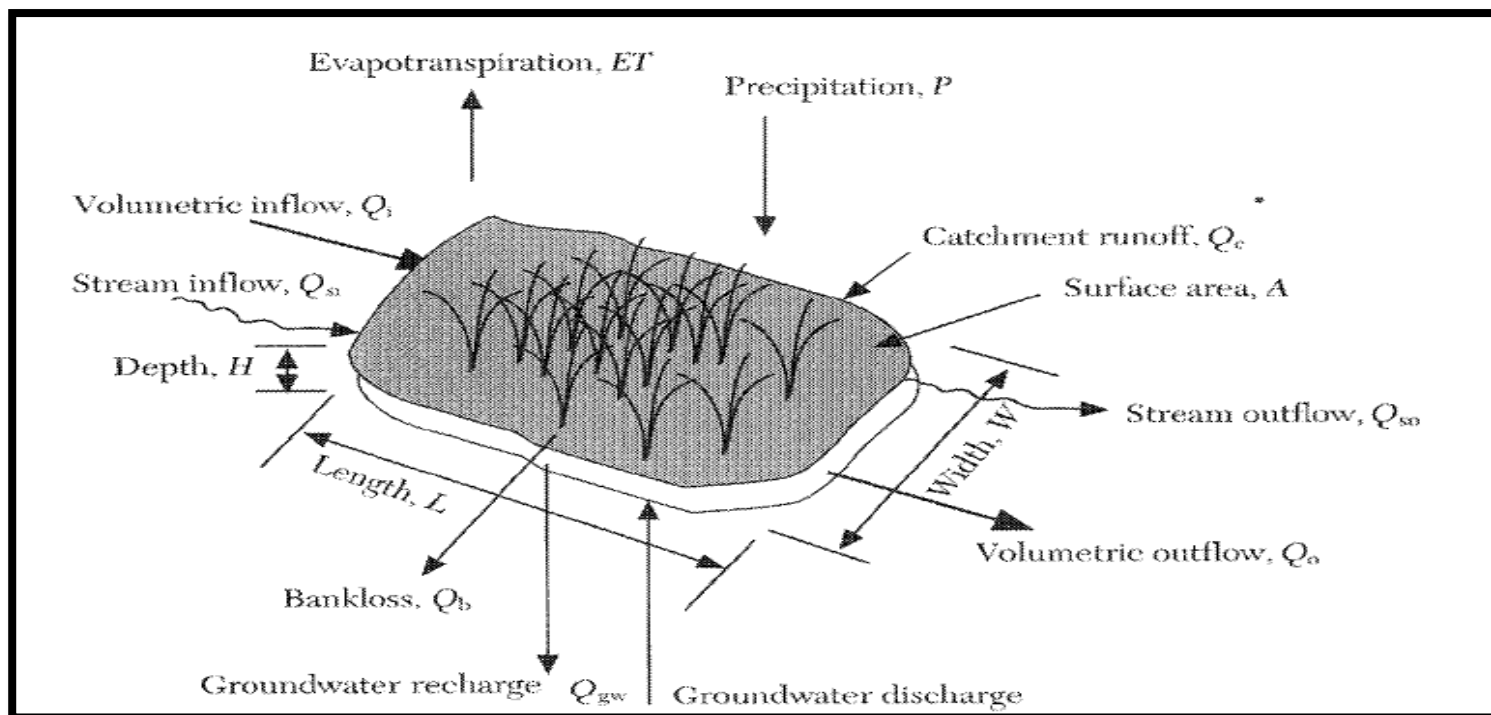


FIGURA 23: NOTA: ENTRADAS, PERDIDAS Y SALIDAS DE LOS HUMEDALES. EXTRAÍDO DE DUPOLDT, ET AL., 1995

Las variaciones temporales en profundidad, combinadas con una topografía desigual en el fondo del humedal, también tienen como efecto un tipo de patrón vegetal variable. Mientras que, en los HC el fondo es relativamente uniforme, sumado a un control de caudal y nivel en el agua causan que no haya variación en el humedal y hacen que el tratamiento sea similar a medida que el agua lo atraviesa.

Lo importante del balance hidrológico es encontrar el punto de la eficiencia que se encuentra en la duración de la permanencia del fluido dentro del sistema que está dado por la interacción entre el agua residual, la biota y la actividad física (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

11.4.2 SUSTRATO

El sustrato es un parámetro crítico de diseño, generalmente compuesto por suelo, arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. Es importante destacar que la alta eficiencia de purificación de los humedales artificiales se puede lograr mediante la selección adecuada de los medios de crecimiento (Delgadillo, *et al.*, 2010; Abdelhakeem, *et al.*, 2016).

El medio es responsable directo de la remoción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. Por estos motivos, el tamaño de las partículas, la naturaleza de la superficie, el volumen y distribución de los poros son factores importantes a tener en cuenta

(Abdelhakeem, *et al.*, 2016). El tamaño afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y, por ende, al caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar. Por el contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica. Por otro lado, el medio granular también contribuye a la eliminación de contaminantes de forma indirecta porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (biopelículas).

En general, se utiliza material natural como grava, arena, arcilla, calcita, mármol, vermiculita, escoria, cenizas volantes, bentonita, dolomita, piedra caliza, cáscara, zeolita o carbón activado (Wu, *et al.*, 2015). Sin embargo, existen casos en los que se utilizan diferentes tipos de medios para eliminar ciertos compuestos de las aguas residuales (Abdelhakeem, *et al.*, 2016). A continuación, se presenta la tabla 6 con ejemplos de diferentes tipos de sustratos utilizados:

TABLA 6: EJEMPLOS DE DISTINTOS SUSTRATOS FRECUENTEMENTE UTILIZADOS EN HC. EXTRAÍDO DE ZIDAN, ET AL., (2015)

TIPOS DE SUSTRATO	SUSTRATO
NATURAL	Arena
	Grava
	Arcilla
	Calcita
	Mármol
	Vermiculita
	Bentonita
	Dolomita
	Limo de roca
	Caparazón
	Esquisto
	Turba
	Wollastonita
	Zeolita
	Maerl
INDUSTRIAL	Escoria
	Ceniza
	Carbón cilíndrico
	Lodo de alumbre
	ladrillo molido ahuecado
	Moleanos limostones
	Relaves de wollastonita
	Cáscara de aceite de palma
ARTIFICIAL	Cárbon activado
	Agregados de peso liviano
	Compost
	Silicato calcico hidratado
	Ceramsite

Arias *et al.*, (2000) muestra que el contenido de Ca en el suelo ayuda a determinar su capacidad de remover fósforo. Un estudio realizado por Xu *et al.* (2006) en China observó que la capacidad de sorción general de fósforo por las arenas varía de 0,13 a 0,29 g*Kg⁻¹. Por otro lado, la zeolita presenta una capacidad de adsorción de amonio de 11,6g*Kg⁻¹. (Wu, *et al.*, 2015).

Las características físicas y químicas de los suelos y otros sustratos se ven modificadas cuando se encuentran bajo inundación. En el caso de los humedales construidos, existen dos modos de operaciones posibles: la alimentación continua o por lotes. El modo de alimentación elegido tiene un impacto significativo en las condiciones de aireación presentes en los medios de crecimiento (Abdelhakeem, *et al.*, 2016). Cuando un sustrato se satura de agua, esta ocupa los espacios porosos que previamente estaban llenos de gases atmosféricos (Delgadillo, *et al.*, 2010). Debido al consumo de oxígeno generado por la descomposición de materia orgánica a través del metabolismo microbiano, este se agota más rápidamente de lo que puede ser reemplazado por difusión atmosférica, lo que resulta en la creación de un entorno anóxico. Este ambiente reductor desempeña un papel crucial en la eliminación de contaminantes como el nitrógeno y los metales (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

11.4.2.1 POROSIDAD

La porosidad (o porosidad total, n) se define como la cantidad máxima de agua que puede mantener saturado el suelo (Crites *et al.*, 2014). En otras palabras, es la habilidad del medio para almacenar fluidos y permitir el intercambio físico-químico y biológico entre las diferentes fases presentes en el suelo (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2009). Se expresa como el porcentaje en volumen del suelo que no está ocupado por partículas sólidas. La porosidad del suelo superficial determina en gran medida los procesos de infiltración y escurrimiento del agua, los cuales influyen en la erosión hídrica y el transporte de agua en el suelo.

La capacidad de almacenamiento y movimiento del agua, ya sea en el suelo o en la relación agua-suelo-plantas (Olson, 1985), así como la tasa de difusión de los gases del suelo y el crecimiento radicular, dependen no solo del volumen total de poros, sino también de la distribución de poros según su tamaño. Cuando el tamaño de los poros disminuye, las fuerzas de retención del agua aumentan, lo que afecta el drenaje, la aireación, la disponibilidad de agua y el crecimiento de las raíces.

La **porosidad efectiva** es el término que describe el volumen de poros interconectados en relación al volumen total de material no consolidado o roca. La porosidad efectiva se asemeja a la porosidad drenable, y representa la porción de agua que se drenará bajo la influencia de la gravedad.

La **capacidad de retención** se refiere a la porción de agua del suelo que permanecerá retenida como una película o en espacios vacíos muy pequeños

La porosidad que representa la relación entre los espacios vacíos y el volumen total del suelo se puede estimar a partir de la suma de la porosidad efectiva y la capacidad de retención. A modo de ejemplo, se ilustra casos de suelos de mediciones típicas *in situ* consolidadas en California.

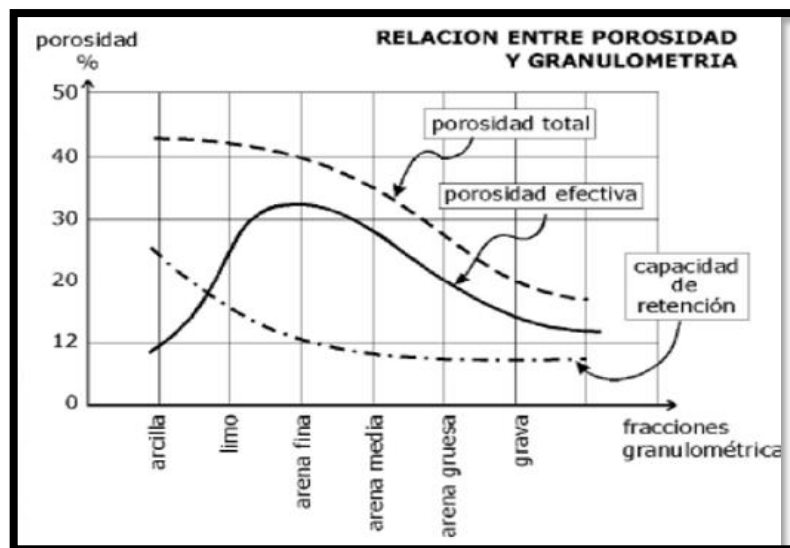


FIGURA 24: NOTA: EJEMPLOS DE PORCENTAJES DE POROSIDAD TOTAL DE ENSAYOS *IN SITU* REALIZADOS EN CALIFORNIA. EXTRAÍDO DE CRITES ET AL. (2014)

Los valores de las porosidades para cada tipo de material se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 7: VALORES DE POROSIDAD PARA CADA TIPO DE MATERIAL. ELABORADO A PARTIR DE INFORMACIÓN PUBLICADA POR LUREIRO C. YU ET AL. 1993.

MATERIAL	POROSIDAD [%]
Grava gruesa	24-36
Grava fina	25-38
Arena gruesa	31-46
Arena fina	26-53
Limo	34-51
Arcillas	34-57

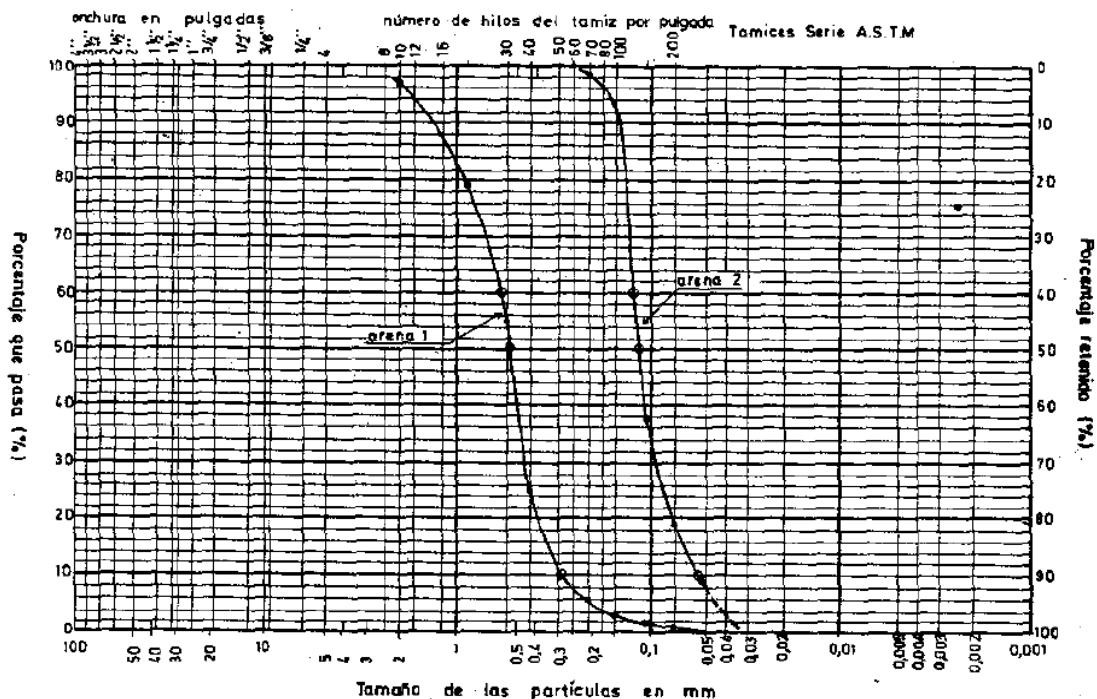
11.4.2.2 GRANULOMETRÍA

La granulometría de un material se determina mediante tamices de mallas cada vez más pequeñas, midiendo el porcentaje de material retenido en cada tamiz. Todos los pesos se refieren

al material seco. Al finalizar, se expresa el peso de la muestra retenido en cada tamiz como un porcentaje del peso total de la muestra.

A partir de los valores de los resultados anteriores, se construye una curva granulométrica que muestra el tamaño de las partículas. La curva granulométrica se grafica con los porcentajes acumulados que pasan en el eje de ordenadas y los tamaños de los tamices estándar en el eje de abscisas, utilizando una escala logarítmica (Escobar *et al.*, 2016).

El tamaño “D_x” es el tamaño de grano tal que solo el x% de los granos son de tamaño menor, es decir, es el ancho de malla del tamiz que deja pasar el x%. Por ejemplo, el D₁₀ indica el tamaño de partícula que es más pequeño que el 10% de las partículas presentes en la muestra. Mientras que el D₅₀ o diámetro aritmético en la curva granulométrica representa el tamaño para el que es retenido o pasa en 50 % del material (Custodio & Llamas, 1983).



predominan los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo estos microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza. (Delgadillo, *et al.*, 2010).

La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y muchos nutrientes, convirtiéndose en un sumidero importante de estos componentes. Además, las poblaciones microbianas se adaptan a los cambios en el agua que reciben. Su actividad es responsable de diversas funciones:

- ❖ Transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles;
- ❖ Alterar las condiciones del potencial de reducción y oxidación del sustrato, afectando así la capacidad de procesamiento del humedal;
- ❖ Convierten en gases las sustancias que son liberados a la atmósfera;
- ❖ Reciclar nutrientes;

Estas poblaciones microbianas tienen la capacidad de experimentar una rápida expansión cuando se están en presencia de compuestos adecuados que les proporcionan los nutrientes y energía necesarios para su crecimiento. No obstante, cuando las condiciones ambientales ya no son propicias, muchos microorganismos se vuelven inactivos y pueden permanecer en este estado durante años (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

Es importante tener precaución con las sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados, ya que pueden afectar a la comunidad microbiana del humedal. Es fundamental evitar la introducción de estos productos químicos para evitar la generación de dosis tóxicas que puedan afectar el correcto funcionamiento del sistema (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

11.4.4 VEGETACIÓN

Se observa que, para humedales destinados al tratamiento de aguas residuales, tiene mayor relevancia lograr una densidad adecuada de plantas que seleccionar una especie en particular para el tratamiento. No obstante, la prolongada inundación del suelo conduce a condiciones anaeróbicas, por lo que es crucial elegir una especie que se adapte al entorno inundado y que presente un crecimiento rápido y constante. En lo posible, se recomienda optar por especies nativas perennes, evitando el uso de exóticas que puedan volverse invasivas y difíciles de controlar (DuPoldt, *et al.*, 1995; Wetlands International, 2003).

Es relevante mencionar que las raíces de las plantas requieren oxígeno para respirar. Por lo tanto, en entornos inundados y anóxicos, las plantas han desarrollado diversas adaptaciones. Por ejemplo, los vasos huecos en los tejidos permiten que el oxígeno se transporte desde las hojas hasta las raíces y el suelo circundante, lo que posibilita la descomposición microbiana aeróbica y la respiración de las plantas (Wetlands International, 2003; Sánchez-Olivares, *et al.*, 2007). Esta es la razón por la cual, en los humedales construidos, generalmente se utiliza vegetación emergente, que son plantas no leñosas cuyas raíces se encuentran en el sustrato mientras que sus tallos y hojas emergen por encima de la superficie del agua (DuPoldt, *et al.*, 1995).

Fundamentalmente, en los humedales construidos se emplean principalmente macrófitas, que abarcan una amplia variedad de especies. Aunque, sólo un número limitado de ellas se utilizan en los humedales (Wu, *et al.*, 2015). En particular, las macrófitas emergentes, como el *juncus* sp., son capaces de crecer en diversos sustratos y tolerar diferentes tipos de aguas residuales (Comisión Nacional del Agua, s.f.).

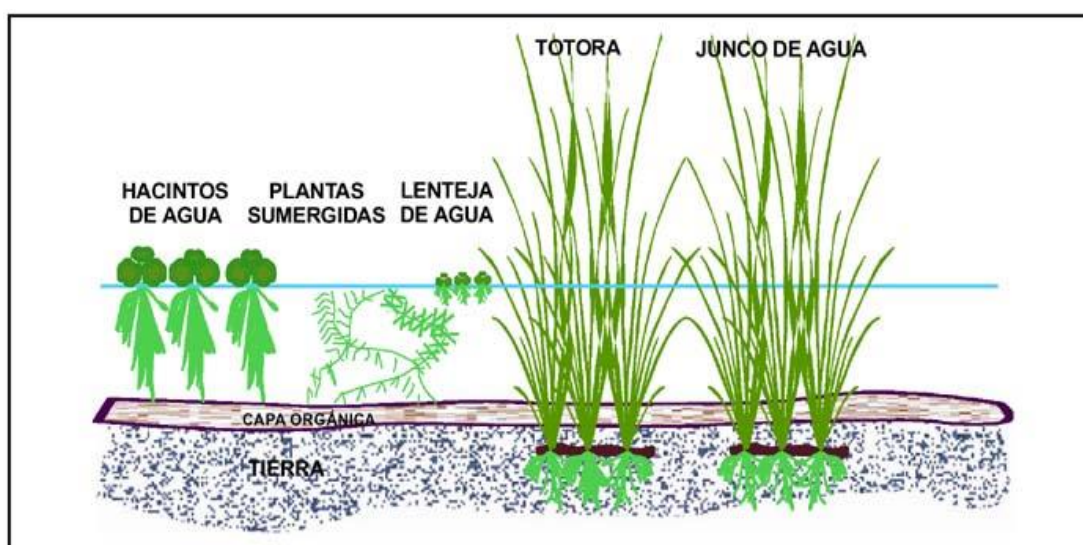


FIGURA 26: NOTA: VEGETACIÓN DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS. EXTRAÍDO DE ANNA CORRELA, (2020)

Es importante señalar que las macrófitas desempeñan un papel crucial en la modificación de la textura, la conductividad hidráulica y química del suelo debido al crecimiento de sus rizomas y raíces (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006). Su presencia limita el flujo canalizado y reduce la velocidad del agua, permitiendo una mayor sedimentación y promoviendo el contacto entre los componentes del sistema, como la atmósfera, el sustrato y los microorganismos (DuPoldt, *et al.*, 1995).

Como ya se mencionó, las estructuras de las plantas funcionan como facilitadoras de la difusión gaseosa dentro del humedal, permitiendo el intercambio de gases entre la atmósfera y el sustrato. Además del oxígeno, esto incluye la difusión de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y metano,

que es liberado a la atmósfera a través de las plantas (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006; DuPoldt, *et al.*, 1995). La presencia de vegetación en los humedales no solo favorece la remoción de nitrógeno y fósforo mediante el proceso de "*up taking*" incorporándolos en sus tejidos, sino que también proporciona un ambiente propicio para el desarrollo de microorganismos y catalizadores de reacciones, ya que los sistemas de tallos y raíces ofrecen sitios para la fijación microbiana y promueven una variedad de reacciones químicas (DuPoldt, *et al.*, 1995). Diversos estudios, como el realizado por Zhu, *et al.* (2012), han demostrado que la presencia de plantas en el sustrato mejora significativamente la remoción de DQO y DBO₅ (Abdelhakeem, *et al.*, 2016). Incluso, algunas especies reaccionan al estrés por la falta de oxígeno en el ambiente incrementando la liberación de oxígeno como una respuesta adaptativa (Sánchez-Olivares, *et al.*, 2007).

Cabe destacar que, además de la tolerancia a condiciones extremas, la selección adecuada de la vegetación es fundamental para lograr una mejora óptima de remoción de nutrientes en los humedales construidos. Este efecto de *up taking* previamente mencionado, se puede potenciar ya que existen diferencias en las velocidades de crecimiento, morfología y distribución de las raíces de las diferentes especies (Zhu, *et al.*, 2012; Wu, *et al.*, 2015).

11.4.5 ANIMALES

Los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales atraen vida silvestre debido a su carácter húmedo, proporcionando hábitat para diversos invertebrados, como insectos y gusanos, fundamentales en la fragmentación de detritos y descomposición de materia orgánica. Algunos invertebrados acuáticos en su fase larval consumen cantidades significativas de material (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

Al mismo tiempo que los invertebrados, los humedales atraen una variedad de animales, incluyendo anfibios, aves y mamíferos. Las aves, por ejemplo, se alimentan de macroinvertebrados presentes en los sedimentos, generando múltiples agujeros en el humedal por metro cuadrado. Los mamíferos, a su vez, habitan los humedales y excavan pozos en busca de alimento, lo que contribuye al potencial de oxidación del suelo (Arias & Brix, 2003). No obstante, el uso de aguas residuales por parte de las aves implica riesgos para la salud tanto de las aves como de los seres humanos, y es fundamental comprender estos riesgos con mayor detalle. A pesar de los beneficios que las aves acuáticas obtienen de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, también pueden enfrentar peligros de origen microbiano, como el consumo de *Clostridium botulinum* y la *Salmonella* spp., así como la exposición a metales pesados (Murray & Hamilton, 2010).

Es relevante destacar que la presencia de vida silvestre en el humedal está asociada como fuente de contaminación por patógenos, pero no existen estudios que informen sobre la vectorización de enfermedades debido a este tipo de tratamientos. No obstante, a pesar de que es imposible excluir la vida silvestre del humedal, esta potencialidad se reduce mientras se opera adecuadamente para minimizar la interacción vida silvestre-aguas residuales. Los mosquitos, y otros insectos, e inclusive las aves no estarán en contacto con el agua residual mientras se mantenga el nivel subsuperficial adecuado. También mitiga el riesgo que niños y/o mascotas estén expuestos al agua residual (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

Cabe destacar que, debido a la pérdida global de humedales naturales, algunas aves han desarrollado una mayor dependencia de hábitats alternativos y artificiales. No obstante, el uso de estos humedales por parte de las aves suele ser oportunista. Los humedales construidos adquieren importancia para la vida silvestre, y aunque su propósito principal es el tratamiento de aguas residuales, proporcionan hábitat a las aves y desempeñan un papel inesperado en la conservación. Es esencial considerar que los humedales construidos no reemplazan a los naturales y que los esfuerzos para conservar estos últimos no deben disminuir debido a esta circunstancia.

12 HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL COMO TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

12.1 FORMAS Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS AGENTES CONTAMINANTES EN LOS HC

Como ya se mencionó anteriormente, un humedal es un conjunto complejo de agua, sustrato, plantas, hojarasca (principalmente material vegetal caído), invertebrados (principalmente larvas de insectos y gusanos) y una matriz de microorganismos (principalmente bacterias). Por lo tanto, existe un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos que tienen lugar dentro del HFSSH y a menudo interrelacionados (Delgadillo, *et al.*, 2010; DuPoldt, *et al.*, 1995).

En rasgos generales los mecanismos por el cual eliminan contaminantes incluyen:

- ❖ Sedimentación de material particulado en suspensión;
- ❖ Filtración y precipitación química a través de contacto del agua con el sustrato;
- ❖ Transformación química;
- ❖ Adsorción e intercambio iónico en las superficies de plantas, sustrato y sedimento;
- ❖ Descomposición y transformación de contaminantes por microorganismos y plantas;
- ❖ Absorción y transformación de nutrientes por microorganismos y plantas;
- ❖ Depredación y extinción natural de patógenos.

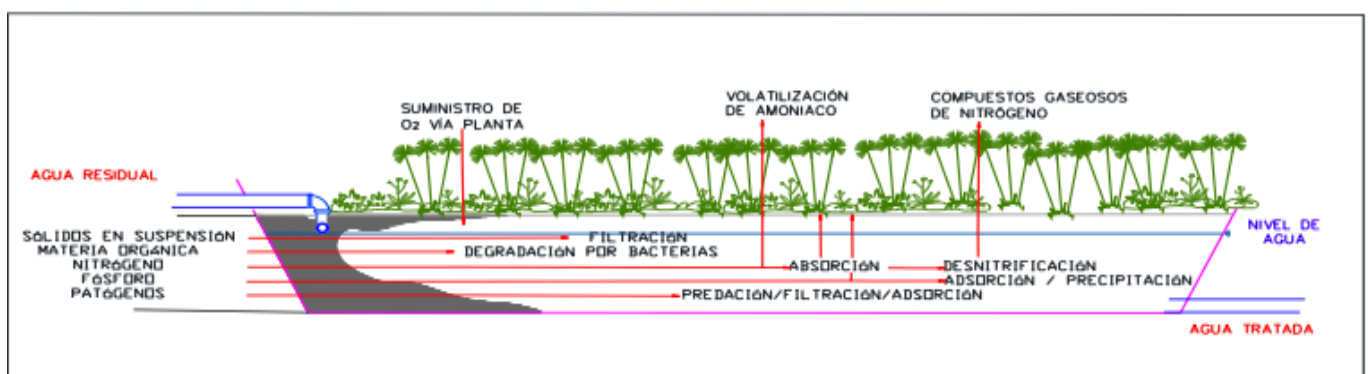


FIGURA 27: NOTA: MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES. EXTRAÍDO DE MENA CABRERA (2016)

12.1.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y SEDIMENTABLES.

Los sólidos sedimentables y suspendidos que no son removidos eficientemente de los sistemas de pretratamiento (Asociación Internacional del Agua [IWA], 2006) son removidos al filtrar y

sedimentar los sólidos. No obstante, es crucial mantener un tratamiento previo adecuado para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal (Delgadillo, *et al.*, 2010). Cabe destacar que, el efecto de intercepción de las raíces de las macrófitas y el sustrato reduce la velocidad del agua, lo que favorece ambos procesos (Qin & Chen, 2016).

12.1.2 MATERIA ORGÁNICA

La remoción de materia orgánica, medida en términos de DQO y DBO₅ depende de la combinación de mecanismos físicos y microbiológicos. Debido a los mecanismos de filtración y la baja porosidad del medio, los sólidos orgánicos pueden ser filtrados y atrapados en el lecho, lo que permite la biodegradación de la materia orgánica (Gonzalez Restrepo, 2015).

La biodegradación es llevada a cabo por microorganismos aeróbicos o anaeróbicos, los cuales se adhieren a las plantas, especialmente a las raíces y la superficie de los sedimentos (Kolb, 1998). La degradación aeróbica resulta en la transformación de la materia orgánica en dióxido de carbono y agua gracias a la acción de los microorganismos aeróbicos (Qin & Chen, 2016). No obstante, la continua saturación del medio puede restringir la degradación aeróbica, limitándola a zonas cercanas a la rizosfera y/o a la capa superficial por difusión atmosférica (Vymazala & Kröpfelová, 2008). Esta restricción se debe a la escasez de oxígeno disuelto, que actúa como un factor limitante (Vymazala & Kröpfelová, 2008).

En el caso de las AR, el suministro de oxígeno es escaso, lo que hace que el mecanismo predominante sea el anaeróbico. Este mecanismo reduce la materia orgánica a dióxido de carbono y metano mediante la acción de bacterias anaeróbicas a través de la fermentación (Qin & Chen, 2016).

12.1.3 NITRÓGENO

El nitrógeno es removido en los humedales construidos de flujo subsuperficial a través de procesos de nitrificación y desnitrificación, ANAMMOX, volatilización, adsorción y remoción por parte de la vegetación (Delgadillo, *et al.*, 2010; Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

La remoción de nitrógeno comienza con la transformación del nitrógeno orgánico (N_{Org}) a nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) a través del proceso de amonificación (Arteaga-Cortez, *et al.*, 2020). El nitrógeno amoniacal puede ser asimilado por las raíces de las plantas o los microorganismos, volatilizarse si el sistema presenta un pH superior a 9 o bien oxidarse a nitrato (NO₃⁻) mediante la acción de bacterias amonio-oxidantes y nitrito-oxidantes (Arteaga-Cortez, *et al.*, 2020); este proceso se ve favorecido por condiciones aeróbicas y un pH entre 7,5 y 8,6 (Vera, *et al.*, 2010). El último

paso es la reducción del nitrato a nitrógeno molecular (N_2) bajo condiciones anóxicas/anaeróbicas a través de la desnitrificación (Arteaga-Cortez, *et al.*, 2020), donde un pH entre 7-8 favorece este proceso (Vera, *et al.*, 2010). Sin embargo, como ha observado anteriormente, algunos autores revelan que en muestreos en campo la oxigenación de la rizosfera del humedal subsuperficial puede ser insuficiente, lo que provoca que la nitrificación sea el paso limitante (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

La remoción de nitrógeno en humedales construidos aumenta con el tiempo a medida que se genera una mayor densidad de plantas en el humedal y se logra desarrollar el sistema de raíces. La forma del nitrógeno como NO_3^- , constituye la forma más importante de nitrógeno que es absorbida por la mayoría de las plantas. Además, las plantas desempeñan un papel primordial en los procesos de nitrificación y desnitrificación.

Se observa que, la relación entre el crecimiento de la planta y la remoción es mayor a medida que esta crece (Vera, *et al.*, 2010). No obstante, la remoción del nitrógeno en HFSSH no es ilimitada, ya que la capacidad de las raíces para absorber y procesar el nitrógeno también tiene un límite. Por otro lado, la asimilación de nitrógeno, por parte de las plantas solo permite eliminar aproximadamente un 10% al 15% del N_T (Rivera Díaz & Arévalo Sánchez, 2015). Cabe destacar que, para lograr una remoción efectiva, es necesario llevar a cabo el proceso de poda del humedal (Londoño Cardona & Venegas, 2009).

De igual manera, en los humedales de tratamiento, el proceso ANAMMOX ha sido identificado de manera positiva, además de que en los HFSSH predomina el nitrógeno en las formas de amonio y nitratos. Los oxidadores de amoníaco tienen un metabolismo más versátil de lo que se pensaba anteriormente, y las bacterias nitrificantes aeróbicas y las bacterias ANAMMOX son socios naturales en muchas situaciones con limitación de oxígeno. Incluso en estudios donde la temperatura del agua en los humedales construidos fue de 5,9 a 19,7°C, las reacciones de ANAMMOX aún continuaron realizando la remoción de nitrógeno del medio (Li, *et al.*, 2022).

Es por esto que, aunque intervienen la metabolización por parte de las plantas y la absorción en la matriz del suelo o sedimentos, el principal mecanismo de remoción en humedales construidos lo constituye la nitrificación/desnitrificación para la remoción de nitrógeno total. Cabe resaltar que en estudios de HFSSH el proceso ANAMMOX fue la principal vía de eliminación de nitrógeno, siendo un potencial alternativo en la remoción de N_T (Li, *et al.*, 2022).

12.1.4 FÓSFORO

La eliminación de fósforo en los HFSSH es el resultado de la acción bacteriana, la absorción por parte de las plantas, la adsorción en el medio poroso y la precipitación, donde el fósforo reacciona con minerales como el oxihidróxido férrico, aluminio y minerales de arcilla (Arteaga-Cortez, *et al.*, 2020; Akratos, *et al.*, 2009). Estos compuestos permanecen en el sistema, ligados al sedimento, y por ello se acumulan. Las bacterias y la absorción por parte de las plantas son responsables de la eliminación del $\text{PO}_4\text{-P}$, mientras que la precipitación y la adsorción contribuyen a la eliminación de todas las formas de fósforo (Akratos, *et al.*, 2009).

La vegetación del humedal sigue un ciclo de crecimiento natural. En la fase de crecimiento en altura de la planta, parte del fósforo inorgánico es absorbido rápidamente por la planta. Una vez que este ciclo llega a su fin, las plantas comienzan a descomponerse y degradarse. Por este motivo, la práctica de la poda favorece el mantenimiento y funcionamiento del sistema, evitando la reincorporación de material al sistema (Vera, *et al.*, 2010).

En general, la remoción de fósforo por parte de las plantas representa una pequeña parte de la masa eliminada. No obstante, en los casos en los que el influente presenta bajas concentraciones, las plantas adquieren una mayor importancia, alcanzando valores del 20% de remoción en el sistema, o incluso valores superiores (Naranjo Ríos, 2017).

Por su parte, los microorganismos toman parte del fósforo inorgánico que es utilizado como nutriente, sin embargo, como el ciclo de vida es corto se retorna nuevamente al agua en fósforo orgánico disuelto y en fósforo suspendido (Naranjo Ríos, 2017).

Es importante destacar que a pesar de que la remoción biológica juega un papel importante en la remoción de fósforo, ya que la principal forma de eliminación en los HFSSH es la adsorción por parte del medio granular. Puesto que, estos sistemas son saturables, lo que significa que tienen una capacidad limitada y, por lo tanto, no pueden contribuir a largo plazo a la eliminación sostenible de fósforo. Una vez que estos sitios con capacidad de fijación de fósforo estén ocupados, no ocurrirán nuevas adsorciones (Dunne y Reddy, 2005; Sensu Vymazal, 2007). Por esta razón, la poda y la renovación del material del lecho juegan un rol importante para mantener niveles de eficiencia de remoción.

12.2 EXPERIENCIAS EN CLIMAS FRÍOS CON HFSSH

Debido a que los humedales son cuerpos expuestos a la intemperie, están fuertemente influenciados por el clima. Las lluvias, la fusión de nieve, la escorrentía, el congelamiento, las sequías

y la temperatura son parámetros que afectan el tratamiento del humedal (DuPoldt, *et al.*, 1995), especialmente cuando la pérdida de calor es un factor importante para el tratamiento de las AR.

Experiencias como la de Jenssen *et al.* (1993) muestran que la temperatura que sale desde la cámara séptica se encuentra por debajo de los 5°C en Noruega. No obstante, los HC continúan tratando las AR incluso cuando el clima es de estas características. Es crucial evitar el congelamiento del agua y la formación de una cobertura de hielo, ya que esto disminuiría el tiempo de retención hidráulica, aumentaría la velocidad del AR y reduciría el tiempo de contacto (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006). Al observar la capa de hielo, Jenssen *et al.* (1993) realizaron zanjas y observaron que el suelo no se congeló a pesar de que la temperatura oscilaba entre -10°C y -25°C. Esto se puede explicar porque algunas reacciones de descomposición y la actividad microbiana generan calor suficiente para evitar que la capa bajo la superficie se congele. Sin embargo, la tasa de remoción por microorganismos sí se vería afectada, disminuyendo su capacidad de tratamiento, especialmente para el nitrógeno y la materia orgánica (Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006).

No obstante, los HFSSH pueden ser fácilmente adaptados a estos climas, al proporcionar una mayor área de tratamiento (Jenssen, *et al.*, 1993). También, brindando protección adicional, ya sea natural o artificial (rocas, madera, plástico, etc.) (Ouellet-Plamondon, *et al.*, 2006). Otra propuesta es evitar la poda, especialmente durante el primer año de las plantas, para brindar una mayor protección al HFSSH (Jenssen, *et al.*, 1993).

12.2.1 EJEMPLOS DE HFSSH EN PEQUEÑA ESCALA

Si bien se han analizado los HC como una alternativa viable frente a los sistemas convencionales de tratamiento de AR, es imperante presentar algunos ejemplos de distintos autores que han evaluado la eficiencia de estos sistemas a escala domiciliaria, en particular los HFSSH.

En la última década, se han realizado estudios en América del Norte y Europa, que han demostrado la confiabilidad de los HFSSH en climas fríos, donde la temperatura presenta una gran variabilidad, siendo que se mantiene por debajo de los -3°C en invierno y por encima de los 10°C en temporada cálida. En el caso de los HFSSH estudiados por Wang, *et al.*, 2016, se observó una remoción del 81,4% de TSS, 83,9% de DBO₅ y 70,3% de DQO. En cuanto al nitrógeno total y el fósforo total, se alcanzó una remoción del 59% y 50%, respectivamente (Wang, *et al.*, 2016)

En el 2002, Steer *et al.* (2002) analizaron la performance de 21 humedales de flujo subsuperficial horizontal como tratamiento de efluentes posteriores a los efluentes provenientes de cámaras sépticas individuales en el norte de Ohio. Estos sistemas presentaban características

similares en cuanto al flujo y proximidad geográfica. En general, estos humedales trataban efluentes generados por familias compuestas de entre 1 a 7 personas, logrando las eficiencias de remoción de AR mostradas en el siguiente cuadro:

TABLA 8: EFICIENCIA DE UN HFSSH POST TRATAMIENTO DE CÁMARA SÉPTICA. EXTRAÍDO DE STEER ET AL., (2002) .

PARÁMETRO	PORCENTAJES DE REMOCIÓN EN EL ESTUDIO [%]
COLIFORMES FECALES	87,9±27,1%
TSS	55,8±52,8%
DBO ₅	70,3±48,5%
AMONIO	56,5±31,3%
FÓSFORO TOTAL	80,5±19,8%

Las temperaturas estacionales promedio para la región donde se encontraban estos humedales estudiados eran de $-0,3 \pm 2,8$ °C en invierno, $10,0 \pm 5,5$ °C en primavera, $22,2 \pm 1,3$ °C en verano y $12,7 \pm 5,4$ °C en otoño. Los resultados mostraron ligeras disminuciones (10%–20%) en las comparaciones de remoción de la DBO₅ y P_T durante el invierno al contrastarla contra las otras estaciones. Tales reducciones en la eficiencia se esperaban, ya que las plantas tienden a morir en invierno, y también la actividad microbiana se ve disminuida debido a las bajas temperaturas. No obstante, estos humedales de tratamiento unifamiliares obtuvieron eficiencias de reducción adecuadas para coliformes fecales, TSS y DBO₅, manteniendo generalmente los niveles de vertido por debajo de los límites establecidos por el ente regulador en esa región.

Los autores El-Khateeb & El-Bahrawy (2013) utilizaron un HFSSH con dimensiones de 1 m de ancho, 2 m de largo y 1 m de profundidad como post tratamiento primario de AR:

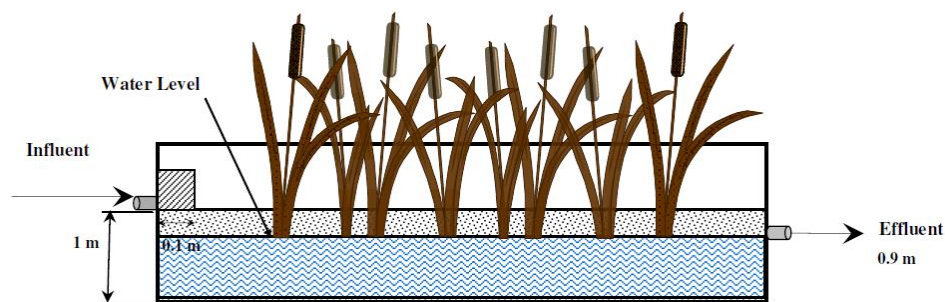


FIGURA 28: NOTA: HFSSH USADO POR EL-KHATEEB & EL-BAHRAWY (2013)

Los resultados se observan en la siguiente tabla:

TABLA 9: PORCENTAJES DE REMOCIÓN ALCANZADOS PARA LOS DISTINTOS COMPONENTES EN ESTUDIO.
EXTRAÍDO DE [EL-KHATEEB & EL-BAHRAWY \(2013\)](#).

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN EFLUENTE UASB	CONCENTRACIÓN EFLUENTE DEL HFSSH	% REMOCIÓN	TOTAL DE LA EFICIENCIA POR LA COMBINACIÓN DE TRATAMIENTOS %
DQO	mg*L ⁻¹	197	56,7	71	90,7
DBO ₅	mg*L ⁻¹	120	20,6	82,7	95,1
TSS	mg*L ⁻¹	79,3	5	93,7	97,8
N _T	mg*L ⁻¹	53	13,3	74,8	76,7
F _T	mg*L ⁻¹	4,5	3	33	
CF	NMP /100mL	1,6*10 ⁶	1,1*10 ¹	99,88	99,997

En el estudio realizado por Maehlum *et al.* (1995) en el clima frío de Noruega donde las temperaturas de invierno promedian por debajo de los -10°C, se diseñaron y evaluaron humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales de 10 Personas Equivalentes (PE). El sistema 1 consistía en dos fases, un tanque de 1m³ anaeróbico y otra HFSSH, con lecho de arcilla expandida. Es relevante destacar que debido al alto valor del tiempo de residencia hidráulica (14 días), el HFSSH presentaba grandes dimensiones, abarcando un área de 9 metros de ancho por 12 metros de largo.

En el artículo publicado, se presentaron las eficiencias de remoción mostradas en la siguiente tabla:

TABLA 10: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL SISTEMA 1. EXTRAÍDO DE MAEHLUM ET AL., (1995)

PARÁMETRO	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN [%]
DBO ₅	93
FÓSFORO TOTAL	98
NITRÓGENO TOTAL	48
DQO	54

Como se observó en las tablas anteriores, el HFSSH es un sistema robusto utilizado como tratamiento post cámara séptica. Los autores afirman que incluso 3 años después del inicio del tratamiento, se mantienen valores de remoción de DBO₅ y fósforo total mayor al 85%, a pesar de las condiciones climáticas frías. Además, es destacable que el HFSSH mantuvo su eficiencia incluso con una capa de nieve de 20-25 cm sobre el mismo humedal construido.

Otro ejemplo, son los casos de estudios en Minnesota de Henneck & Axler, donde se utilizaron HFSSH para tratar aguas residuales provenientes de una cámara séptica. El autor describe que los inviernos son severos donde las temperaturas del aire pueden alcanzar los -20°C y ocasionalmente los -40°C. Los sistemas trataban caudales de 0,95 m³*día⁻¹. Las eficiencias de remoción observadas se muestran en la tabla 11:

TABLA 11: VALORES DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS DE ENTRADA Y SALIDA DE UN HFSSH. EXTRAÍDO DE HENNECK & AXLER

PARÁMETRO	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN [%]
DBO ₅	92 en verano y 7 en invierno
FÓSFORO TOTAL	51 en verano y 20 en invierno
NITRÓGENO TOTAL	42

Durante el estudio los autores, se han encontrado con problemas operativos y de mantenimiento que no se anticiparon originalmente, sin embargo, concluyen que los humedales construidos de flujo subsuperficial ofrecen un potencial significativo para tratar eficazmente aguas residuales domésticas de pequeño caudal en áreas con suelos pobres o poco profundos, o con áreas de drenaje limitadas, especialmente en el clima frío del norte de Minnesota.

En Montreal existen alternativas en la construcción y diseño de los HFSSH como las que proponen Ouellet-Plamondon *et al.* (2006), quienes utilizaron un HFSSH con sistemas de aireación,

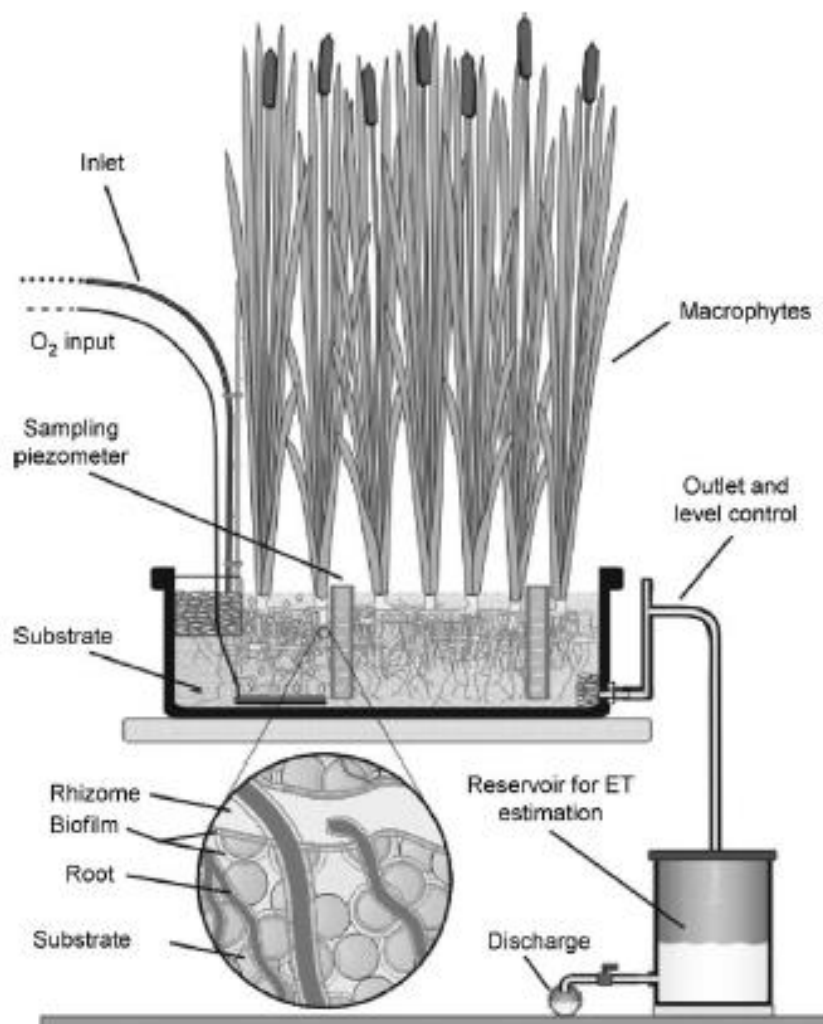


Fig. 1 – Section view of a mesocosm experimental unit.

FIGURA 29: NOTA: ILUSTRACIÓN DE UN HFSSH MODIFICADO. EXTRAÍDO DE OUELLET-PLAMONDON *ET AL.*, (2006) donde tenían dimensiones de 1,2m de largo, 0,8m de ancho y 0,3m de profundidad.

Durante el experimento, los investigadores controlaron de manera repetida la temperatura del agua y del aire en el invernadero, monitoreándolas automáticamente cada 15 minutos. Durante el invierno, se mantuvo un sistema de calefacción para evitar que la temperatura del aire cayera por debajo de los 5°C, evitando daños por heladas a los conductos y equipos. Además, se protegieron los mesocosmos del sol directo mediante sombra con una lona grande. En verano, la temperatura del agua de entrada se mantuvo a 5°C, pero se elevaba al llegar a los mesocosmos debido a la corta permanencia en el tanque distribuidor y el paso por bombas y tuberías.

Los resultados mostraron una eficiente remoción de contaminantes en los mesocosmos. Se logró una remoción del 95% de sólidos en suspensión, el 90% de la demanda química de oxígeno en la mayoría de los mesocosmos (excepto en aquel que no fue plantado ni aireado), y un 70% de N_T .

En otro estudio, Sudarsan *et al.* (2015) construyeron un HFSSH con dimensiones de 250x150x80 cm, con una caída del 0,01% y un caudal de entrada de $3 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$. Estos humedales recibieron agua residual pretratada en un tanque aeróbico, proveniente de una planta de tratamiento de efluentes. Se utilizaron tiempos de residencia hidráulica que variaron en 24, 48, 72, 96 y 120 horas. La siguiente figura muestra la configuración de estos HFSSH, que incluyó paredes de concreto impermeable que modificaron la circulación del agua residual.

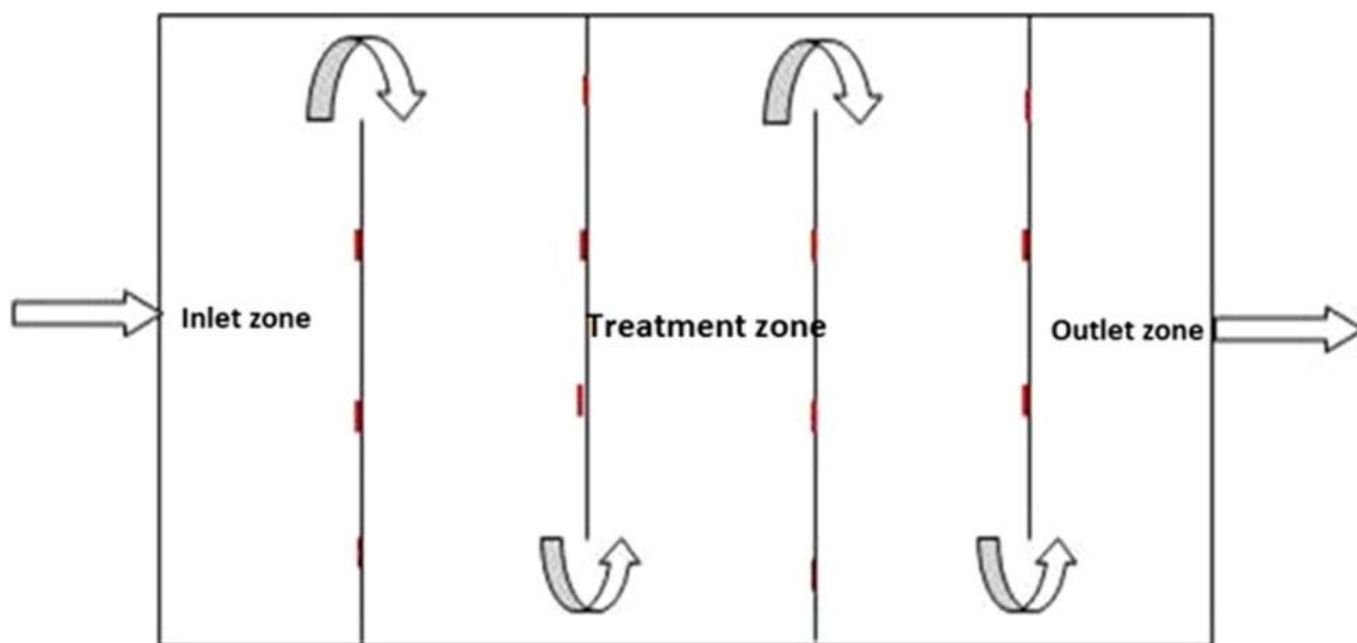


FIGURA 30: NOTA: DIAGRAMA DE FLUJO DE HFSSH DE SUDARSAN *ET AL.*, (2015)

Las remociones observadas fueron altamente satisfactorias, alcanzando un 75,99% de DBO_5 , un 76,16% de DQO, un 57,34% de sólidos en suspensión, un 62,08% de nitratos y un 58,03% de P_T .

Los climas en el Norte de América presentan variaciones estacionales, con veranos cálidos con temperaturas alrededor de los 20°C , mientras que los inviernos son fríos y con precipitaciones, con temperaturas que rondan los -3°C . A pesar de estas condiciones climáticas adversas, los autores

Rozema *et al.* (2016) encontraron que los tratamientos de efluentes agrícolas mediante HFSSH son una elección excelente para tratar DBO₅, TSS, E. Coli, coliformes fecales, N_T, sin una significativa reducción en la eficiencia del tratamiento durante el invierno. A continuación, se presentan algunos ejemplos de los resultados obtenidos

TABLA 12: EFICIENCIA DE LOS DISTINTOS HFSSH PARA DISTINTOS PARÁMETROS EVALUADOS. EXTRAÍDO DE ROZEMA ET AL., (2016)

PLANTA DE TRATAMIENTO (PERIODO DE INVESTIGACIÓN [AÑOS])	TIPO DE SISTEMA	T [°C]	DBO ₅ (AFLUENTE / EFLUENTE)	NITRÓGENO TOTAL (AFLUENTE / EFLUENTE)	FÓSFORO TOTAL (AFLUENTE / EFLUENTE)
LISTOWEL (4)	HFS	7	53/10	19/9	3.2/,6
MOESGARD (9)	HFSSF	8	92/14	47/26	6.5/4,5
RUGBALLEGARD	HFSSH	8	416/36	89/44	20/4
SNOGEROD	HFSSH	8	5.6/1,2	52/37	9,5/3,3
BARDU	Infiltración rápida	1	39/3,2	13/3	2/0,01

En los dos sistemas daneses, que recibían efluentes de cámaras sépticas, se observó una remoción particularmente efectiva de fósforo gracias al uso de arcilla con una carga hidráulica reducida de $0,02\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Por otro lado, en el caso de la DBO₅ y el N_T, se atribuyó su eficiente eliminación a la baja incorporación de oxígeno en el sistema. Un dato relevante es que, en el estudio de 109 HC analizados, se evidenció una mínima variación en la remoción de DBO₅ y TSS durante las fluctuaciones estivales. En cuanto a la remoción de N_T, se logró alcanzar un 30% en invierno y un 40% en verano.

Los HFSS, correctamente diseñados, se presentan como una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales. Esto se debe a que la degradación por parte de los microorganismos sigue siendo efectiva incluso a temperaturas inferiores a 5°C. Es importante destacar que la combinación adecuada de materiales y condiciones de operación en los HFSS favorece una alta eficiencia en la remoción de contaminantes, lo cual los convierte en una opción confiable y efectiva en el tratamiento de AR en diversas condiciones climáticas.

13 MARCO TEÓRICO: MODELADO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

El concepto "modelo", según la Real Academia Española, se refiere a un esquema teórico, generalmente matemático, que permite comprender y estudiar el comportamiento de sistemas complejos. El National Research Council (1990) lo define como un intento sistemático de traducir la comprensión conceptual de un sistema real en términos matemáticos e indica que la bondad del modelo matemático será mayor cuanto mayor sea la capacidad del modelo conceptual para reproducir los fenómenos más relevantes (Gargallo Bellés, 2017).

El estudio de la calidad del agua encuentra en los modelos matemáticos una herramienta de extraordinaria utilidad para comprender, simular, predecir y adoptar decisiones, en las mejores condiciones sobre la planificación y gestión óptima de los sistemas o entornos naturales (Belda Ibañez, 2015). Sin embargo, es crucial asegurar la validez y veracidad de los modelos para que sean efectivos en su aplicación.

Con el crecimiento de la implementación de humedales construidos en el tratamiento de aguas residuales, han surgido los primeros modelos matemáticos diseñados para simular su funcionamiento. Con el tiempo, el número y la variedad de estos modelos han aumentado considerablemente, lo que ha permitido un enfoque más preciso y específico en la comprensión de estos sistemas. (Gargallo Bellés, 2017).

Los modelos para la simulación de sistemas de tratamiento de aguas residuales se pueden clasificar en dos grupos: modelos empíricos y modelos mecanicistas. Los modelos empíricos generalmente se basan en ecuaciones analíticas o de regresión, tratando el sistema como una caja negra sin describir adecuadamente los procesos físicos, químicos o biológicos involucrados, ni considerar la heterogeneidad, los efectos de la dispersión y las zonas muertas. Por otro lado, los modelos mecanicistas se fundamentan en los procesos físicos, químicos y microbiológicos que rigen la operación del sistema (Dotro, *et al.*, 2021).

En el diseño de humedales construidos, los modelos mecanísticos pueden verse limitados por varios factores, incluida la estrategia operativa implementada en el sistema de tratamiento de humedales y las dificultades para medir las condiciones de contorno definitivas. Es por ello que existe la necesidad de desarrollar métodos simples pero efectivos para evaluar el desempeño general de una estrategia de control de la contaminación al diseñar HC.

Los métodos como el modelo de red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés) han surgido como poderosas herramientas. Las ANN pueden reconocer patrones de entrada y salida complejos que vinculan estas variables de entrada entre sí y con los valores de salida, lo que ha llevado al aumento de las implementaciones de ANN en múltiples campos (Zidan, *et al.*, 2015).

13.1 MODELOS “CAJA NEGRA”

Los modelos de caja negra son herramientas útiles para simular y predecir el comportamiento de los humedales construidos. Estos modelos permiten simular la calidad del efluente basándose en las características del caudal de entrada, sin necesidad de considerar los procesos internos que ocurren en el sistema (Rousseau, *et al.*, 2004). Su aplicación resulta especialmente valiosa para el diseño óptimo, mejora del desempeño y reducción de los costos de construcción y operación de los HC (Liolios, *et al.*, 2016).

Dentro de las diversas tipologías de modelos de caja negra se encuentran:

- ❖ Regresiones lineales;
- ❖ Ecuaciones de primer orden;
- ❖ Serie de tanques;
- ❖ Redes neuronales artificiales;

13.1.1 MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL

La mayoría de las investigaciones se basan en información de entrada/salida, comúnmente conocidos como "**modelos I/O**", en lugar de centrarse en la información proporcionada por los procesos internos del sistema (Kumar & Zhao, 2011). Estos modelos empíricos desarrollan relaciones para determinar la concentración de salida (C_{out}) a partir de la concentración de entrada (C_{in}) (Gargallo Bellés, 2017). Sin embargo, en estos enfoques se tiende a despreciar factores importantes como el clima, el material, el tamaño y la profundidad del lecho, lo que puede generar dudas sobre las variables de diseño (Rousseau, *et al.*, 2004).

Este tipo de modelos sigue la siguiente estructura:

ECUACIÓN 6

$$C_{out} = m * C_{in} + n$$

m	Parámetros calibrados empíricamente
n	
C_{in} concentración de un componente determinado en la entrada [mg/L]	
C_{out} concentración de un componente determinado en la salida [mg/L]	

Estos modelos son simples y muy útiles a la hora de predecir la eficiencia de los HC, ya que, la regresión lineal busca encontrar una línea recta que mejor se ajuste a los datos para predecir los valores de salida. Cabe destacar que este tipo de modelado puede ser utilizado en aquellos HC de características similares (Stefanakis, *et al.*, 2014).

13.1.2 MODELOS DE PRIMER ORDEN – MODELO K-C*:

Los modelos de primer orden, conocidos como modelos K-C, se utilizan principalmente en el diseño y análisis de humedales para el tratamiento de aguas residuales. Estos modelos se basan en ecuaciones que describen la relación exponencial que se establece entre la concentración del efluente e influente, así como con las constantes de descomposición (K) y el caudal (Q). Esta relación permite predecir el comportamiento del humedal bajo condiciones de flujo tipo pistón y condiciones constantes. El parámetro "K" engloba diversos factores que influyen en los procesos del humedal, como el transporte de masa, la volatilización y la adsorción, entre otros (Stein, *et al.*, 2006).

Existen dos formas principales de las ecuaciones K-C, una específica de descomposición de área y otra específica de volumen. Estas ecuaciones predicen una relación exponencial entre las concentraciones de entrada y salida del humedal. La constante volumétrica (K_V) se aplica principalmente a los humedales de flujo subsuperficial, mientras que las constantes de área (K_A) se consideran más útiles para los humedales construidos de superficie libre (Mitchell & McNevin, 2001). Estas ecuaciones se expresan de la siguiente manera (Kumar & Zhao, 2011; Rousseau, *et al.*, 2004; Vymazal & Kröpfelová, 2008):

:

ECUACIÓN 7: "A" Y "B"

$\frac{C_{out}}{C_{in}} = e^{-\frac{K_A}{q}}$	K_A la constante superficial de degradación del componente estudiado [m/d]
	C_{in} concentración de un componente determinado en la entrada [mg/L]
	C_{out} concentración de un componente determinado en la salida [mg/L]
$\frac{C_{out}}{C_{in}} = e^{-K_V TRH}$	q [m/d] es la carga hidráulica. Donde $q=Q [m^3/d] / A [m^2]$
	K_V constante volumétrica de degradación [m/d]
	TRH Tiempo de retención hidráulico [d]

En cierto modo, los humedales reales pueden experimentar fluctuaciones en el caudal y la concentración en los almacenamientos internos, lo que puede introducir incertidumbre en el modelo. Incluso, la biogeoquímica de los humedales construidos es compleja, y existe una amplia variación en la concentración de materia orgánica en el influente entre diferentes partes del sistema y a lo largo del tiempo. Por lo tanto, las diferentes técnicas de medición de la materia orgánica dificultan las generalizaciones basadas en datos de campo y complican los esfuerzos para comprender la cinética del tratamiento. Se puede agregar que el clima y el mismo factor del ecosistema juegan un rol que provoca cambios en el tratamiento de aguas residuales con HC (Kumar & Zhao, 2011). Por otro lado, los valores bibliográficos de las constantes K_A y K_V presentan una gran amplitud, con diferencias de hasta 36 veces su valor (Rousseau, *et al.*, 2004). Cabe destacar que las llamadas "constantes" no parecen ser constantes en absoluto, sino que dependen de las concentraciones del afluente, la tasa de carga hidráulica y la profundidad del lecho (Rousseau, *et al.*, 2004).

A pesar de todas las cuestiones anteriormente destacadas y debido a la falta de modelos estándar aceptados, los modelos de primer orden K-C son ampliamente utilizados para predecir el rendimiento y realizar diseños de humedales (IWA, 2000; USEPA, 2000).

Una variante de este modelo es la inclusión de la concentración de fondo, C^* . Esto permite que el modelo se ajuste mejor a los diferentes componentes en estudio (Delgadillo, *et al.*, 2010). Se entiende por C^* a la mínima concentración de un componente determinado que se puede alcanzar en el efluente de un humedal artificial, y está asociada a procesos autóctonos del sistema y/o a la liberación del componente en cuestión desde el sedimento (Gargallo Bellés, 2017). La expresión habitualmente utilizada para representar este modelo es la siguiente (Vymazal & Kröpfelová, 2008):

ECUACIÓN 8

$$\frac{C_{out} - C^*}{C_{in} - C^*} = e^{(-K_A/q)}$$

K_A la constante superficial de degradación del componente estudiado [m/d]

C_{in} concentración de un componente determinado en la entrada [mg/L]

C_{out} concentración de un componente determinado en la salida [mg/L]

q [m/d] es la carga hidráulica. Donde **$q=Q/A$** [m^3/d]/[m^2]

C^* concentración de fondo

En otras palabras, este modelo permite incorporar una concentración de fondo o residual, que a diferencia del enfoque del modelo antes mencionado que converge hacia cero. La inclusión conceptual de C^* considera varios factores, como la generación de materia orgánica dentro del humedal, la entrada de fuentes atmosféricas o del suelo, y la existencia de una fracción recalcitrante de materia orgánica en el influente, que puede ser considerado como un parámetro empírico ante la ausencia de datos que cuantifiquen esta variable (Kadlec, 2000).

En resumen, las ecuaciones K-C son una herramienta importante en el modelado de humedales de tratamiento, pero es esencial considerar sus limitaciones y ajustar el enfoque según las condiciones específicas del sistema.

13.1.3 TANQUES EN SERIE:

El modelo de Tanques en Serie (TIS, por sus siglas en inglés) es un modelo desarrollado por Kadlec *et al.* (2000). Este modelo caracteriza la descarga del contaminante en función de la Distribución de los Tiempos de Detención (DTD). Esta variable general del humedal es función de la densidad de la vegetación, el tamaño del humedal, topografía del humedal y variables ambientales (Defo, *et al.*, 2017). En otras palabras, la DTD describe cómo el agua se distribuye en diferentes tiempos de residencia en el sistema de tratamiento. En algunas partes puede el AR pasar rápidamente a través del sistema y salir en poco tiempo, mientras que otras partes puede permanecer más tiempo antes de salir. Esta distribución de tiempos de retención es una medida de la heterogeneidad del flujo dentro del sistema.

La importancia de la DTD radica en que afecta directamente la eficiencia del tratamiento del humedal. Una DTD más prolongada permite una mayor retención de contaminantes, lo que favorece la degradación de los mismos mediante procesos naturales, como la absorción por la vegetación y la actividad microbiana en el sustrato.

El modelo TIS divide al humedal en N -tanques en serie, donde N es el número de compartimentos de iguales dimensiones. En cada uno de estos compartimentos, la concentración del contaminante en la salida se reduce a medida que avanza al siguiente tanque, como muestra la siguiente ilustración (Kadlec & Wallace, 2008).

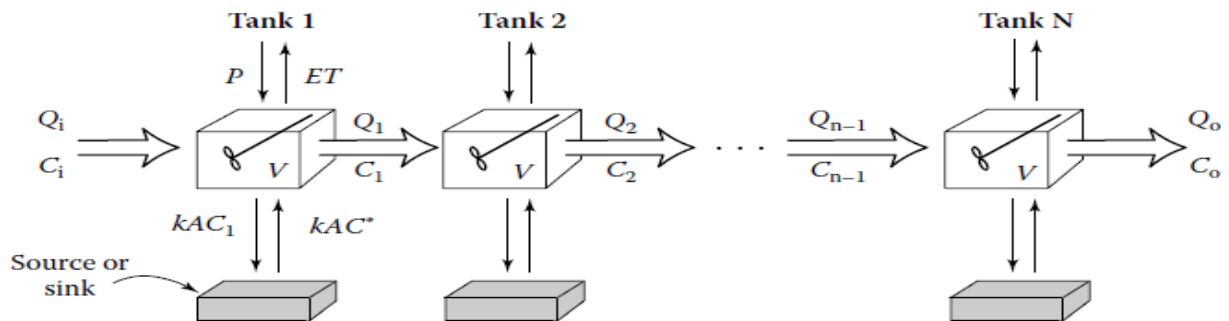


FIGURA 31: NOTA: REPRESENTACIÓN DEL MODELO TIS. EXTRAÍDO DE KADLEC, (2000)

La ecuación que describe la imagen anterior de forma simplificada es la siguiente (Kadlec & Wallace, 2008):

$$\frac{C - C^*}{C_i - C^*} = \left(1 + \frac{k * \tau * y}{Nh}\right)^{-N}$$

ECUACIÓN 9

τ = tiempo medio de detención

N = número de tanques

h = profundidad del humedal

K = constante de degradación

y = distancia fraccional a lo largo del humedal

Cuando “ N ” se hace muy grande, la distribución se convierte en la distribución de flujo pistón (FP), y toda el agua sale después de exactamente un tiempo de detención. Los valores publicados en la literatura son $N = 4,1 \pm 0,4$ para humedales HFS y $N = 11,0 \pm 1,2$ para humedales HFSS (Kadlec & Wallace, 2008).

13.1.4 REDES NEURONALES ARTIFICIALES (ANN)

Las redes neuronales artificiales son un tipo de modelo ampliamente utilizado en el campo del tratamiento de aguas residuales y, más específicamente, en el modelado de humedales construidos. Estas redes se consideran "Black box" debido a que operan sin conocer la estructura interna o los procesos subyacentes del sistema que están modelando. A pesar de su complejidad, su diseño se asemeja al funcionamiento de las redes neuronales biológicas del cerebro humano, aunque en una escala mucho más simplificada.

En el contexto de los humedales construidos, las ANN se utilizan para predecir la eficiencia de remoción de contaminantes en función de diversos parámetros del sistema. Para ello, se les suministra datos de entrada, como la geometría del humedal, el tipo de sustrato, el caudal y la concentración de contaminantes en el influente. Estos datos se procesan a través de múltiples capas ocultas dentro de la ANN, utilizando funciones de activación que introducen no linealidad en el modelo. La elección del tipo adecuado de ANN depende de la naturaleza del problema y la disponibilidad de datos. Una configuración popular es el perceptrón multicapa (MLP), que consta de una capa de entrada, una o varias capas ocultas de procesamiento y una capa de salida. Esta estructura jerárquica permite a la red capturar y aprender patrones complejos y no lineales en los datos de entrada, mejorando así la precisión de las predicciones.

En términos más simples, la información de entrada "x" se multiplica por los pesos "W" y se suma. Esta sumatoria ponderada de las entradas se la asocia a la etapa de función de entrada:

ECUACIÓN 10: "U(X)" REPRESENTA LA SUMA PONDERADA DE LOS VALORES DE ENTRADA "XI" MULTIPLICADOS POR SUS RESPECTIVOS PESOS "WI".

$$u(x) = \sum_{i=1}^n w_i * x_i$$

A esta sumatoria se le aplica una función activación "f(u(x))" para transformar el valor obtenido dentro de un rango comparable al umbral (θ). Por ejemplo, si la suma ponderada es mayor que el umbral, la neurona se activa y envía una señal a la siguiente capa de la red; de lo contrario, si la suma ponderada es menor al umbral, la neurona permanece inactiva y no envía ninguna señal.

Un ejemplo común de función de activación es la función escalón. En esta función, solamente se activa si la suma ponderada sobrepasa el valor umbral, por ejemplo 1. Caso contrario, envía un valor de 0.

ECUACIÓN 11

$$y = f(u(x)) = \begin{cases} 1, & u(x) \geq \theta \\ 0, & u(x) < \theta \end{cases}$$

Gráficamente donde la salida de la neurona cambia abruptamente cuando se alcanza el umbral o se supera cierto valor límite:

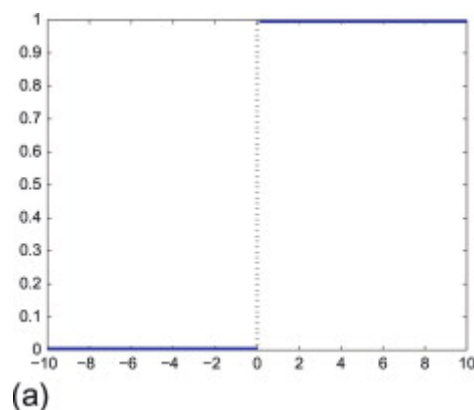


FIGURA 32: NOTA: EJEMPLO DE FUNCIÓN QUE DETERMINA SI LA NEURONA SE DEBE ACTIVAR O APAGAR. EXTRAÍDO DE LIWA (2006)

Gráficamente el proceso puede ser representado de la siguiente forma:

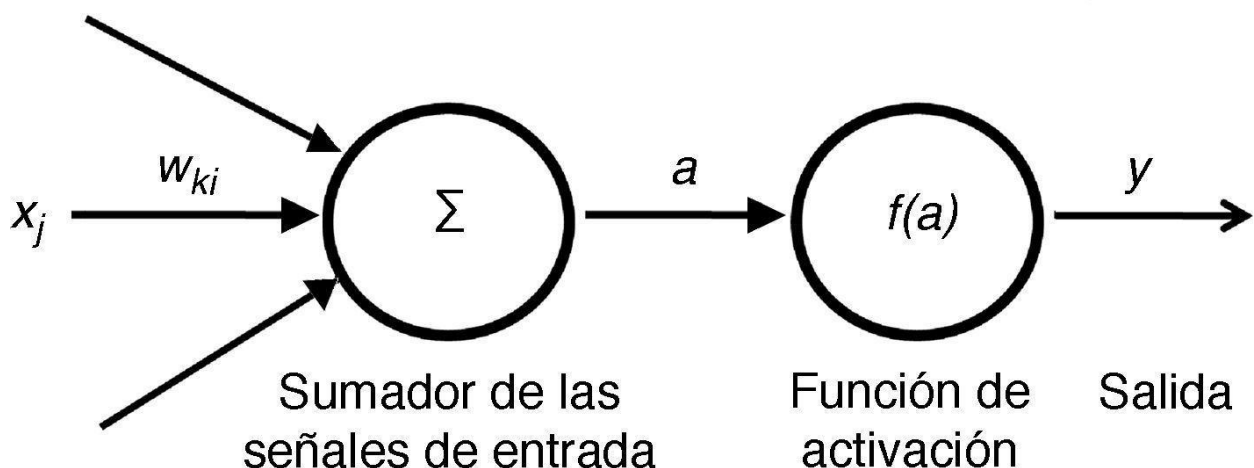


FIGURA 33: NOTA: ILUSTRACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RED NEURONAL. EXTRAÍDO DE LA REVISTA "ELSEVIER"

El proceso de entrenamiento de una ANN implica ajustar los pesos de las conexiones entre las neuronas para que la red pueda aprender y realizar predicciones precisas. Esto se logra mediante algoritmos de aprendizaje, como la retropropagación, que minimizan la diferencia entre las salidas predichas por la red y las salidas reales conocidas del sistema (Lin *et al.*, 2008). A medida que la ANN se entrena, ajusta gradualmente sus pesos para mejorar su capacidad y hacer predicciones precisas en nuevos datos.

13.1.4.1 MODELO PROPUESTO POR AKRATOS ET AL.

Akratos y sus colaboradores, obtienen una serie de ecuaciones que incorporan parámetros con una mayor influencia en la eficiencia de la remoción de contaminantes en humedales.

Los resultados obtenidos en sus trabajos indicaron que, en general, la porosidad del medio, la temperatura y el tiempo de residencia hidráulica son los parámetros más significativos en términos de su impacto en la eficiencia del humedal para la remoción de diferentes agentes contaminantes.

Para entender la construcción de las mismas se da un resumen de la información de los trabajos publicados de Akratos y sus colaboradores en las siguientes secciones.

13.1.4.1.1 DESCRIPCIÓN DE LOS HUMEDALES UTILIZADOS POR AKRATOS 2007.

Cinco humedales construidos a escala piloto, similares en diseño y funcionamiento fueron presentados por Akratos y Tsihrintzis (2007). Estos eran tanques rectangulares con dimensiones de 3m de longitud, 0,75m de ancho y 1m de profundidad. Las cinco unidades a escala piloto contenían tres tipos diferentes de medios porosos:

- **Grava mediana** (GM, $D_{50}=15,0$ mm, rango 4–25 mm): los obtuvieron de una cantera. Los elementos principales: Si 3,39%; Al 0,90%; Fe 0,82%; Ca 27,20%; Mg 4,53%; P 0,03%;
- **Grava fina** (GF, $D_{50}=6$ mm, rango 0,25–16,0 mm): los obtuvieron de un lecho de río en la zona del trabajo con origen de rocas ígneas. Los elementos por lo que estaba compuesto eran de Si 28,50%; Al 7,95%; Fe 4,22%; Ca 3,62%; Mg 1,76%; P 0,11%.
- **Cantos rodados** (CR, $D_{50}=90$ mm, rango 30–180 mm): los obtuvieron de un lecho de río en la zona del trabajo con origen de rocas ígneas. Los elementos por lo que estaba compuesto eran de Si 28,50%; Al 7,95%; Fe 4,22%; Ca 3,62%; Mg 1,76%; P 0,11%.

Los autores utilizaron dos tipos de plantas, siendo estos, carrizo común (PA, *Phragmites australis*) y espadañas (TL, *Typha latifolia*). Cabe mencionar que una de las unidades no fue sembrada denominándola como “sin plantas” (Z). Por lo tanto, las cinco unidades de humedales construidos se representan como: GM-PA, GM-TL, GM-Z, GM-TL y CR-TL, donde la primera parte de la notación implica el tipo de medio poroso y la segunda parte el tipo de planta.

El agua residual sintética fue diseñada para simular las características del agua residual doméstica (Akratos y Tsihrintzis, 2007). No obstante, a pesar que no simula completamente el agua residual real debido a la falta de sólidos en suspensión y materia coloidal, en estos experimentos el autor explica que el propósito principal era observar el efecto de la vegetación y el medio poroso en el tratamiento. Cabe destacar que, los humedales construidos de flujo horizontal generalmente funcionan después de un pretratamiento (por ejemplo, tanques de decantación, tanques Imhoff, CS, etc.) o siguen a otros sistemas de humedales construidos (por ejemplo, sistemas de flujo subsuperficial vertical), donde los sólidos en suspensión y la materia coloidal se eliminan parcialmente. Además, el agua residual sintética presenta ventajas frente a las reales al minimizar las variaciones en las características del influente y es más segura para las personas en el laboratorio, como también resuelve el problema de transferir volúmenes significativos de agua residual desde una planta de tratamiento distante.

El agua residual sintética contenía sustancias orgánicas y una fuente de nitrógeno, fósforo y otros elementos. Se utilizaron sustancias como la peptona, el azúcar de caña y el ácido acético para simular las sustancias orgánicas. Se agregaron fosfato de potasio hidrogenado (K_2HPO_4) y urea para agregar fósforo y el nitrógeno, respectivamente.

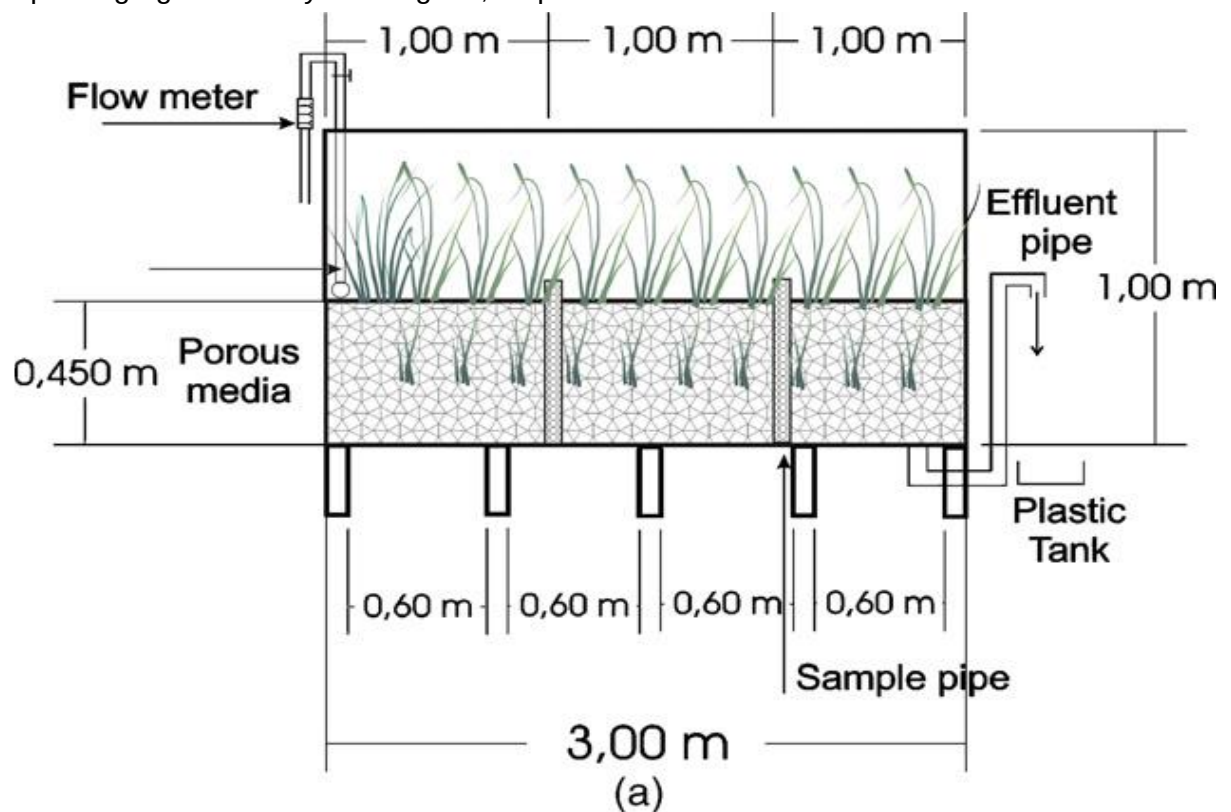


FIGURA 34: NOTA: EJEMPLO DEL HC DISEÑADO POR AKRATOS. EXTRAÍDO DE AKRATOS Y TSIHRINTZIS (2007).

13.1.4.1.2 COMPONENTES QUE INFLUYEN EN LA REMOCIÓN DE LOS CONSTITUYENTES DEL AR.

A lo largo del proceso de producción del modelo, uno de los pasos críticos es la selección adecuada de las variables que puedan explicar de manera satisfactoria la eficiencia de remoción. Para abordar este desafío, el autor aplicó una técnica multivariable lineal conocida como Análisis de Componentes Principales (ACP). Esta técnica resultó altamente útil para reducir la cantidad de parámetros altamente correlacionados, lo que permitió obtener una representación más compacta y significativa de los datos.

El algoritmo utilizado para el Análisis de Componentes Principales es el "Nonlinear Iterative Partial Least Squares" (NIPALS, por sus siglas en inglés). Este algoritmo es iterativo y busca encontrar cada variable principal a la vez, a través de regresiones iterativas de las proyecciones de los datos originales en el eje del componente principal. Se repite este proceso hasta determinar el mejor eje con los mejores factores de carga.

En el ACP que realiza (Akratos *et al.*, 2008) en sus diferentes estudios evaluó los coeficientes de correlación entre cada variable que se consideró candidata. Estas incluyeron: temperatura del agua residual, TRH, estacionalidad o mes, porosidad, $\frac{D_{50}}{(D_{max}-D_{min})}$, superficie específica inversa definida como $\frac{1}{S} = \frac{D_{50}}{(D_{max}-D_{min})*(1-n)}$, tipo de planta, tamaño del material poroso, contenido de Aluminio, datos meteorológicos, pH, conductividad y OD.

Para el caso de la DBO₅ y DQO, encontraron tres parámetros principales que explican aproximadamente el 83% de la variabilidad en el conjunto de datos original. El primer componente principal se reconoce como el grupo de "parámetros del humedal". Todas las variables en este grupo tienen grandes factores de carga en el primer componente principal, lo que implica que cualquiera de ellas podría utilizarse como variable de entrada para la ANN. Pero solamente se requiere 1 de ellas para el modelado, debido a su alta correlación. De estas variables, seleccionaron la porosidad como entrada para la ANN, porque es la más conveniente para el diseño y la más universal. La tabla siguiente muestra este análisis:

TABLA 13: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES QUE EXPLICAN LA REMOCIÓN DE DBO₅ EN LOS HSSFH.
EXTRAÍDO DE AKRATOS, ET AL., 2008.

COMPONENTE	1	2	3
MES	0,013	-0,846	0,030
TEMPERATURA	-0,004	0,728	-0,525
TRH	-0,006	0,492	0,829
POROSIDAD	-0,958	0,000	0,005
$\frac{D_{50}}{(D_{max} - D_{min})}$	-0,947	-0,009	-0,003
TIPO DE MATERIAL	0,969	0,007	0,003
TIPO DE PLANTA	0,771	0,006	0,003

En cuanto al segundo componente principal, tanto la temperatura del agua residual como el mes tienen factores de carga elevados, pero se seleccionó la temperatura como variable de entrada para la ANN, porque es la elección más convencional. El tercer componente principal está evidentemente relacionado con el TRH.

Para el caso del fósforo, el autor explica que la temperatura y el mes mostraron un coeficiente de correlación relativamente alto entre sí (es igual para el caso del nitrógeno). Por otro lado, el TRH tiene coeficientes de correlación relativamente bajos tanto con la temperatura como con el mes. De este modo se refleja que estos parámetros independientes que se pueden utilizar en la construcción del modelo.

Se diferenció un grupo de seis parámetros que estaban compuestos por la porosidad, $\frac{D_{50}}{(D_{max} - D_{min})}$, 1/S, material, contenido de Aluminio y planta, llamados “parámetros del humedal” para el caso del fósforo. Esto indica una fuerte relación entre ellos, pero también muestran una alta dependencia de la eliminación de PO₄-P, por lo que es imperativo usar solo uno de ellos en la construcción de cualquier modelo.

Al hacer el análisis de estas variables mencionadas, la superficie específica inversa se seleccionó como la variable de entrada del ANN, porque es una variable universal y es importante para el proceso de eliminación de PO₄-P principalmente basado en sorción.

TABLA 14: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LA REMOCIÓN DE P_T EN HFSSH. EXTRAÍDO DE AKRATOS, ET AL., 2009

COMPONENTE	1	2	3
MES	-0,004	-0,846	0,030
TEMPERATURA	-0,001	0,728	-0,525
TRH	-0,001	0,492	0,829
POROSIDAD	0,929	0,005	0,006
$\frac{D_{50}}{(D_{max} - D_{min})}$	0,891	-0,003	-0,03
1/S	0,949	-0,001	-0,001
TIPO DE MATERIAL	-0,969	0,002	0,002
CONTENIDO DE ALUMINIO	-0,969	0,002	0,002
TIPO DE PLANTA	-0,712	0,002	0,001

Para el segundo componente principal seleccionaron la temperatura del agua residual porque además del resultado del ACP, al compararla con la estacionalidad expresada por el mes esta es la elección más convencional. El tercer componente principal está relacionado con la TRH.

En el caso del nitrógeno, el autor observó que a partir del cálculo del coeficiente de correlación, las variables fuertemente correlacionadas con la eliminación fueron: TRH, temperatura del agua residual, porosidad y $\frac{D_{50}}{(D_{max}-D_{min})}$.

Se identificaron un grupo de cuatro parámetros como porosidad, $\frac{D_{50}}{(D_{max}-D_{min})}$, tipo de material y tipo de planta, denominados "parámetros de la unidad de humedal", con coeficientes de correlación elevados. Por lo que, estos parámetros estaban fuertemente relacionados entre sí y también mostraban una alta dependencia con la eliminación de N_T , por lo que el uso de solo uno de ellos en la construcción de cualquier modelo era imperativo.

De esta forma, se seleccionó la porosidad como entrada para la ANN, porque es la más conveniente para el diseño y la más universal. En cuanto al segundo componente principal, tanto la temperatura del agua residual como el mes tienen grandes factores de carga, pero se utilizó la temperatura como variable de entrada en la ANN, porque esta es la elección más convencional. Los efectos estacionales expresados por el mes se utilizaron como entrada en una ANN alternativa, que no se muestra en este trabajo. El tercer componente principal está evidentemente

relacionado con TRH. En consecuencia, hubo tres variables de entrada en el ANN simple, a saber, porosidad, temperatura del agua residual y TRH.

TABLA 15: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LA REMOCIÓN DE N_T . EXTRAÍDO DE AKRATOS, ET AL., 2008.

COMPONENTE	1	2	3
MES	0,000	0,848	0,036
TEMPERATURA	0,008	0,721	-0,529
TRH	-0,001	0,499	0,826
POROSIDAD	-0,862	0,008	0,017
$\frac{D_{50}}{(D_{max} - D_{min})}$	-0,805	-0,003	-0,001
TIPO DE MATERIAL	0,887	0,003	-0,001
TIPO DE PLANTA	0,860	0,005	0,012

13.1.4.1.3 MODELADO MEDIANTE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (ANN)

Akratos en sus tres estudios proponen dos ANNs. Para cada estudio, siempre la primer ANN tiene tres variables de entrada que fueron identificadas en el ACP de la sección anterior. El segundo ANN es una alternativa que incluye varias variables adicionales, en un esfuerzo por capturar los efectos de la composición del material del sustrato y los parámetros hidrológicos. Los tres componentes para cada componente de estudio fueron, en resumen:

- **DBO₅**: la porosidad, la temperatura del agua residual y TRH;
- **FÓSFORO**: superficie específica inversa (1/s), temperatura y TRH;
- **NITRÓGENO**: porosidad, la temperatura y el TRH.

En el trabajo realizado por Akratos, se empleó una sencilla red neuronal de propagación hacia adelante, también conocida como Perceptrón Multicapa (MLP) que es quizá la más utilizada en modelización hidrológica. Esta red constaba de 3 variables de entrada, donde cada uno de estos componentes presentaba diferentes pesos de conexión, una capa oculta con 3 unidades de procesamiento y una única salida.

En el análisis de DBO_5 , la sensibilidad de la ANN a cambios en los parámetros de entrada confirmó las conclusiones extraídas del estudio. Al realizar una superficie que representa la sensibilidad a las variables de TRH y temperatura, se encontró que la ANN es altamente sensible a los cambios en el TRH, aunque también es sensible a los cambios en la temperatura del agua residual. Esto se puede ver reflejado en la siguiente figura:

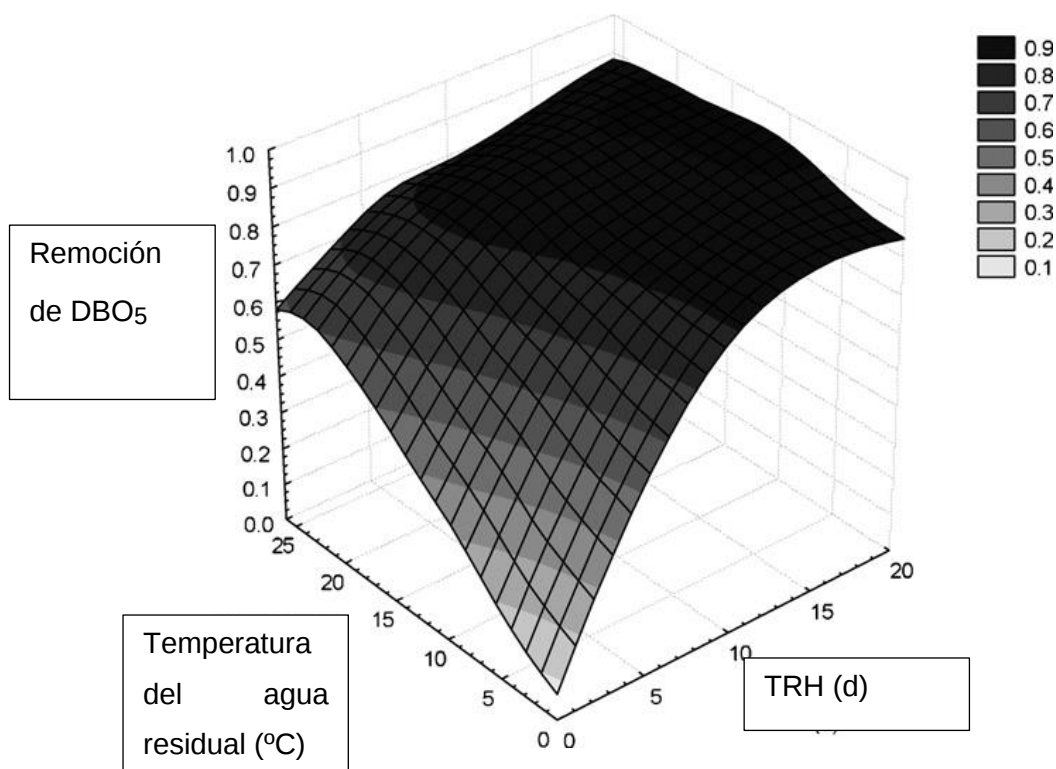


FIGURA 35: NOTA: SUPERFICIE REMOCIÓN DE DBO_5 PARA TRH Y TEMPERATURA. EXTRAÍDO DE AKRATOS, ET AL., 2008.

Para el caso del **fósforo total**:

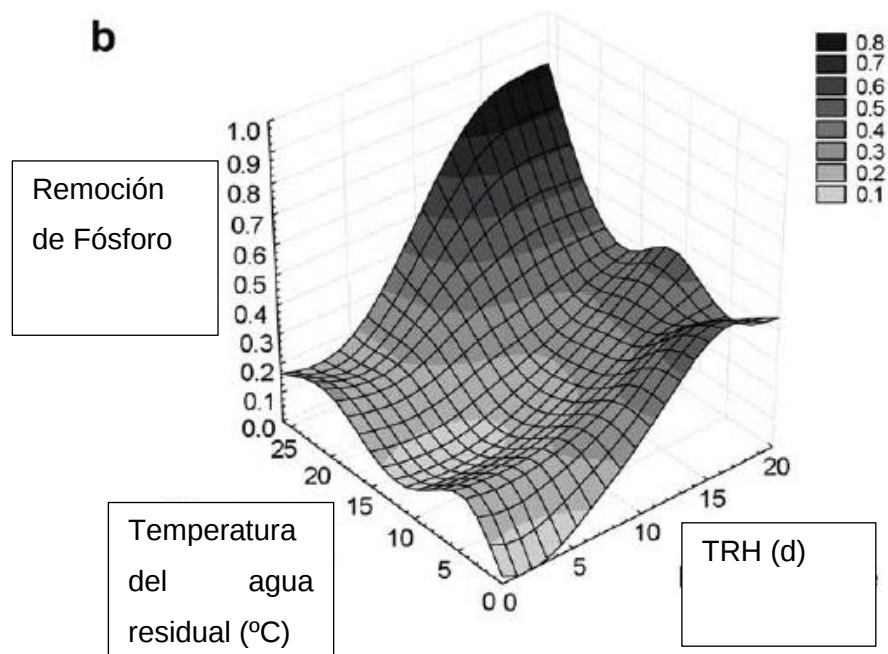


FIGURA 36: NOTA: SUPERFICIE REMOCIÓN DE P_T PARA TRH Y TEMPERATURA. EXTRAÍDO DE AKRATOS, ET AL., 2009.

La ilustración muestra que a medida que se aumenta el TRH, la eficiencia en la eliminación del fosfato inorgánico soluble en agua aumenta significativamente, especialmente a temperaturas elevadas. Sin embargo, llega un punto en el que el aumento adicional en el TRH tiene un impacto limitado en la mejora de la eliminación de PO_4-P .

Para el caso del **nitrógeno total**, se encontró que la ANN era más sensible a los cambios en el TRH, pero también era sensible a cambios en la temperatura del agua residual. Esto se lo ilustró a continuación:

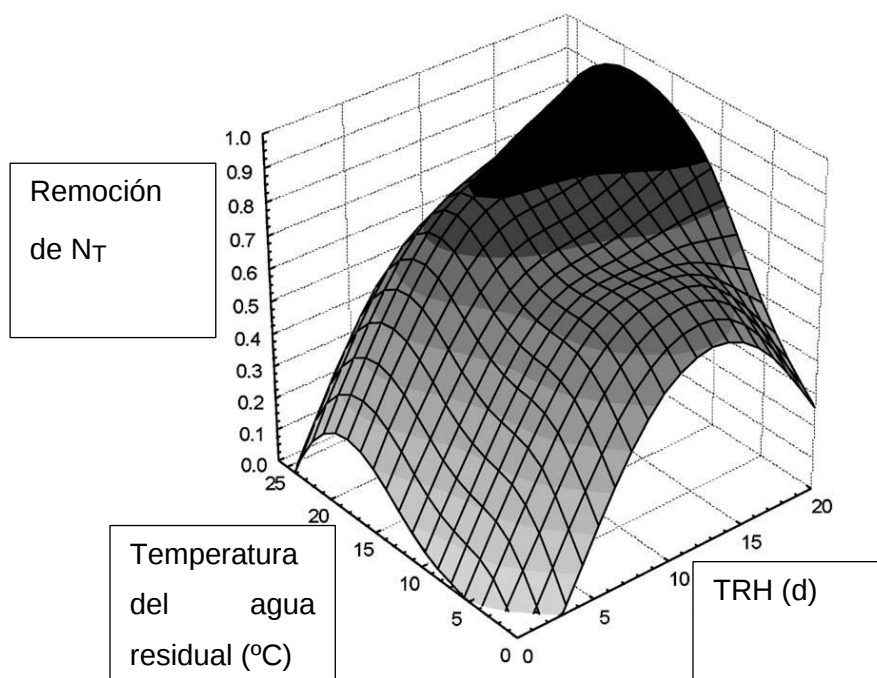


FIGURA 37: NOTA: SUPERFICIE REMOCIÓN DE N_T PARA TRH Y TEMPERATURA. EXTRAÍDO
. AKRATOS, ET AL., 2009.

La curva de respuesta de la ANN para el TRH tiene una forma hiperbólica y combina cinética de primer orden y de orden cero, lo que también se observó para la DBO₅ según Akratos *et al.*

Una vez finalizada la ANN para la remoción de los distintos contaminantes, Akratos confecciona una ecuación para las remociones de los diferentes parámetros analizados que resumen la información obtenida y práctica para el diseño de humedales de aguas residuales.

13.1.4.1.4 ECUACIONES DE REMOCIÓN PROPUESTAS POR AKRATOS.

La ecuación general obtenida por estos autores a partir de sus investigaciones es la siguiente:

TABLA 16: ECUACIONES Y PARÁMETROS CALCULADOS PARA LOS DIFERENTES COMPONENTES PRINCIPALES COMPONENTES. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE LOS ARTÍCULOS PUBLICADOS POR AKRATOS.

ECUACIÓN GENERAL PARA LA REMOCIÓN DE LOS DISTINTOS COMPUESTOS ESTUDIADOS.	DBO₅	$K_{DBO} = \left(\frac{22,8}{T}\right)$	T= temperatura [°C]
	DQO	$K_{DQO} = \left(\frac{15,0}{T}\right)$	n=porosidad
	N_T	$K_{N_T} = \left(\frac{22,8}{T}\right) * 45,5 * \left(\frac{n}{1-n}\right)^3$	1/S es el área específica inversa
	P_T	$K_{P_T} = \frac{22,8}{T} * 1,7 * \left(\frac{1}{S}\right)^2$	$\frac{1}{S} = \frac{D_{50}/(D_{max} - D_{min})}{1-n}$

Además, estos autores validaron sus datos tanto con respecto a sus propios humedales como con los datos observados en distintos trabajos realizados por otros autores, obteniendo buenos resultados de validación.

13.1.4.1.5 VALIDACIÓN DEL MODELO FRENTE A DATOS DE OTROS ESTUDIOS

Akratos realiza la constatación del modelo de predicción de remoción de contaminantes por medio de las ANN frente a datos disponibles y publicados de otros autores asumiendo algunas suposiciones e interpretaciones de datos. Además, cabe mencionar que, si bien todos eran todos HFSSH, cada uno de ellos trataba diferentes tipos de aguas residuales que se muestran a continuación:

TABLA 17: ESTUDIOS UTILIZADOS PARA LA VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES DE AKRATOS. ELABORADO A PARTIR DE (AKRATOS & TSIHRINTZIS, 2007).

USO	T [°C]	TRH [d]	n [%]	DBO ₅		N _T		P _T	
				[mg*L ⁻¹]	R [%]	[mg*L ⁻¹]	R [%]	[mg*L ⁻¹]	R [%]
Tratamiento diario de aguas residuales de granjas	15	2	37	57	60-92			45-93	35-37
Unidades aguas abajo de estanques de estabilización que reciben aguas residuales domésticas	25,5	6-12,5	40	25-100	72-82	13-30	48-56		
Aguas residuales crudas municipales	5 -22	4,7	33	340-485	83-97	52-65	28-51	13-30	30-33
Mezcla 2.3:1 de efluente de sala de ordeño y aguas residuales domésticas	15	10	30 y 33	451	89-94	65	40-48	43-46	27-30
Aguas residuales domésticas de hogares individuales	7 -30	3,7-6,7	38 y 40	73-562	55-85				
Aguas residuales municipales con sedimentación primaria	15	1,7-16,1	40	113,7-131,1	54-94	43-46	0-47		
7 a 14 sistemas tratando aguas residuales municipales, industriales, domésticas y hospitalarias	15	0,7-5	40	5-51	20-92	5-48	17-21		
Sistemas de tratamiento de efluentes de 21 familias	13	4,34-30,36	38	10,3-193,3	27-95	-	-	5-48	34
Efluente de cerdos pre tratado	22 -25	4,3-14,7	37	343-411	86-92			65	33
Efluente de un tanque séptico	1,8-16,1	10-13	37			45-93	30-44		
Tratamiento de aguas municipales de aguas residuales y lixiviados de Noruega con humedales construidos	7	1,3-30	40			7-145	11-65		

Humedales construidos en Polonia para tratamiento de aguas residuales municipales	3,2 - 18	8-13,3	0,3			45-82	37-77		
8 sistemas de tratamiento con HFSSH de aguas residuales municipal industrial, doméstica y hospitalaria.	5 -22	4,7	33					52-65	36
Tratamiento de efluentes de 8 sistemas unifamiliares	15	2-7	0,35-0,37	-	-	-	-	38	34
Tanque séptico para tratamiento de aguas residuales domésticas en climas fríos	7	1,3-30	0,4	-	-	-	-	7-14,5	33
Tratamiento de aguas residuales de Noruega para aguas residuales, aguas grises y lixiviados	3,2 - 18	8-13,3	0,3	-	-	-	-	45-82	36

Las temperaturas, en algunos casos se utilizaron temperaturas medias o típicas de las aguas residuales. Mientras que las porosidades, en los casos de que no se suministraba el valor, se utilizaron valores de porosidad típica del sustrato extraídas de Reed. Los valores de TRH se estimaron de las dimensiones del humedal, el caudal de entrada y la tasa de carga hidráulica. Las predicciones de la ANN se comparan con las eliminaciones de DBO dando como resultado las siguientes ilustraciones:

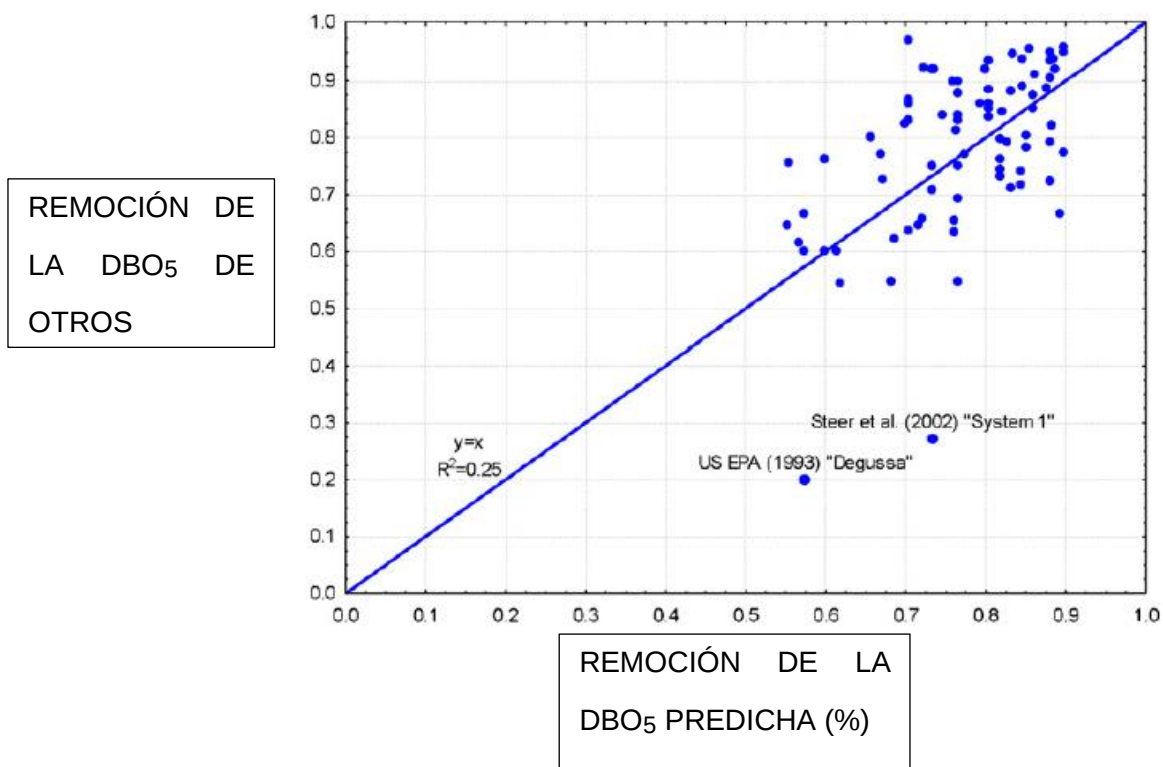


FIGURA 38: NOTA: RELACIÓN REMOCIÓN DE DBO₅ DE VALORES MUESTREADOS VS VALORES DE OBSERVADOS POR OTROS AUTORES. EXTRAÍDO DE AKRATOS, ET AL., 2008.

Teniendo en cuenta las suposiciones generales mencionadas anteriormente, el rendimiento del modelo para el caso de DBO₅ se considera razonablemente bueno. Hay dos valores atípicos evidentes en la ilustración, ambos corresponden a unidades con valores de DBO₅ influente excepcionalmente bajos, con DBO₅ de entrada de 5 mg*L⁻¹ y con DBO₅ de entrada de 10,3 mg*L⁻¹ en algunos casos.

Como se informa en la Tabla, estos dos valores de DBO₅ de entrada son los valores más bajos en todo el conjunto de datos y están en el rango donde la producción de DBO₅ dentro del humedal se vuelve importante, como la anteriormente mencionada concentración de fondo. Para esos rangos, las ANN no pueden extrapolar fuera del rango de datos utilizado para su entrenamiento. Sin embargo, la red funcionó bien en datos con concentraciones de DBO₅ de entrada tan bajas como hasta los 20 mg*L⁻¹, y con valores de TRH de 1 día; también pudo manejar unidades que trataban varios tipos de desechos.

La ecuación propuesta en el trabajo de Akratos es un modelo simple y flexible. Es considerada razonablemente buena para objetivos de diseños, pero para valores donde las cargas de afluente no sean menores a $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Para el caso del **fósforo**, cabe mencionar que se llevaron a cabo en diferentes estaciones del año, y se observó que la etapa de crecimiento de las plantas es un factor determinante. Dado que, la eliminación de $\text{PO}_4\text{-P}$ alcanza su punto máximo al inicio del verano, comenzando a disminuir después hasta alcanzar su mínimo al comienzo del invierno.

La ecuación de diseño al comprarla con el conjunto de datos publicados y propuestos por el autor para la eliminación de P_T con un $R^2 = 0,50$; su rendimiento se considera razonablemente bueno para fines de diseño.

Por otro lado, para evaluar el rendimiento² del modelo, existen varios criterios utilizados en la literatura. Los criterios son fórmulas o métodos específicos que se utilizan para evaluar el rendimiento de modelos matemáticos o estadísticos, como las ecuaciones o modelos de redes neuronales artificiales. En el caso de Akratos, se utilizaron cinco criterios,

- **Errores medio absolutos:** (MAE por sus siglas en inglés), es una medida de la discrepancia típica que se debería esperar entre las predicciones del modelo y los valores reales. Tiene la ventaja de que se mide en las mismas unidades que los datos originales y se evalúa mediante:

ECUACIÓN 12

$$MAE = \sum_{i=1}^{N_D} \frac{|M_i - P_i|}{N_D}$$

M valor muestreado

P es la predicción del modelo

N_D es el número de datos

Un valor de MAE igual a 0 es óptimo para este parámetro, y el límite superior para considerar un modelo como bueno depende de la aplicación específica.

² Se refiere a la capacidad del modelo para hacer predicciones precisas o para ajustarse de manera efectiva a los datos observados. En otras palabras, el rendimiento de un modelo se refiere a qué tan bien el modelo representa la realidad o los datos reales.

- **Error Cuadrático Medio Normalizado** (RMSEN, por sus siglas en inglés), es una variante del Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés), pero está normalizado dividiéndolo por el promedio de los datos medidos. El RMSE es uno de los criterios más populares para la evaluación de modelos y se utiliza con frecuencia como objetivo de minimización para la determinación de los parámetros del modelo. Tanto el RMSE como el RMSEN, en comparación con el MAE (Error Absoluto Medio), son más sensibles a errores grandes ocasionales debido al proceso de elevar al cuadrado los errores. En consecuencia, el RMSEN se puede considerar como una medida de la capacidad de un modelo para predecir valores que se alejan del promedio.

ECUACIÓN 13

$$RMSEN = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_D} \frac{(M_i - P_i)^2}{N_D}}}{\bar{M}}$$

M valor muestreado
P es la predicción del modelo
N_D es el número de datos
M̄ es la media de los valores medidos

Tanto para RMSE como para RMSEN, un valor de cero es el óptimo.

- **El Coeficiente de Correlación de Pearson** (PCC, por sus siglas en inglés) es una medida de la fuerza de la relación lineal entre los conjuntos de datos medidos y predichos, y se evalúa mediante una fórmula específica mostrada a continuación:

ECUACIÓN 14

$$PCC = \frac{\sum_{i=1}^{N_D} |(M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P})|}{\sum_{i=1}^{N_D} |(M_i - \bar{M})^2 (P_i - \bar{P})^2|}$$

M valor muestreado
P es la predicción del modelo
N_D es el número de datos
M̄ es la media de los valores medidos
P̄ es la media de los valores predichos

Los valores de PCC varían desde -1 (correlación inversa entre los conjuntos de datos medidos y predichos), pasando por 0 (sin correlación), hasta +1 (correlación

perfecta entre los dos conjuntos de datos). En general, cuanto más cercano esté el valor de PCC a +1, mejor será el rendimiento del modelo.

- **Error de Sesgo Medio Normalizado** (NMBE, por sus siglas en inglés), es una métrica del sesgo del modelo, y se evalúa mediante una fórmula específica.

ECUACIÓN 15

$$NMBE = \frac{\left(\frac{1}{N_D}\right) \sum_{i=1}^{N_D} (P_i - M_i)}{\left(\frac{1}{N_D}\right) \sum_{i=1}^{N_D} M_i}$$

M valor muestreado

P es la predicción del modelo

N_D es el número de datos

Los valores de NMBE < 0 indican que el modelo subestima las predicciones, mientras que los valores de NMBE > 0 implican una sobreestimación por parte del modelo. En consecuencia, un modelo exitoso debería proporcionar valores de NMBE lo más cercanos posible a cero.

- **El Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe** (CE, por sus siglas en inglés) se utiliza ampliamente como una métrica de eficiencia del modelo y se evalúa mediante una fórmula específica.

ECUACIÓN 16

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^{N_D} ((M_i - \bar{M})^2) - \sum_{i=1}^{N_D} ((P_i - \bar{P})^2)}{\sum_{i=1}^{N_D} ((M_i - \bar{M})^2)}$$

M valor muestreado

P es la predicción del modelo

N_D es el número de datos

$\bar{M}$ es la media de los valores medidos

$\bar{P}$ es la media de los valores predichos

El Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe proporciona una medida de qué tan bien se ajustan las predicciones del modelo a los valores reales en comparación con el promedio de los valores observados. Un valor de CE igual a 1 indica que las predicciones del modelo coinciden perfectamente con los valores reales, mientras

que un valor de CE menor que 1 indica que hay alguna discrepancia entre las predicciones del modelo y los valores observados.

De esta forma, las predicciones de la ecuación para objetivos de diseños son los siguientes:

**TABLA 18: RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LAS FÓRMULAS PROPUESTAS POR AKRATOS
SEGÚN LOS 5 CRITERIOS**

CRITERIO	FÓSFORO TOTAL	NITRÓGENO TOTAL
MAE	0,18	0,13
RMSEN	0,52	0,43
PCC	0,71	0,56
NMBE	-0,02	-0,03
CE	0,50	0,15

14 DISEÑO DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBUPERFICIAL HORIZONTAL

A continuación, se describen las etapas de diseño para el HFSSH de tratamiento de aguas residuales para un complejo turístico de 20 personas.

14.1 ESQUEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROPUESTO

El tratamiento planteado a diseñar está basado en el siguiente esquema planteado:

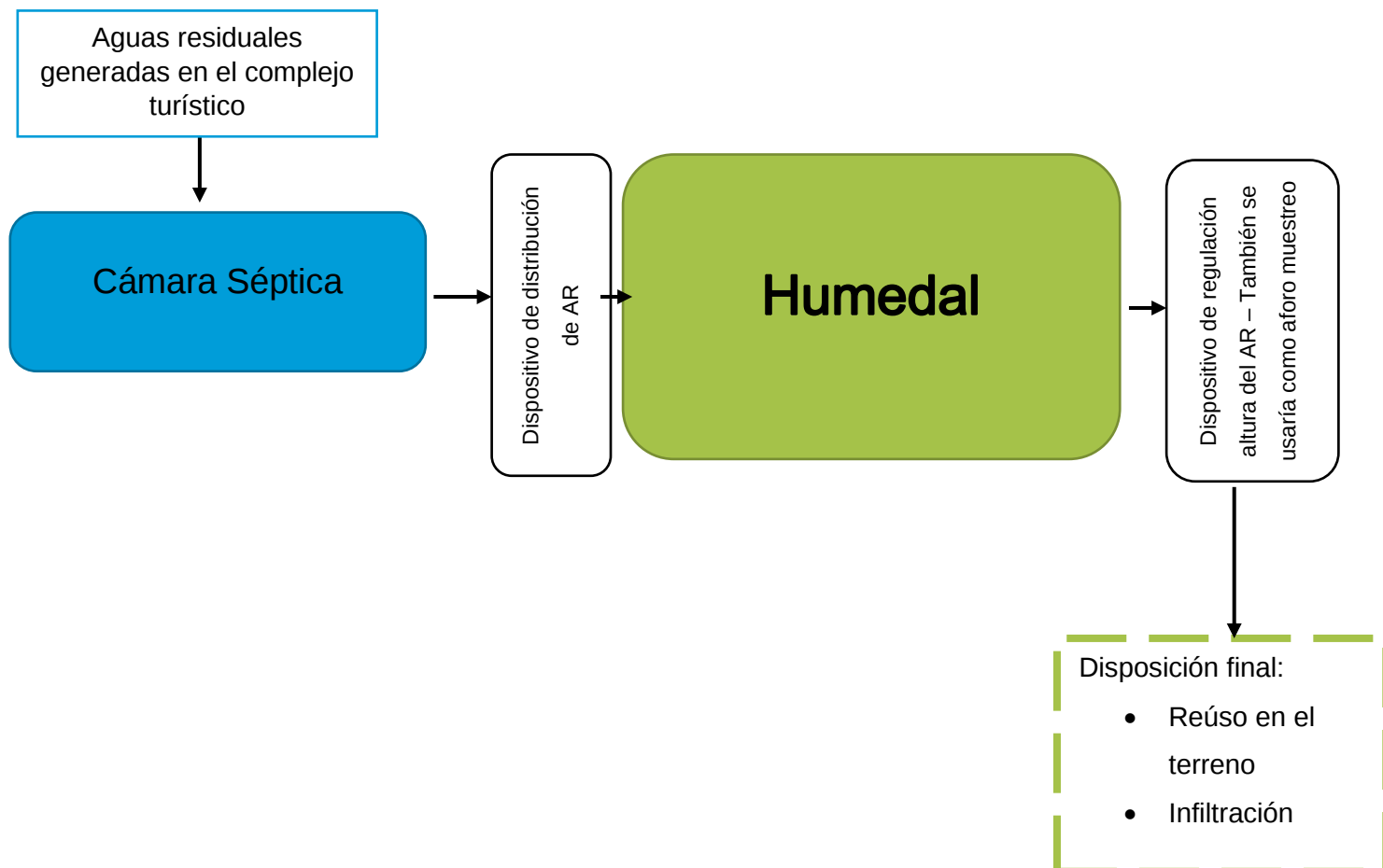


FIGURA 39: NOTA: FLUJOGRAMA DE LA PROPUESTA. ELABORACIÓN PROPIA

14.2 TRATAMIENTO ANAERÓBICO

14.2.1 DISEÑO DEL TRATAMIENTO ANAERÓBICO

El tratamiento anaeróbico tendrá como base las “*Normas de estudio, criterios de diseño y presentación de diseño y presentación de proyectos de desagües cloacales*” del Ente Nacional De Obras Hídricas De Saneamiento (ENOHSA). Por otro lado, los valores de concentración de contaminantes son extraídos del manual de “*Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales*”, conocido como METCALF & EDDY 5^{ta} edición (Tchobanoglous, *et al.*, 2016) con el fin de usarlos como referencia en el dimensionamiento tanto del HFSSH y la CS.

El sistema de tratamiento de aguas residuales, compuesto por una cámara séptica seguida de un HFSSH, se encargará de tratar las aguas residuales provenientes de un complejo turístico con los siguientes caudales:

TABLA 19: TABLA DE VALORES ASUMIDOS PARA EL CÁLCULO DE CAUDAL GENERADO. EXTRAÍDO DE TCHOBANOGLIOUS, ET AL., (2016)

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
HABITANTES [HAB]	Hab	20
CAUDAL POR HABITANTE APORTANTE [qD]	$m^3 \cdot (Hab \cdot d)^{-1}$	0,2
CAUDAL TOTAL [QT]	$m^3 \cdot d^{-1}$	4

La concentración del afluente será ilustrada en la siguiente tabla:

TABLA 20 TABLA DE VALORES DE CONTRIBUCIÓN DE LOS DISTINTOS COMPONENTES GENERADOS POR HABITANTE. EXTRAÍDO DE TCHOBANOGLIOUS, ET AL., (2016)

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
DQO	$mg \cdot L^{-1}$	508
DBO ₅	$mg \cdot L^{-1}$	200
NITRÓGENO TOTAL	$mg \cdot L^{-1}$	35
FÓSFORO TOTAL	$mg \cdot L^{-1}$	5,6

Como primera medida del dimensionamiento, según el ENOHSA, de la cámara séptica se debe calcular el tiempo mínimo de detención hidráulica (T_{HD}). Este se calcula de la siguiente forma:

ECUACIÓN 17: ECUACIÓN EXTRAÍDA DEL TOMO 1-ENOHSA

$$T_{HD} = 1,5 - 0,3 \log(HAB * q_D)$$

Según ENOHSA se debe cumplir con que el T_{HD} [d] $\geq 0,25$ días (mayor a 6 horas)

q_A = Caudal diario por habitante aportante [$Hab^{-1} \cdot d^{-1}$] según ENOHSA

HAB = número de población aportante [Hab]

La resolución de la ecuación planteada anteriormente se muestra a continuación:

ECUACIÓN 18

$$T_{HD} = 1,5 - 0,3 * \log(20 * 200) = 0,42d \approx 10,08hs$$

Es así que se comprueba que,

ECUACIÓN 19

$$10,08horas > 6 horas$$

Condición requerida para el diseño.

Según el criterio de dimensionamiento, para el cálculo del volumen se realizará el cálculo de la sedimentación:

ECUACIÓN 20: ECUACIÓN EXTRAÍDA DE TOMO 1-ENOHSA

$$V_{MH} = 10^{-3} * HAB * q_A * T_{HD}$$

V_{MH} = Volumen mínimo de la zona de sedimentación [m^3]

HAB = número de población aportante [Hab]

q_A = Caudal aportante por persona [$L * (Hab * d)^{-1}$]

T_{HD} = tiempo mínimo de detención hidráulica [d]

Es así que resolvemos a continuación:

ECUACIÓN 21

$$V_{MH} = 10^{-3} * 20 * 200 \frac{L}{día} * 0,42 = 1,68m^3$$

Posteriormente se calcula el siguiente volumen:

ECUACIÓN 22: ECUACIÓN EXTRAÍDA DE TOMO 1-ENOHSA

$V_A = 40 * 10^{-3} * HAB * M$	V_A=Volumen requerido para el almacenamiento de barros frescos, en m³;
	M = Número de años entre limpiezas de la cámara, con un mínimo de un (1) año y un máximo de cinco (5) años; en este caso será $M=1$ dado que se solicita la limpieza anual para obtener el certificado de Control de calidad y protección de los recursos hídricos provinciales (COCAPRHI)
	HAB = número de población aportante

Por lo que, el volumen requerido para barros frescos es de:

ECUACIÓN 23

$$V_A = 40 * 10^{-3} * 20 * 1 = 0,8m^3$$

A continuación, el calcula el volumen mínimo de digestión es calculado con la siguiente fórmula:

ECUACIÓN 24

$V_D = Pd * BF * HAB * 10^{-3}$	V_D = Volumen mínimo de la zona de digestión, en m³
	BF =aporte de barro fresco [L*(d*Hab) ⁻¹]. Según ENOHSA el valor es de 1L/Hab*día
	HAB = número de población aportante [Hab]
	Pd = permanencia mínima de los barros en la zona de digestión [d]

El valor de Pd se extrae desde la siguiente tabla, extrapolando y usando la temperatura mínima en el ambiente que es 2,1°C ([5.3 Temperatura](#)):

T	= 10°C	P _d	= 75 días
T	= 15°C	P _d	= 60 días
T	= 20°C	P _d	= 45 días
T	= 25°C	P _d	= 30 días
T	= 30°C	P _d	= 25 días

FIGURA 40: NOTA: PD POR TEMPERATURA. EXTRAÍDO DE ENOHSA, TOMO I “NORMAS DE ESTUDIO, CRITERIOS DE DISEÑO Y PRESENTACIÓN DE DISEÑO Y PRESENTACIÓN DE PROYECTO DE DESAGÜES CLOACALES”.

ECUACIÓN 25

$$P_D = \frac{P_{D2} - P_{D1}}{T_2 - T_1} * (T_{2,1^\circ C} - T_1) + P_{D1} = \frac{60\text{días} - 75\text{días}}{15^\circ C - 10^\circ C} * (2,1^\circ C - 10^\circ C) + 75\text{días} = \mathbf{98,7\text{días}}$$

Es así que el valor de V_D es calculado en el siguiente cuadro:

ECUACIÓN 26

$$V_D = 98,7\text{d} * 1,0 \frac{\text{L}}{\text{Hab} * \text{d}} * 20\text{Hab} * 10^{-3} = \mathbf{1,97\text{m}^3}$$

Adicionalmente, de acuerdo con el mismo manual de diseño de la ENOHSA, se establece la necesidad de incorporar un volumen suplementario de 0,70 m³. Dicho volumen se destinará para las grasas y aceites (V_G) que eventualmente puedan acumularse en el interior de la cámara séptica.

La suma de todos estos componentes volumétricos en esta sección nos conduce al cálculo del volumen mínimo para llevar a cabo el proceso de tratamiento anaeróbico, tal como se detalla a continuación:

ECUACIÓN 27. EXTRAIDA DEL TOMO 1 ENOHSA

$V_{MCS} = V_H + V_A + V_D + V_G = 5,15m^3$	V_{MCS} = Volumen mínimo de la cámara séptica [m ³]
	V_H = Volumen mínimo de la zona de sedimentación [m ³]
	V_A = Volumen requerido para el almacenamiento de barro frescos [m ³]
	V_D = Volumen mínimo de la zona de digestión [m ³]
	V_G = Volumen que ocupan las costras de grasas y aceites [m ³]

Por lo tanto, el volumen buscado para el tratamiento de AR con una cámara séptica es de **5,15m³** como mínimo para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del complejo turístico.

Es así que, para el caso de este complejo turístico la cámara séptica tendrá las dimensiones cilíndricas que se detallan a continuación:

$V_{TCS} = \pi * radio^2 * L_H$	ECUACIÓN 28
	V_{TCS} = Volumen total de la cámara séptica [m ³] L_H = Altura cámara séptica [m]

Se debe tener en cuenta que el manual de ENOHSA, establece los siguientes criterios:

TABLA 21: CRITERIOS ESTABLECIDOS DE DIMENSIONES Y CONDICIONES DE CONSTRUCCIÓN PARA LA CÁMARA SÉPTICA. ELABORACIÓN PROPIA

ALTURA MÍNIMA ÚTIL	1,20m
ALTURA MÁXIMA ÚTIL	2,00m
DIÁMETRO MÍNIMO (D_M)	1,20m
RELACIONES QUE DEBE CUMPLIR LA CÁMARA SÉPTICA	$D \leq 2*(L_H)$

Por lo tanto,

ECUACIÓN 29

RELACIÓN DIÁMETRO Y ALTURA DE LA CÁMARA SÉPTICA

Si establecemos que el valor de $L_H=1,20$ entonces

$$D=2*(L_H). \text{ Entonces, } D=2*(1,20\text{m}) = \mathbf{2,40\text{m}}$$

L_H = Altura de la cámara séptica [m]

D= diámetro de la cámara séptica [m]

De esta forma el volumen final de la cámara séptica se calcula de la siguiente forma:

ECUACIÓN 30: CÁLCULO DEL VOLUMEN TOTAL DE LA CÁMARA SÉPTICA

$$V_{TCS} = \pi * (1,20\text{m})^2 * 1,20\text{m} = \mathbf{5,43\text{m}^3}$$

V_{TCS} = Volumen total de la cámara séptica [m^3]

D= diámetro de la cámara séptica [m]

L_H = Altura de la cámara séptica [m]

De esta forma el volumen final de la cámara séptica es mayor al volumen mínimo requerido para el tratamiento de las aguas residuales calculado anteriormente.

14.2.2 ESTIMACIÓN EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DE LA CÁMARA SÉPTICA

Se realizó un relevamiento de varios estudios publicados sobre las eficiencias de remoción de las cámaras sépticas para los distintos contaminantes requeridos para la estimación y dimensionamiento para utilizarlos en el HFSSH, posteriormente se calculó una media y se utilizó ese valor como parámetro de remoción. A continuación, se muestran en las siguientes tablas los valores estimados:

TABLA 22: EFICIENCIA DE LA CÁMARA SÉPTICA CON TRH 24-48 HS PARA LA REMOCIÓN DE DBO₅. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE AUTORES CITADOS EN EL CUERPO DE LA TABLA.

REMOCIÓN OBSERVADA [%]	MEDIA [%]	REFERENCIA	MEDIA GENERAL [%]
30-50	40	(Mariñelarena, 2010)	50,62
60	60	(Municipalidad de San Martin de los Andes- Alvarez Mario, 2018)	
40	40	(Zanuttín , 2018)	
30	30	(Mariñelarena, 2006)	
70-77	73,5	(Viraraghavan, 1985)	
49-52	50	(Viraraghavan, 1985)	
30-40	35	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)	
57	57	(Nasr & Mikhaei, 2013)	
53,5	53,5	(Nasr & Mikhaei, 2013)	
63,1	63,1	(Burubai, <i>et al.</i> , 2007)	
59,5	59,5	(Burubai, <i>et al.</i> , 2007)	
35-60	47,5	(De Anda, <i>et al.</i> , 2018)	
49,6	49,6	(De Anda, <i>et al.</i> , 2018)	
50	50	(ENOHSA- Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento- Secretaria de obras publicas- Presidencia de la Nación, s.f.)	

En el caso de **DQO** se utilizará lo propuesto por ENOHSA, dando la remoción de DQO en porcentaje es de **45%**.

Por su parte la remoción de nitrógeno total:

TABLA 23: EFICIENCIA DE LA CÁMARA SÉPTICA OBSERVADA PARA LA REMOCIÓN DE N_T . ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE VARIOS AUTORES.

REMOCIÓN OBSERVADA [%]	MEDIA [%]	REFERENCIA	MEDIA GENERAL [%]
12,5-23,5	18	(Darby & Leverenz, 2004)	15,3
5	5	(Lusk, <i>et al.</i> , 2017)	
10-20	15	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)	
20,8	20,8	(Nasr & Mikhaei, 2013)	
17,7	17,7	(Nasr & Mikhaei, 2013)	

Mientras que para el fósforo total la remoción media asumida es:

TABLA 24: EFICIENCIA DE LA CÁMARA SÉPTICA OBSERVADA PARA LA REMOCIÓN DE P_T . ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE VARIOS AUTORES

REMOCIÓN OBSERVADA [%]	MEDIA [%]	REFERENCIA	MEDIA GENERAL [%]
0	0	(Darby & Leverenz, 2004)	10,98
0	0	(Lusk, <i>et al.</i> , 2017)	
10-20	15	(Tchobanoglous, <i>et al.</i> , 2016)	
17,7	17,7	(Nasr & Mikhaei, 2013)	
20,8	20,8	(Nasr & Mikhaei, 2013)	
12,4	12,4	(De Anda, <i>et al.</i> , 2018)	

Aplicando estos valores de remoción obtenemos que el AR a la salida de la cámara séptica tendran las siguientes cargas de contaminante estimadas:

TABLA 25: VALORES AFLUENTES AL HFSSH UTILIZADOS PARA FUTUROS CÁLCULOS. ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN INICIAL [mg*L ⁻¹]	REDUCCIÓN [%]	VALOR QUE INGRESA EN EL HFSSH [mg*L ⁻¹]
DBO	200	50,62	98,76
DQO	508	45,00	279,40
N_T	35	15,3	29,65
P_T	5,6	10,98	4,99

14.3 TEMPERATURA

Previamente al diseño del HFSSH se debe tener en cuenta la temperatura. Para este caso, se tomó la temperatura ambiental como parámetro de dimensionamiento de la cámara séptica.

14.3.1 SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMNA)

La siguiente tabla representa las temperaturas Climatológicas Normales - período 1981-2010 de San Carlos de Bariloche, obtenidas del Servicio Meteorológico Nacional- Argentina, 2022.

TABLA 26: TEMPERATURAS PROPORCIONADAS POR EL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL ARGENTINO

VALORES DE TEMPERATURA POR MES [°C]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MEDIA	15	14,8	11,9	7,9	4,9	2,9	2,1	3	5,1	8	10,8	13,5
MÁXIMA	22,6	23	19,7	14,6	10,2	6,9	6,7	8,3	11,5	14,8	17,9	20,5
MÍNIMA	6,6	6,3	4,7	2,3	0,6	-0,6	-1,6	-1,1	-0,2	1,8	3,7	5,9

Gráficamente:

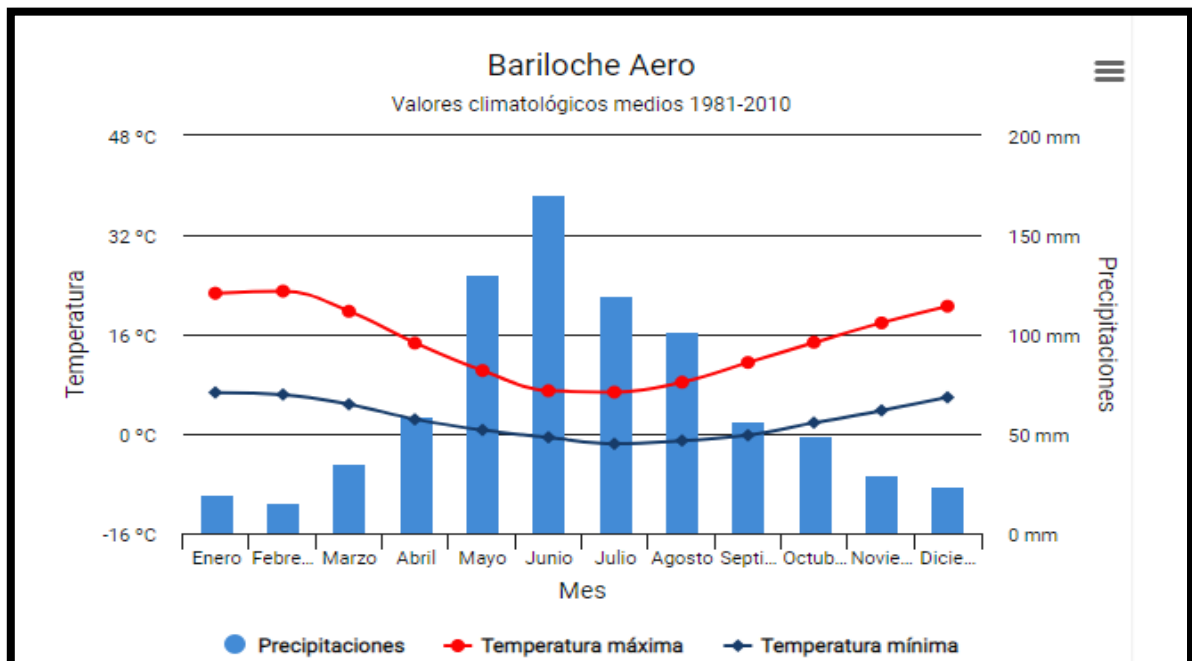


FIGURA 41: NOTA: GRÁFICO DE TEMPERATURAS AMBIENTALES. EXTRAÍDO DE SNMA.

14.3.2 TEMPERATURAS REGISTRADAS EN EL DATTA LOGGER

Se utilizó un Data Logger de la marca ESP modelo: DXT-1720P 3T/1H, equipo seleccionado para la medición y registro de temperaturas ambientales y de aguas residuales para este trabajo. El mismo se instaló post tratamiento de la CS de una vivienda unifamiliar en el km 7,5 de la Av. Pioneros. Se registraron temperaturas por un periodo de 6 días. Sin embargo debido a un desperfecto, se cambió el equipo. Posteriormente se instaló un equipo de la marca ELITECH modelo RC-4HC (certificado de calibración en [ANEXO](#)) para realizar una medición de 27días, los periodos en los que cada equipo registró temperaturas están según tabla 21.

TABLA 27: TABLA RESUMEN DEL TOTAL DE VALORES Y DÍAS REGISTRADOS POR EL EQUIPO. ELABORACIÓN PROPIA

30/04/2022 al 06/05/2022	6 días registrados	Lapso entre registros: 30segundos	Total de datos	15973	Temperatura Mínima registrada	17,1
18/06/2022 al 07/07/2022	20 días registrados	Lapso entre registros: 30minutos	Total de datos	462	Temperatura Mínima registrada	13,1

Las tablas de temperaturas se pueden observar en los [ANEXOS](#), junto a las temperaturas registradas ambientalmente; dato suministrado por el SMNA.

En los siguientes gráficos se ve la diferencia entre las temperaturas ambientales (escala de AZULES) y las temperaturas registradas en las aguas residuales (ROJO):

Registro de temperaturas del 30/04/2022 al 06/05/2022

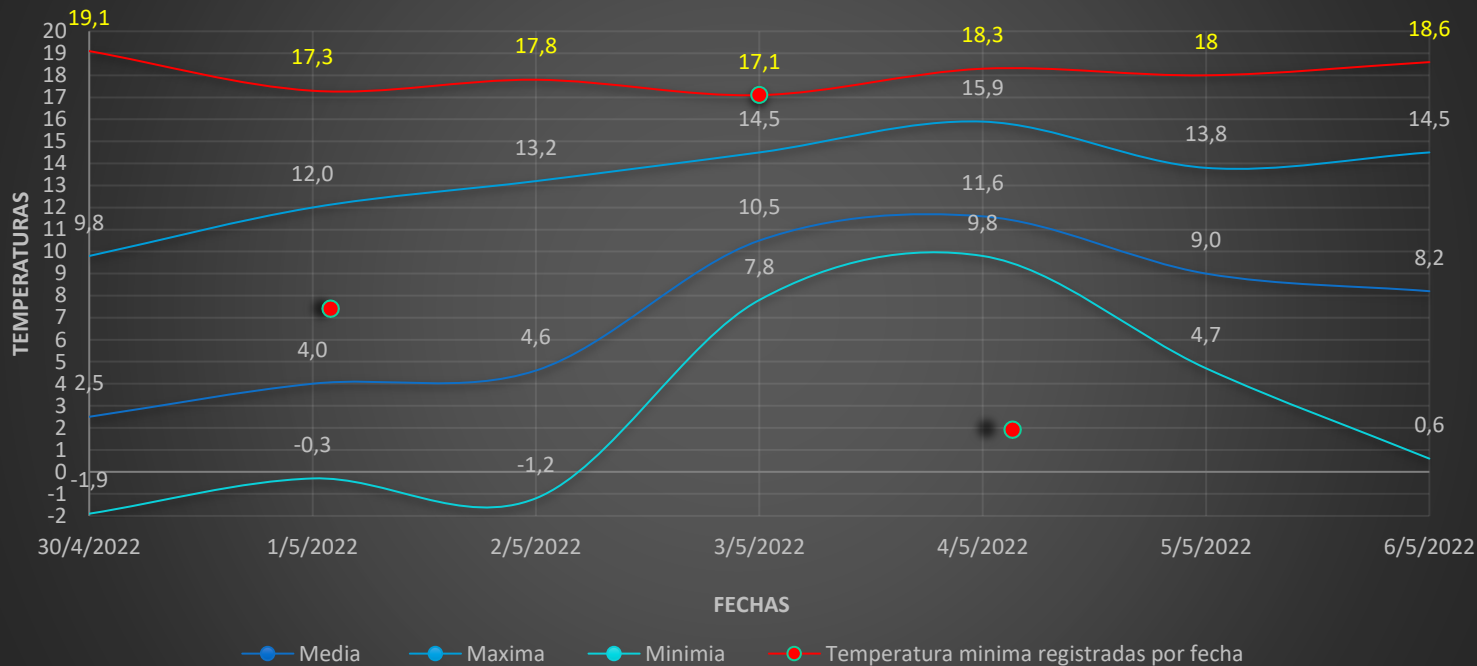


FIGURA 43: NOTA: REGISTRO DE TEMPERATURAS. ELABORACIÓN PROPIA

Registro de temperaturas 18/06/2022 al 07/07/2022

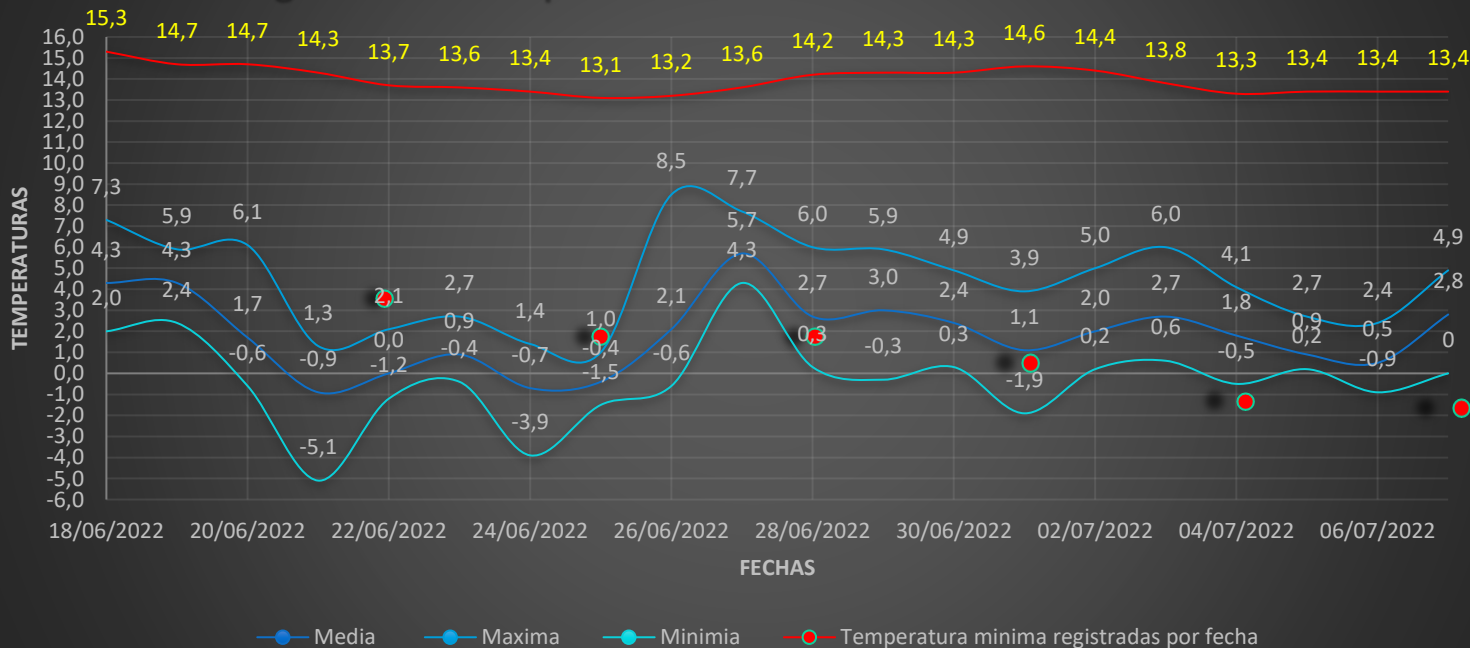


FIGURA 42: NOTA: REGISTRO DE TEMPERATURAS 2. ELABORACIÓN PROPIA.

Como se ve la temperatura no disminuye por debajo de los **13°C en las aguas residuales**, por lo que se seleccionará esta como la medida de diseño.

14.4 DISEÑO DEL HFSSH PARA 20 PERSONAS APORTANTES

14.4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO:

El diseño del HFSSH se basa en los criterios propuestos por Rahman y Brix en forma combinada, sumados a los del HFSSH diseñados por Akratos & Tsihrintzis, 2007 para establecer la relación de dimensiones de construcción:

TABLA 28: PARÁMETROS UTILIZADOS COMO GUÍA DE DISEÑO. EXTRAÍDO DE ZIDAN

PARÁMETROS	HFSSH	REFERENCIA
TAMAÑO DE LA CAMA	< 2500m ²	(Rahman, <i>et al.</i> , 2020)
RELACIÓN LARGO / ANCHO	3:1	(Rahman, <i>et al.</i> , 2020)
PROFUNDIDAD	0,4-1,6m / ≤ 0,6m → 0,45m utilizado por Akratos	(Rahman, <i>et al.</i> , 2020) // (Arias & Brix, 2003)
PENDIENTE HIDRÁULICA	0,5-1%	(Rahman, <i>et al.</i> , 2020)
MEDIO / SUSTRATO	Grava de porosidad de 0,3-0,5	(Rahman, <i>et al.</i> , 2020) // (Arias & Brix, 2003)
VEGETACIÓN	Especies palustres con cobertura del 80% del terreno- 4 plantas /m ²	(Rahman, <i>et al.</i> , 2020)// (Vidal & Hormazábal, 2018)

En este caso de diseño, los valores deseados a la salida del humedal construido para **infiltración** se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 29: VALORES ESTABLECIDOS PARA EL DISEÑO EN LA SALIDA DEL HC PROPUESTO. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE REFERENCIAS EN NORMATIVA

CONTAMINANTE	LÍMITE PERMISIBLE PARA INFILTRACIÓN SUBSUPERFICIAL	VALORES DESEADOS POST TRATAMIENTO CON HFSSH	UNIDAD
DBO ₅	100	85	mg*L ⁻¹
DQO	500	425	mg*L ⁻¹
N _T	30	25,5	mg*L ⁻¹
P _T	5	4,25	mg*L ⁻¹

Estos valores seleccionados son valores asumidos que son resultado de una reducción del 15% al límite permisible de infiltración de la nombrada resolución 885/15 del Departamento provincial de aguas- Provincia de Río Negro, 2015.

Para el caso de **reúso** de aguas residuales usaremos el valor de nitratos como nitrógeno total, dado que en los límites permisibles para reúso de las aguas residuales encontramos a los nitratos como parámetro de contrastación, esto se refleja a continuación:

TABLA 30: VALORES ESTABLECIDOS PARA EL DISEÑO PARÁMETROS DE REÚSO. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE REFERENCIAS EN NORMATIVA

CONTAMINANTE	LÍMITE PERMISIBLE PARA REÚSO DENTRO DEL PREDIO	VALORES DESEADOS POST TRATAMIENTO CON HFSSH	UNIDAD
DBO ₅	50	42,5	mg*L ⁻¹
DQO	250	212,5	mg*L ⁻¹
N _T	10	8,5	mg*L ⁻¹
P _T	10	8,5	mg*L ⁻¹

14.4.2 SUSTRATO DEL HFSSH PROPUESTO

El sustrato seleccionado es **grava fina**, para simular características similares al HC que utilizo Akratos & Tsihrintzis, 2007 para el tratamiento de AR.

Las características son comparables a los criterios de diseño para HFSSH propuestos por Rahman, *et al.*, 2020 & Arias & Brix, 2003 y porosidades de Crites, *et al.*, 2014, ampliamente usado para diseño de HFSSH. De esta forma las características del medio del HFSSH son presentadas en el siguiente cuadro:

TABLA 31: CARACTERÍSTICAS DEL SOPORTE FÍSICO. FUENTE EN TABLA

PARÁMETRO	REFERENCIA	VALOR	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
POROSIDAD	n	30%	Akratos & Tsihrintzis, 2007 y (Crites, <i>et al.</i> , 2014)
DIÁMETRO MEDIO	D ₅₀	6mm	
DIÁMETRO MÍNIMO	D _{min}	0,25	
DIÁMETRO MÁXIMO	D _{max}	16mm	

14.5 DISEÑO DEL HFSSH

Tal y como se mencionó anteriormente, todas las fórmulas de Akratos están dadas por la siguiente configuración:

ECUACIÓN 31

$$R_c = \frac{TRH}{K_c + TRH}$$

Donde **R_c** es el porcentaje de remoción de las concentraciones de los distintos contaminantes

TRH= Tiempo de retención hidráulico [d]

K_c= Constante estudiada en la sección de Akratos [d]

Por lo tanto, para calcular el área del HFSSH requerida para alcanzar los valores especificados anteriormente, se procede a despejar.

Sabiendo que,

ECUACIÓN 32

$$TRH = \frac{V_H}{q * HAB}$$

TRH= Tiempo de retención hidráulico [d]

q= aporte de cada habitante del complejo [m³*(d*Hab)⁻¹]

HAB= número de habitantes/aportantes [Hab]

V_H= volumen del humedal [m³]

Por lo tanto, si reemplazamos TRH dentro de la fórmula y despejamos el volumen requerido:

ECUACIÓN 33

PASOS	ECUACIÓN
1	$R_C = \frac{V_H / (q * HAB)}{K_C + [V_H / (q * HAB)]}$
2	$R_C * \{K_C + [V_H / (q * HAB)]\} = V_H / (q * HAB)$
3	$R_C * K_C + R * [V_H / (q * HAB)] = V_H / (q * HAB)$
4	$R_C * K_C = V_H / (q * HAB) - R_C * [V_H / (q * HAB)]$
5	$R_C * K_C = V_H / (q * HAB) * (1 - R_C)$
6	$V_H / (q * HAB) = \frac{R_C * K_C}{1 - R_C}$
7	$V_H = \left[\frac{R_C * K_C}{1 - R_C} \right] * (q * HAB)$

Sabemos que para calcular volúmenes que presentan formas cuadradas, la ecuación es la siguiente:

ECUACIÓN 34

$V_H = A_H * h_H$	A_H = Área del humedal superficial [m ²]
	h_H =profundidad del humedal [m]

Remplazando en la anterior ecuación y despejando, obtenemos:

ECUACIÓN 35

$A_h = \frac{R_C * K_C * q * HAB}{(1 - R_C) * h_H}$	A_H = Área del humedal superficial [m ²]
	h_H =profundidad del humedal [m]
	q = aporte de cada habitante del complejo [m ³ *(d*Hab) ⁻¹]
	HAB = número de habitantes/aportantes [Hab]
	R_C = porcentaje de remoción del contaminante estudiado
	K_C = constante de la fórmula de Akratos, varía según el compuesto en estudio. [d]

Como la relación ancho/largo, extraído de la sección anterior esta especificada a continuación:

TABLA 32: RELACIÓN LARGO / ANCHO ESTABLECIDA. ELABORACIÓN A PARTIR DE TABLA 24

$L_L = 3L_A$	L_L Largo del humedal [m]
	L_A Ancho del humedal [m]

Procedemos a remplazar y despejar, obtenemos la base de diseño:

ECUACIÓN 36

PASOS	ECUACIÓN
1	$L_A * 3 * L_A = \frac{R_C * K_C * q * HAB}{(1 - R_C) * h_H}$
2	$L_A^2 = \frac{R_C * K_C * q * HAB}{(1 - R_C) * h_H * 3}$
3	$L_A = \sqrt{\frac{R_C * K_C * q * HAB}{(1 - R_C) * h_H * 3}}$

Los valores de h_H , q y HAB , son valores ya establecidos en la sección [15.4.1 parámetros de diseño](#), por lo que la ecuación que resuelve el ancho de HFSSH para este documento queda resumida de la siguiente forma:

ECUACIÓN 37

$L_A = \sqrt{\frac{R_C * K_C}{(1 - R_C)}} * 1,72m$	L_A = Ancho del Humedal [m]
	K_C = constante de la fórmula de Akratos, varía según el compuesto en estudio
	R_C =Remoción de contaminante requerido

Los valores de K_C están especificados a continuación y, como se mencionó anteriormente, se utilizará la temperatura de 13°C como valor critico al ser la menor temperatura registrada en las mediciones:

TABLA 33: TABLA DE CÁLCULOS DE LAS CONSTANTES UTILIZADAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL HFSSH.
ELABORACIÓN PROPIA.

AGENTE CONTAMINANTE	CÁLCULO DE LA CONSTANTE	VALOR CALCULADO
DBO ₅	$K = \frac{22,8}{T}$	1,75
DQO	$K = \frac{15}{T}$	1,15
N _T	$K = \left(\frac{22,8}{T}\right) * 45,5 * \left(\frac{n}{1-n}\right)^3$	6,28
P _T	$K = \frac{22,8}{T} * 1,7 * \left(\frac{1}{S}\right)^2$	0,89

14.5.1.1 DISEÑO DEL HFSSH PARA DISPOSICIÓN FINAL EN LECHOS DE INFILTRACIÓN

En el caso de la infiltración se refleja la remoción requerida para cada contaminante:

TABLA 34: CÁLCULOS DE RENDIMIENTOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DEL HUMEDAL PARA EL CASO DE INFILTRACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA

CONTAMINANTE	VALORES QUE DEBE TRATAR EL HFSSH [mg*L ⁻¹]	AGUA RESIDUAL DESEADA A LA SALIDA DEL HFSSH [mg*L ⁻¹]	REMOCIÓN REQUERIDA [%]
DBO ₅	98,76	85	13,93
DQO	279,40	425	-52,11
N _T	29,65	25,5	13,98
P _T	4,99	4,25	14,75

Al ver los requerimientos, la DQO no requiere análisis debido a que ya está por debajo de los límites establecidos.

Es así que, se busca determinar cuál es el agente contaminante limitante para que sea utilizarlo como base para diseño del volumen requerido para lograr el pulido y poder utilizarlo en la infiltración:

TABLA 35: CÁLCULOS DEL ANCHO REQUERIDO PARA CADA TIPO DE AGENTE REQUERIDO PARA EL HUMEDAL EN EL CASO DE INFILTRACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.

AGENTE CONTAMINANTE	ECUACIÓN	VALOR DEL ANCHO CALCULADO
DBO ₅	$L_A = \sqrt{\frac{0,1393 * 1,75}{(1 - 0,1393)}} * 1,72m$	0,92m
N _T	$L_A = \sqrt{\frac{0,1398 * 6,28}{(1 - 0,1398)}} * 1,72m$	1,74m
P _T	$L_A = \sqrt{\frac{0,1475 * 0,89}{(1 - 0,1475)}} * 1,72m$	0,67m

El contaminante crítico que requiere un área de tratamiento considerable es el nitrógeno total. Sin embargo, en términos de diseño y construcción, no es práctico utilizar estos de longitud y ancho. Por lo tanto, se ajustan a dimensiones mayores para calcular el tamaño del sistema de tratamiento HFSSH destinado a procesar los efluentes generados por 20 personas. A continuación, se presentan los detalles en la siguiente tabla:

TABLA 36: DIMENSIONES DEL HUMEDAL CONSTRUIDO DISEÑADO PARA 20 PERSONAS QUE TIENEN COMO DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LECHOS DE INFILTRACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO	VALOR
ANCHO	2m
LARGO	6m
PROFUNDIDAD	0,45m

De esta forma la superficie y volumen quedan reflejados en la siguiente tabla:

TABLA 37: DIMENSIONES DEL HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL CASO DE INFILTRACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO	VALOR
SUPERFICIE	12m ²
VOLUMEN	5,4m ³

El TRH representa una variable vital debido a que, a mayor tiempo de retención mayor será el porcentaje de remoción de contaminantes. Este valor de TRH queda expresado en el siguiente cuadro:

TABLA 38: TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA PARA EL CASO DE INFILTRACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO	ECUACIÓN	VALOR [días]
TRH	$TRH = \frac{V}{q * P}$	1,35

Se re calculan los valores de salida esperados utilizando las dimensiones calculadas del HFSSH, la ecuación de Akrotos para cada parámetro:

TABLA 39: REMOCIÓN OBSERVADA EN EL HFSSH. ELABORACIÓN PROPIA

CÁLCULO REALIZADO A PARTIR DE AKRATOS	%
$R_{DBO_5} = \frac{1,35d}{1,75d + 1,35d}$	57,14
$R_{DQO} = \frac{1,35d}{1,15d + 1,35d}$	54,00
$R_{N_T} = \frac{1,35d}{6,28d + 1,35d}$	17,69
$R_{P_T} = \frac{1,35d}{0,89d + 1,35d}$	60,27

Por lo tanto, se esperan valores de salida cercanos a lo ilustrado a partir de la ecuación y table siguiente:

ECUACIÓN 38

$$C_{OUT} = C_{IN} - (C_{IN} * R_C)$$

C_{OUT}= Concentración en la salida del
humedal esperada

C_{IN}= Concentración en la entrada del
humedal

R_C= Porcentaje de remoción por parte del
humedal

TABLA 40: CÁLCULO DE VALORES ESTIMADOS DE SALIDA A PARTIR DE LA ECUACIÓN 26. ELABORACIÓN PROPIA

AGENTE CONTAMINANTE	RESOLUCIÓN	VALOR ESTIMADO EN EL AFORO DE SALIDA DEL AGUA RESIDUAL
DBO₅	$C_S = 98,76 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - (98,76 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,5714)$	42,31 mg*L ⁻¹
DQO	$C_S = 279,4 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - (279,4 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,54)$	128,52 mg*L ⁻¹
NITRÓGENO TOTAL	$C_S = 29,65 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - (29,65 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1769)$	24,05 mg*L ⁻¹
FÓSFORO TOTAL	$C_S = 4,99 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - (4,99 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,6027)$	1,98 mg*L ⁻¹

Como cálculo final, estimamos el área de tratamiento por persona aportante, dato que se tendrá en cuenta en el análisis económico detallado posteriormente en este documento:

ECUACIÓN 39

$$\text{Área requerida por aportante} = \frac{\text{Área}_{HFSSH}}{20 \text{ personas}} = \frac{12m^2}{20Hab} = 0,6 \frac{m^2}{Hab}$$

14.5.1.1 DISEÑO DEL HFSSH PARA REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL TERRENO

A diferencia del caso de la disposición final de aguas residuales en lechos de infiltración, se ha adoptado valores límites para reúso de las aguas residuales a 2mg*L⁻¹ ³ de fósforo total. Por lo tanto, los valores requeridos para reúso de las aguas residuales, el porcentaje de remoción requerido es:

³ DIRECTIVA 91/271/CEE, directiva de la Unión Europea.

TABLA 41: CÁLCULOS DE RENDIMIENTOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DEL HUMEDAL PARA EL CASO DE REÚSO DEL AGUA RESIDUAL. ELABORACIÓN PROPIA

CONTAMINANTE	VALORES DE LOS DIFERENTES PARÁMETROS QUE DEBE TRATAR EL HFSSH [mg*L-1]	AGUA RESIDUAL DESEADA A LA SALIDA DEL HFSSH [mg*L ⁻¹]	REMOCIÓN REQUERIDA [%]
DBO ₅	98,76	42,5	56,97
DQO	279,40	212,5	23,94
N _T	29,654	8,7	70,67
P _T	4,99	1,7	65,93

Para el caso del reúso,

TABLA 42: CÁLCULOS DEL ANCHO REQUERIDO PARA CADA TIPO DE AGENTE REQUERIDO PARA EL HUMEDAL EN EL CASO DE REÚSO DEL AGUA RESIDUAL. ELABORACIÓN PROPIA.

AGENTE CONTAMINANTE	ECUACIÓN	VALOR DEL ANCHO CALCULADO
DBO ₅	$L_A = \sqrt{\frac{0,5697 * 1,75}{(1 - 0,5697)}} * 1,72m$	2,62m
DQO	$L_A = \sqrt{\frac{0,2394 * 1,15}{(1 - 0,2394)}} * 1,72m$	1,03m
N _T	$L_A = \sqrt{\frac{0,7067 * 6,28}{(1 - 0,7067)}} * 1,72m$	6,69m
P _T	$L_A = \sqrt{\frac{0,6593 * 0,89}{(1 - 0,6593)}} * 1,72m$	2,26m

En ambos casos el nitrógeno total es el parámetro limitante para el tratamiento seleccionado y por ende es el parámetro en el cual se basará el dimensionamiento del HFSSH.

El contaminante limitante al requerir mayor área para tratamiento es el nitrógeno total. De la misma forma que se hizo para el caso de infiltración, se ajusta este valor para determinar las dimensiones del HFSSH como tratamiento para 20 personas, expresados en la siguiente tabla:

TABLA 43: DIMENSIONES DEL HUMEDAL CONSTRUIDO DISEÑADO PARA 20 PERSONAS QUE TIENEN COMO REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO	VALOR
ANCHO	7m
LARGO	21m
PROFUNDIDAD	0,45

Entonces:

TABLA 44: DIMENSIONES DEL HUMEDAL CONSTRUÍDO PARA EL CASO DE REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO	VALOR
SUPERFICIE	147m ²
VOLUMEN	66,15m ³

El TRH representa una variable de vital debido a que, a mayor tiempo de retención mayor será el porcentaje de remoción de contaminantes. Este valor de TRH queda expresado en el siguiente cuadro:

TABLA 45: TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA PARA EL CASO DE REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES. ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETRO	ECUACIÓN	VALOR
TRH	$TRH = \frac{V}{q * P}$	16,54d

Se re calculan los valores de salida esperados utilizando las dimensiones calculadas del HFSSH, la ecuación de Akrotos para cada parámetro:

TABLA 46: REMOCIÓN OBSERVADA EN EL HFSSH. ELABORACIÓN PROPIA

CÁLCULO REALIZADO A PARTIR DE AKRATOS	%
$R_{DBO} = \frac{16,54d}{1,75d + 16,54d}$	90,43
$R_{DQO} = \frac{16,54d}{1,15d + 16,54d}$	93,5
$R_{NT} = \frac{16,54d}{6,28d + 16,54d}$	72,48
$R_{PT} = \frac{16,54d}{0,89d + 16,54d}$	94,89

Por lo tanto, se esperan valores de salida cercanos a lo ilustrado a partir de la ecuación y tabla siguiente:

ECUACIÓN 40

$$C_{OUT} = C_{IN} - (C_{IN} * R_C)$$

C_{OUT}= Concentración en la salida del humedal esperada

C_{IN}= Concentración en la entrada del humedal

R_C= Porcentaje de remoción por parte del humedal

TABLA 47: CÁLCULO DE VALORES ESTIMADOS DE SALIDA A PARTIR DE LA ECUACIÓN 40. ELABORACIÓN PROPIA

AGENTE CONTAMINANTE	CÁLCULO REALIZADO A PARTIR DE AKRATOS	VALOR ESTIMADO EN EL AFORO DE SALIDA [mg*L ⁻¹]
DBO₅	$C_S = 98,76 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - (98,76 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,9043)$	9,45
DQO	$C_S = 279,4 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - (279,4 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,935)$	18,16
NITRÓGENO TOTAL	$C_S = 29,65 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - (29,65 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,7248)$	8,16
FÓSFORO TOTAL	$C_S = 4,99 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - (4,99 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,9489)$	0,26

Como cálculo final, estimamos el área de tratamiento por persona aportante, dato que se tendrá en cuenta en el análisis económico detallado posteriormente en este documento:

ECUACIÓN 41

$$\text{Área requerida por Habitante aportante} = \frac{\text{Área}_{\text{HFSSH}}}{20 \text{ personas}} = \frac{147 \text{m}^2}{20 \text{Hab}} = 7,35 \frac{\text{m}^2}{\text{Hab}}$$

14.5.1.2 RESUMEN DE LAS DIMENSIONES DE LOS HFSSH

Las dimensiones requeridas para el tratamiento son las siguientes:

TABLA 48: RESUMEN DE DIMENSIONES DEL HFSSH SEGÚN LA DISPOSICIÓN FINAL

DIMENSIÓN	HFSSH CON SISTEMA INFILTRACIÓN	HFSSH CON SISTEMA DE RIEGO
ANCHO	2m	7m
LARGO	6m	21m
PROFUNDIDAD	0,45m	0,45m

14.5.2 VEGETACIÓN PROPUESTA PARA EL HFSSH DEL PROYECTO

Si bien el tratamiento es principalmente efectuado por los microorganismos presentes en el HFSSH, las plantas potencian este tratamiento de las AR como se detalló en la sección de [vegetación de humedales](#). Es así que, siguiendo los parámetros de diseño establecidos en la sección [15.4](#) y la sección de [vegetación](#), las plantas seleccionadas para este trabajo son plantas palustres emergentes como el *carex sp.* y el *junco sp* al ser tolerantes a los nutrientes y ser comúnmente utilizadas (Comisión Nacional del Agua, s.f.). buscando una cobertura de 4 plantas por metro cuadrado. Además, basándome en ejemplos de empresas de la zona que utilizan estos tratamientos, la vegetación propuesta es lo ilustrado en el siguiente cuadro:

TABLA 49: VEGETACIÓN PROPUESTA PARA USO EN EL HUMEDAL. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA REFERENCIADA EN LA TABLA

NOMBRE COMÚN DE LA PLANTA	NOMBRE CIENTÍFICO	DESCRIPCIÓN SIMPLE	LUGAR DE CRECIMIENTO	IMAGEN	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
JUNCO	<i>Marsippospermum grandiflorum</i>	Es una planta perenne, que crece en lugares húmedos, como turberas, pastizales, costas de ríos, lagos, lagunas, etc.			Guerrido & Fernández, (2019); Confirmación en el sitio SIB en el parque Nahuel Huapi ⁴
JUNQUITO	<i>Carex chillanensis</i>	Es una planta perenne que crece en sitios húmedos, sumergido en pequeños cuerpos de agua, como en bordes o espacios abiertos. También crece sobre roca o en grietas, o márgenes de ríos.			Guerrido & Fernández, (2019); Confirmación en el sitio SIB
CORTADERA	<i>Cortaderia araucana</i>	Hierba perenne- se desarrolla en: Terrenos arenosos y húmedos, generalmente orillas de ríos y arroyos. En faldeos arenosos y húmedos suele formar agrupaciones llamadas cortaderas o lloraderas			Según el SIB : Habitat desde Neuquén a Santa Cruz, en Argentina. Aunque aún sin validar en el Parque Nacional Nahuel Huapi

⁴ Sistema de Información de Biodiversidad de la Administración de Parques Nacionales, Argentina (SIB)

14.6 COMPONENTES IMPORTANTES DEL HFSSH AL MOMENTO DE SU CONSTRUCCIÓN

Solo se tendrán en cuenta aquellos componentes para el HFSSH estructurales.

14.6.1 IMPERMEABILIZANTE

Es útil a la hora de asegurar la posibilidad de evitar fugas y evite el balance hídrico. En general se usan revestimientos sintéticos como el PVC, polietileno de alta y baja densidad y el polipropileno. Una comparación de estos se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 50: COMPONENTES DEL HUMEDAL, IMPERMEABILIZANTES. EXTRAÍDO DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, MÉXICO,

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Policloruro de vinilo (PVC)	Excelente resistencia a la abrasión y es difícil de perforar	No presentan elevadas resistencias a los rayos UV
	Flexibilidad a la hora de su instalación	
	Facilidad para unir el material	
	Resistencia a los químicos industriales comunes	
	Disponibilidad en varios espesores	
	Mayor rentabilidad frente a otros materiales	
Polietileno de alta densidad	Estabilidad a los rayos UV	Costo Rigidez
	Específico para condiciones extremas	
	Excelente resistencia al rompimiento y ofrece una excepcional estabilidad dimensional	
Polipropileno	Es el material con mayor vida útil comparado a otros materiales.	Es el más caro de los materiales usualmente usados.
	Gran resistencia al desgarre	
	Gran resistencia a los rayos UV	
	Resistencia a los productos químicos	
	Principal ventaja son sus dimensiones en anchura, frente a otros que pueden ser limitados	

14.6.2 DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN DE ALTURA DE AGUA ENTRADA- SALIDA.

Estos dispositivos, son importantes debido a que controlan la trayectoria y el flujo del humedal, como también su distribución buscando un rendimiento uniforme. En general se utilizan tuberías de PVC perforadas, siendo estos lo suficientemente grande para que no se vea obstruido por los sólidos.

La correcta instalación de los tubos de PVC y evitar zonas muertas, la muestra la ilustración siguiente:

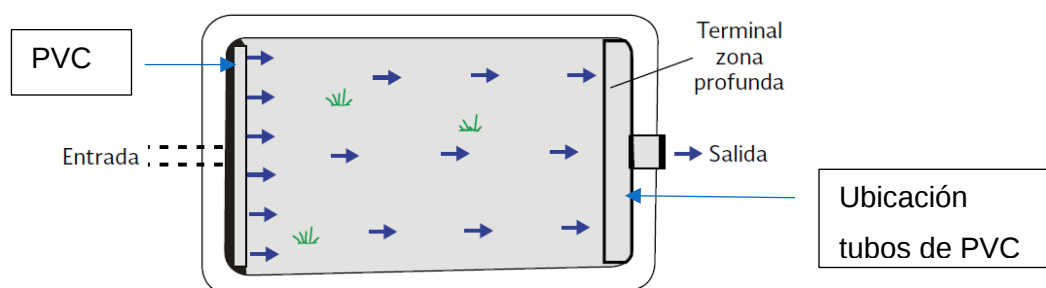


FIGURA 44: NOTA: DISPOSITIVO DE ENTRADA CON PERFORACIONES QUE EVITAN LAS ZONAS MUERTAS.
EXTRAÍDO DE ONU-HABITAT (2008)

Estos tubos estarán recostados sobre grava de entre 60 y 80mm de diámetro. Además, tendrá una zona buffer de las dimensiones que se muestra en la siguiente imagen:

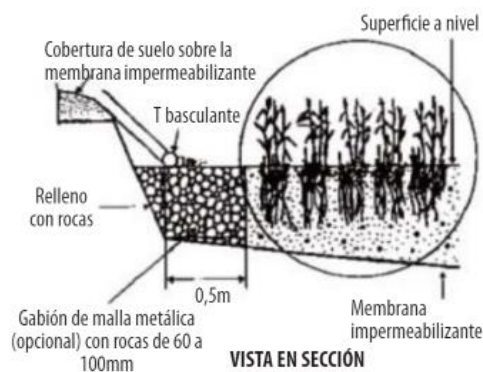


FIGURA 45: NOTA: ILUSTRACIÓN ENTRADA DE AGUA RESIDUAL Y ZONA BUFFER DEL HFSSH REQUERIDA.
EXTRAÍDA DE ONU-HABITAT (2008)

Mientras que, el control del nivel de agua estaría regulado por lo siguiente dispositivo:

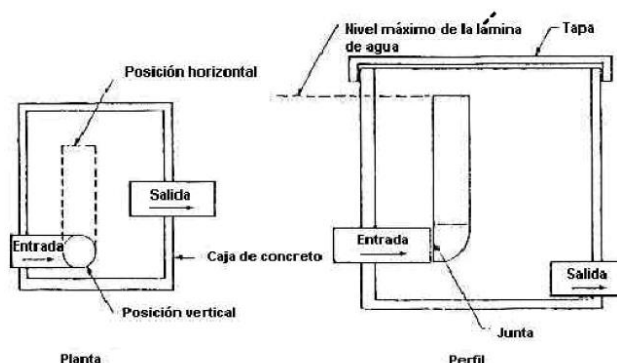


FIGURA 46: NOTA: DISPOSITIVO DE REGULACIÓN DEL NIVEL DE AGUA RESIDUAL. EXTRAÍDO DE ONU-HABITAT, (2008)

14.6.2.1.1 SUPERFICIES REQUERIDAS PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN EL COMPLEJO TURÍSTICO.

Por lo tanto, al área de tratamiento es necesario adicionar un área buffer. Las dimensiones del área total son el resultado de agregar 0,5m a cada extremo de las dimensiones de tratamiento con de grava de entre 60 a 100mm correspondiente al gavión. Las dimensiones resultantes dan como resultado lo reflejado a continuación:

TABLA 51: INFORMACIÓN DE LAS DIMENSIONES TOTALES DEL HFSSH PARA EL CASO DE INFILTRACIÓN Y REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES SUMANDO EL ÁREA BUFFER. ELABORACIÓN PROPIA.

DIMENSIONES	INFILTRACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES
LARGO TOTAL DEL HFSSH	7m	22m
ANCHO TOTAL DEL HFSSH	3m	8m
PROFUNDIDAD TOTAL DE HFSSH	0,45m	0,45m
SUPERFICIE TOTAL QUE OCUPA EL HFSSH	17,68m ²	176m ²
VOLUMEN TOTAL QUE OCUPA EL HFSSH	9,45m ³	79,2m ³

14.6.2.2 ÁREA REQUERIDA PARA INFILTRACIÓN DE AGUA RESIDUALES

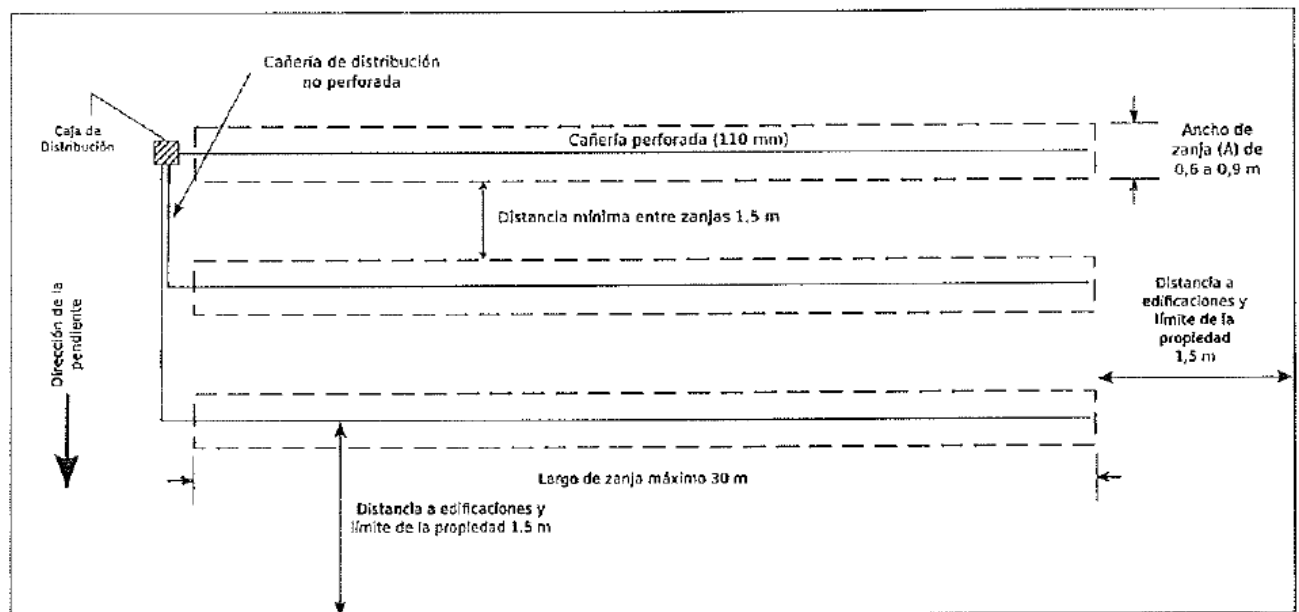
Incorporaremos el área de infiltración requerida por la ordenanza 2802-CM-16. Para ello calcularemos el rango entre el área mínima y máxima según la resolución de esta misma norma. Es así que, utilizando los 4m lineales por habitante por ser el de menor tasa de infiltración

establecida por la resolución 200-I-2018 de San Carlos de Bariloche. Por lo tanto, los metros requeridos para los 20 habitantes son los mostrados en la siguiente tabla:

ECUACIÓN 42

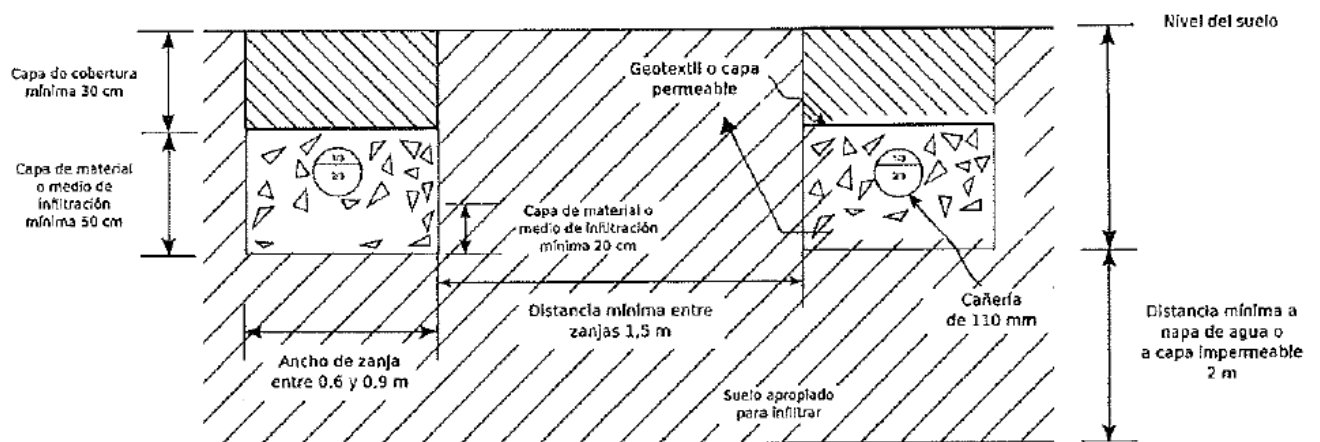
$$\text{Metros lineales requeridos} = 4\text{m} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot 20\text{hab} = \mathbf{80\text{m lineales}}$$

Tomando en cuenta las ilustraciones siguientes como criterios de área requerida para infiltración:



a) Vista esquemática en planta de lecho de infiltración de tres ramales.

FIGURA 47: NOTA: ESQUEMA CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO DE LECHOS DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN



b) Vista esquemática en corte de lecho de infiltración de dos ramales.

Nota: el material o medio filtrante (piedras u otro material con características similares) debe poseer un diámetro aproximado de entre 3 y 10 cm o una superficie específica equivalente o mayor.
El detalle en el corte del caño marca el nivel aproximado hasta donde deben realizarse las ranuras.

FIGURA 48: NOTA: ESQUEMA CRITERIO DE DIMENSIONAMIENTO DE LECHOS DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 DE SAN CARLOS DE BARILOCHE

Por lo tanto, al ser un máximo de 30m lineales por caño, se requerirán un total de 3 caños de 30m para suplir los 80m calculados anteriormente.

Cada caño requiere un ancho de zanja de 0,6m. Asimismo, se requiere una distancia de 1,5m entre zanja y 1,5m de zona buffer. En otras palabras, el área que requiere para la infiltración está calculada en las siguientes tablas:

TABLA 52 ANCHO TOTAL DEL LECHO DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 PARA 20 PERSONAS APORTANTES. ELABORACIÓN PROPIA

ANCHO	ESPACIOS REQUERIDOS PARA LA CONSTRUCCIÓN	REQUERIDA	CANTIDAD REQUERIDA	TOTAL
	ANCHO DE ZANJA OCUPADA POR EL CAÑO	0,6m	3	1,8m
	ANCHO ZONAS BUFFER Y ESPACIOS ENTRE ZANJAS	1,5m	4	6m
ANCHO TOTAL				7,8m

TABLA 53 LARGO TOTAL DEL LECHO DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 PARA 20 PERSONAS APORTANTES. ELABORACIÓN PROPIA

LARGO	ESPACIOS REQUERIDOS PARA LA CONSTRUCCIÓN	VALOR	CANTIDAD REQUERIDA	TOTAL
	LARGO DEL CAÑO MÁXIMO PERMITIDO LINEALES	30m	1	30m
	ZONA BUFFER	1,5m	2	3m
	LARGO TOTAL			33m

De esta manera la superficie requerida mínima para el lecho de infiltración es de **257m²**.

El mismo caso sería al aplicar un coeficiente máximo de infiltración (Ci) de 26L*m⁻²*d⁻¹ valor extraído de la tabla 2 de la resolución antes nombrada. Siendo la superficie máxima requerida según la misma norma la expresada en la tabla siguiente:

ECUACIÓN 43

$$S = \frac{Q}{C_i} = \frac{\frac{4000L}{día}}{26 \frac{m^2}{L * día}} = 153,85m^2$$

Considerando ejecutar zanjas de 0,6m, se requerirán **256,42m** lineales para tratamiento por terreno de infiltración. En el mismo caso que el anterior, el largo máximo es 30m, por lo tanto, se requieren 9 caños para la disposición de las aguas residuales.

De la misma forma calculamos el área requerida como lo hicimos anteriormente y lo mostramos en la siguiente tabla:

TABLA 54 ANCHO TOTAL DEL LECHO DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 PARA 20 PERSONAS APORTANTES. ELABORACIÓN PROPIA

ANCHO	ESPACIOS REQUERIDOS PARA LA CONSTRUCCIÓN	REQUERIDA	CANTIDAD REQUERIDA	TOTAL
	ANCHO DE ZANJA OCUPADA POR EL CAÑO	0,6m	9	5,4m
	ANCHO ZONAS BUFFER Y ESPACIOS ENTRE ZANJAS	1,5m	10	15m
	ANCHO TOTAL			20,4m

TABLA 55 LARGO TOTAL DEL LECHO DE INFILTRACIÓN SEGÚN LA RESOLUCIÓN 200-I-2018 PARA 20 PERSONAS APORTANTES. ELABORACIÓN PROPIA

LARGO	ESPACIOS REQUERIDOS PARA LA CONSTRUCCIÓN	VALOR	CANTIDAD REQUERIDA	TOTAL
	LARGO DEL CAÑO MÁXIMO PERMITIDO LINEALES	30m	1	30m
	ZONA BUFFER	1,5m	2	3m
LARGO TOTAL				33m

De esta manera la superficie requerida máxima para el lecho de infiltración es de **673,2m²**.

Es así que el área requerida para el tratamiento de infiltración puede variar entre los **257m²** a los **673,2m²** según el C_i que se observe en el terreno.

14.6.2.3 ÁREA REQUERIDA PARA REÚSO DE AGUA RESIDUALES

En el caso del área requerida para reúso de las aguas residuales no se calculará debido que para realizar el cálculo se requiere información como el area total del terreno, tipos de planta, precipitaciones y otros parámetros que exceden el trabajo de este documento.

14.7 PLANO DEL HFSSH

El plano de tratamiento para reúso e infiltración en terreno se encuentra en el final de este documento en la sección de [ANEXO](#).

15 ANÁLISIS ECONÓMICO

El costo-beneficio cuando se utilizan los HC para tratamiento de efluentes es un análisis necesario, principalmente, para países en desarrollo. La evaluación económica se debe basar en dos componentes

- **Costo capital económico:** para la construcción de este de HFSSH se requiere tuberías de PVC, accesorios para las distintas conexiones, tratamiento de impermeabilización, vegetación, en algunos casos bombas y el relleno del HFSSH. En este último elemento estaría reflejada la mayor inversión. Cabe mencionar que, este análisis no tiene en consideración el costo del terreno porque, por lo general, ya se cuenta con el espacio requerido para el emplazamiento de este sistema.
- **Costo operación y mantenimiento:** están relacionados con la administración, mantenimiento y operación del HFSSH. Cabe destacar que, como ya analizamos gran parte del trabajo, los costos de energía y operación son relativamente bajos. Por otro lado, se debe considerar el costo para mantener al menos un personal activo que realice la poda y verificación del estado del humedal. Por otro lado, el control realizado por un técnico de aguas residuales que compruebe la evolución del tratamiento del humedal
- También se debe tener en cuenta a la hora de hacer el análisis el beneficio ambiental y la contrastación frente a diferentes alternativas.

Como primera medida para el desarrollo del análisis económico de este proyecto y, debido a la volatilidad de la moneda argentina (peso argentino, AR\$) en los tiempos en el que se realiza este documento, es necesario realizar la matriz económica en dólares estadounidenses (USD\$). El precio dólar oficial ronda los AR\$200, por lo tanto, el valor que se asume al momento del desarrollo de esta sección.

De esta manera, se procede a realizar la matriz de costos de construcción, operación y mantenimiento del HFSSH. Siguiendo el lineamiento de este trabajo de diferenciar los HFSSH con diferentes objetivos de tratamiento.

La primera tabla refleja los costos de la etapa de construcción del HFSSH con disposición final en lechos de infiltración, teniendo en cuenta la zona buffer calculada en la tabla 54:

TABLA 56: COSTOS DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA CONSTRUCCIÓN DE HFSSH NECESARIOS PARA CADA OBJETIVO DE TRATAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA

ELEMENTO	PRECIO UNITARIO	INFILTRACIÓN		REÚSO	
		CANT. REQ.	COSTO [USD\$]	CANT. REQ.	COSTO [USD\$]
<u>SUSTRATO</u>	108,5	10m ³	1.085	80m ³	8.680
<u>TUBERÍA DE PVC 100mmØ</u>	3,38	4m	6,76	14m	47,32
<u>CODO 90°</u>	1,44	3	4,32	3	4,32
<u>TEE PVC 110</u>	6,36	2	12,72	2	12,72
<u>ESTRUCTURA PLÁSTICA PARA LA REGULACIÓN DE LA ALTURA DEL PELO DE AGUA Y MEDICIÓN DEL CAUDAL</u>	617,47	1	617,47	1	617,47
<u>ROLLO DE POLIETILENO NEGRO DE 4x50m</u>	74,57	1	74,57	1	74,57
<u>MANTA GEOTEXTIL REFORZADA GRUESA 50m²</u>	12,02	1	12,02	4	48,08
<u>PLANTAS [EJ. JUNCO]</u>	7,95	48	381,6	588	4.674,6
<u>BOLSA DE CEMENTO</u>	14,58	1	14,58	1	14,58
TOTAL PARA CONSTRUCCIÓN DEL HFSSH		INF.	2.209,04 \$	REÚSO	9.503,73\$

En el caso de la etapa de operación y mantenimiento, la siguiente tabla muestra los costos anuales de esta etapa.

TABLA 57: COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL HFSSH DISEÑADO. ELABORACIÓN PROPIA

ETAPA	MATERIAL REQUERIDO	PRECIO UNIDAD [USD\$]	NECESIDAD ANUAL	COSTO TOTAL [USD\$]
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	<u>ANÁLISIS DE LABORATORIO MENSUAL [DBO/DQO/P_T/N_T]</u>	76,51	12	\$ 918,15
	<u>CONTROL MENSUAL REALIZADO POR UN PROFESIONAL DE AGUAS RESIDUALES [4hs]⁵</u>	55,32	12	\$ 663,87
	TOTAL			1.582,02\$

Como se observa los costos debido al espacio requerido para el uso de este tratamiento son muy diferentes como se muestra en la siguiente tabla:

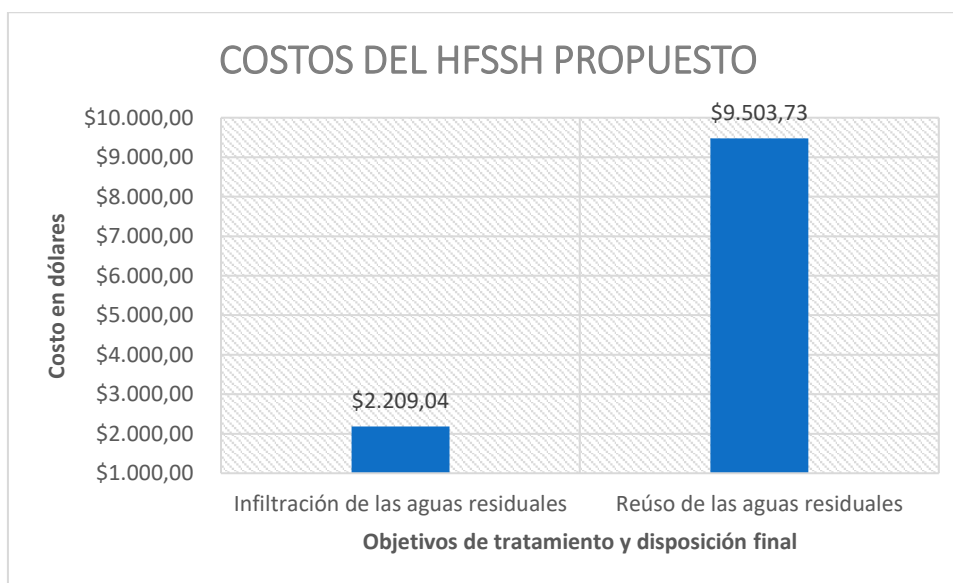


FIGURA 49: NOTA: COMPARACIÓN DE COSTOS SEGÚN OBJETIVOS DE TRATAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA

Finalmente, se compara el sistema de CS-HFSSH en términos de capital económico contra biodigestores comerciales de dos marcas conocidas. Estos sistemas están permitidos en el código de edificación en la ordenanza 2802-CM-16 de San Carlos de Bariloche. La razón es que este sistema se propone como tratamiento capaz de realizar un tratamiento de aguas residuales con desempeños mayores que una CS, según lo explicado por las empresas comerciales de tratamiento de AR. Siendo que, el biodigestor es una combinación de tratamiento primario y secundario anaeróbico.

⁵ El costo es noviembre 2022 actualizado a enero 2023 con un incremento del 10,25%.

Estos sistemas de tratamiento se presentan a continuación de las marcas conocidas WATERPLAST y ROTOPLAST:

Biodigestor Autolimpiable

La mejor tecnología para el tratamiento de efluentes cloacales urbanos y suburbanos, brindando una respuesta eficiente en el tratamiento de las aguas residuales de tu hogar.



- Más eficientes que una fosa séptica convencional.
- Evitan la contaminación de las napas freáticas. Únicos con tuberías en polipropileno
- Fácil mantenimiento.
- Sustentable.
- 5 años de garantía.



Con esferas Biolam® de mayor superficie

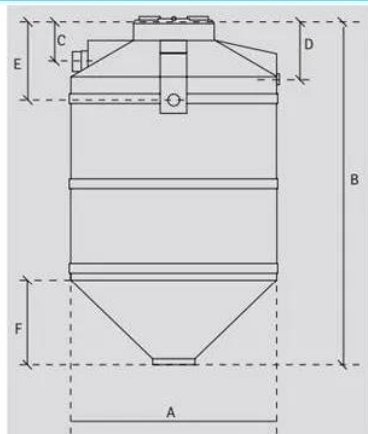
Capacidades y dimensiones

CAPACIDAD LITROS	DIÁMETRO	ALTURA	AGUAS NEGRAS TOT. PERSONAS	AGUAS NEGRAS Y JABONOSAS TOT. PERSONAS	OFICINAS TOT. PERSONAS	INDUSTRIAS TOT. PERSONAS
600l	91cm	167cm	5	2	20	6
1.100l	105cm	187cm	10	5	45	11
*2.000l	145cm	150cm	16	8	70	20
*2.500l	145cm	179cm	20	10	85	25
*3.000l	145cm	210cm	25	12	100	30

(*) Modelo base plana

FIGURA 50: NOTA: BIODIGESTOR WATERPLAST TRATAMIENTO. EXTRAÍDO DE WATERPLAST

Dimensiones



Características de equipos			
	BDR 600	BDR 1300	BDR 3000
A	90 cm	120 cm	200 cm
B	165 cm	197 cm	215 cm
C	25 cm	25 cm	25 cm
D	35 cm	35 cm	40 cm
E	48 cm	48 cm	62 cm
F	32 cm	45 cm	73 cm
caudal	600 lts	1300 lts	3000 lts



Tipo de Biodigestor

Dependiendo de la cantidad de habitantes de la vivienda y del diseño de la instalación, se podrá decidir el tamaño del biodigestor a colocar, para viviendas unifamiliares se considerara 2 habitantes por dormitorio volcando aguas negras y grises al equipo. En los casos de dividir la instalación en dos sectores, un sector con aguas negras y otro con aguas grises se deberá utilizar la planilla de capacidades.

Capacidades	600 Litros	1300 Litros	3000 Litros
Solo aguas negras	5 personas	10 personas	25 personas
Aguas negras y jabonosas	2 personas	5 personas	12 personas
Oficinas	20 personas	50 personas	100 personas
Industria	6 personas	13 personas	30 personas



FIGURA 51: NOTA: BIODIGESTOR WATERPLAST TRATAMIENTO. EXTRAÍDO DE ROTOPLAST



FIGURA 52: NOTA: BIODIGESTOR ROTOPLAST. EXTRAÍDO DE ROTOPLAST

Para el tratamiento de aguas residuales en ambos casos se requieren 2 unidades, los costos transformados se reflejan a continuación:

TABLA 58: COSTOS DE BIODIGESTORES CON VÍNCULOS ASOCIADOS. ELABORACIÓN PROPIA

BIODIGESTOR	PRECIO UNIDAD	UNIDADES REQUERIDAS	TOTAL
<u>WATERPLAST 3000L</u> <u>p/AR Negras y</u> <u>jabonosas</u>	3540USD\$	2	7080USD\$
<u>ROTOPLAST 3000L</u> <u>p/AR Negras y</u> <u>jabonosas</u>	2834USD\$	2	5668USD\$

A continuación se reflejan los costos de tratamiento para la infiltración de las AR:

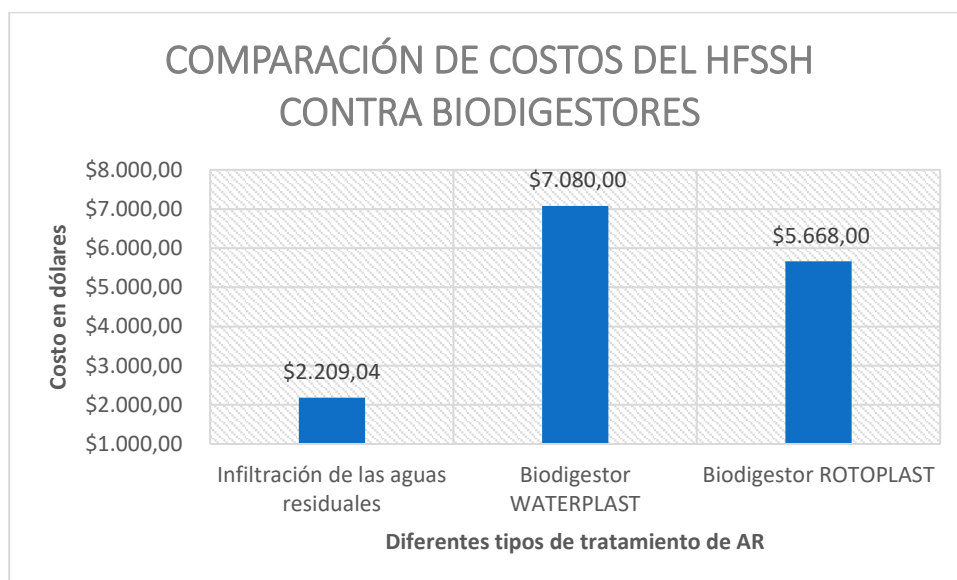


FIGURA 53: NOTA: COMPARACIÓN DE COSTOS DEL HFSSH CONTRA BIODIGESTORES COMERCIALES.
ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que el tratamiento propuesto en términos de costos económicos es menor en comparación a los biodigestores comerciales. No obstante, cabe mencionar que el sistema de HC requiere un pretratamiento de CS no incluido dentro de esta comparativa. Por otro lado, los costos de mantenimiento para el humedal son mayor ya que requiere un servicio de poda y control de estado del HC.

16 CONCLUSIONES

Para concluir, los HFSSH representan una excelente alternativa en el tratamiento de aguas residuales. Al momento de diseñar estos sistemas, los modelos Black-Box nos permiten adoptar un enfoque más conservador respecto a la reducción de contaminantes, lo cual puede aumentar los costos de construcción.

Hasta el momento no existe normativa que establezca los lineamientos para la aplicación de este tipo de sistemas. Por lo que, este modelo diseñado por Akratos y sus colaboradores se propone como un modelo fácilmente aplicable y nos permite evaluar rápidamente la viabilidad de un humedal construido en función de parámetros simples, como el TRH y la temperatura del agua residual. No obstante, es necesario que la autoridad de aplicación establezca parámetros de diseño sobre el material de relleno y temperaturas críticas, pudiendo ser las utilizadas en este trabajo.

Es evidente que la cámara séptica como único tratamiento de nutrientes de las aguas residuales resulta en un tratamiento deficiente de los efluentes, ya que tiene una perspectiva de tratamiento primario. Por otro lado, si bien la infiltración es un instrumento útil para el pulido en el tratamiento de AR, los nitratos y fósforo siguen siendo incorporados en el suelo y, como consecuencia, aumenta la posibilidad de que sean movilizados a cuerpos de agua. Por lo tanto, daría como resultado un aumento del riesgo de impacto ambiental negativo. Cabe resaltar que los lechos de infiltración, después de largos periodos de tratamiento, requieren que se cambien el lugar debido a que el suelo saturó su capacidad de absorción o el tratamiento efectivo de los diferentes contaminantes, como es el caso del fósforo. Por ende, esto derivará en que se requiera un plan de cierre y se disponga la infiltración en otro sitio que en muchos casos es limitado.

Dentro del mismo contexto, se puede explorar la posibilidad de utilizar humedales construidos como un sumidero de nutrientes, lo que contribuiría a reducir la incorporación directa de estos elementos al suelo y alargar la vida útil de los sistemas de infiltración. En otras palabras, el empleo de humedales construidos ofrece un mayor grado de control y gestión de estos compuestos, ya que el sustrato y la vegetación retiene los nutrientes excedentes. Y estos pueden ser removidos para su posterior utilización como biofertilizantes que permiten así la recuperación de nutrientes valiosos con diversos propósitos.

En este contexto, para hacer uso del relleno que ya cumplió con el objetivo del tratamiento en el HFSSH y la vegetación resultante de la poda, se propone algunos usos potenciales de los residuos en diversas actividades como:

- **Trasladados al relleno sanitario**, por ejemplo, para ser usado como material para realizar tareas de tapadas diarias.
- **Material de construcción** para diversos usos como adecuación de terreno o materia prima para construcción en sí misma. Por ejemplo, puede ser la utilización de este material para caminos dentro de la ciudad;
- Material para realización de **trabajos de paisajismo**;
- Material con nutrientes para realizar **proyectos de remediación**, como por ejemplo landfarming;
- Material para proyectos de **restauración de sitios degradados**. Por ejemplo, restauración de bordes de camino o taludes.
- Además, si se utiliza los residuos de poda y se pulveriza la grava, pueden ser compostados para **proyectos de viveros en generación de plantas ornamentales o forestales** debido al alto contenido de nutrientes y minerales.

Por otro lado, el agua está considerada un recurso natural importante y a medida que pasa el tiempo este interés en conservarla aumenta. Hoy en día se utiliza el agua con niveles de potabilidad para consumo humano con fines de riego. No obstante, si bien los costos aumentan en términos de espacio y capital para el reúso de agua para riego, estas pueden ser reutilizadas aprovechando los nutrientes que esta brinda para la vegetación local. Sumado que, permite la disminución de la presión que sufren las instalaciones de potabilización de aguas con el fin de cumplir con la demanda de agua en la ciudad.

A pesar de que en este documento solo evalúa las aguas residuales en términos de DBO₅, DQO, N_T y P_T las ARU generalmente contienen en su matriz componentes como patógenos y elementos traza que, en algunos casos, pueden llegar a ser peligrosos. No obstante, se detalló en la investigación que este tipo de humedales sirven para tratar efluentes de distintas industrias. Por un lado, muestran buenas eficiencias de remoción de patógenos, pero por el otro también, pueden servir como sistemas fitorremediadores removiendo del agua contaminantes que afectan a la salud disminuyendo también la presión sobre los servicios públicos de salud. Cabe mencionar que una parte de la población consume agua desde cursos subsuperficiales y estos pueden verse afectados por la infiltración de aguas residuales.

En cuanto a la calidad del tratamiento en los HC, se nota que, a pesar de las bajas temperaturas que experimenta la ciudad, las aguas residuales mantienen niveles de temperatura relativamente constantes a lo largo del día. En este contexto, el nitrógeno total se presenta como el nutriente limitante en el proceso de tratamiento. En consecuencia, requieren áreas de tratamiento más extensas,

calculándose en $0,6 \text{ m}^2/\text{Habitante}$ para el caso de infiltración. Mientras que, la aplicación del reúso exige un área significativamente mayor, llegando a $7,35 \text{ m}^2/\text{Habitante}$. Esto sugiere que el humedal diseñado en esta ocasión podría ser encuadrado como un tratamiento terciario o avanzado en términos de eliminación de nutrientes.

Es relevante mencionar que estos sistemas, en caso de mal funcionamiento, pueden ser modificados, renovados o readecuados según se requiera. Por ejemplo, una vez que se detecte que el fósforo no está siendo removido correctamente por el sistema, se puede cambiar el material de relleno para iniciar, nuevamente, la retención del mismo. Además, algunos autores mencionan que la recirculación de las aguas residuales o el aumento de la densidad de vegetación puede favorecer la remoción de nutrientes.

Respecto a los costos, en términos de construcción, se observa que son altos al inicio debido al porcentaje de terreno y materiales requeridos. Sin embargo, una vez finalizada la etapa de construcción, los costos de operación y mantenimiento, como se explicó a lo largo de este trabajo, serían relativamente bajos debido a que solo se debe realizar controles mensuales de los parámetros discutidos y una revisión periódica del estado del HFSSH por parte del personal de mantenimiento. Por otro lado, al contrastar el sistema frente a tratamientos comerciales como biodigestores se evidencia que este tipo de tratamiento es más barato en términos de capital económico. Cabe mencionar que, el espacio que estos requieren es mucho mayor al compararlos con los mismos sistemas.

De particular importancia, el mantenimiento de estos sistemas es relativamente bajo, pero esto no implica que no requiera atención en su funcionamiento. Principalmente, en los sistemas domiciliarios, aún requiere el retiro de sólidos en las unidades de pretratamiento y control de obstrucciones en todo el sistema. También la poda y el renuevo de las plantas es esencial, ya que la incorporación de nutrientes y materia orgánica en el tejido de la planta se ve reducido después de un lapso de tiempo de operación. Además, si el material muerto, no es removido, este se reincorporaría producto de la descomposición de la biomasa.

Asimismo, estos sistemas cumplen con una filosofía de ser sistemas energéticamente eficientes, ya que, si se logra aprovechar las pendientes existentes en la ciudad, también se logra evitar el uso de estaciones de bombeo. Al mismo tiempo, no requieren personal especializado en tratamiento, siendo este un recurso escaso para la ciudad. Considerando que, en la mayoría de los casos en San Carlos de Bariloche, los tratamientos de AR recaen en el personal de mantenimiento sin experiencia o sin estudios previos en este ámbito. y, por ende, el sistema termina siendo deficiente en un gran número de lugares.

Para finalizar, se pone en consideración los valores socioculturales, ambientales y económicos. Generalmente, las instalaciones de tratamiento de aguas residuales tienen una percepción negativa,

aunque su función sea el tratamiento y cuidado del ambiente. Sin embargo, la infraestructura verde conocidas ser soluciones basadas en la naturaleza para proporcionar opciones de gestión de los recursos hídricos con beneficios equivalentes o similares a las infraestructuras convencionales “grises” (construidas/ físicas). Por un lado, la imagen paisajística de San Carlos de Bariloche se puede ver afectada debido a el tratamiento deficiente, derivando en una pérdida en el ingreso del capital turístico. Pero, por otro lado, los HC, al estar integrados con el entorno y seguir un enfoque de desarrollo sostenible no provocan este rechazo sino que se ve como punto positivo a la hora de evaluar la elección del tratamiento. En este mismo sentido, existen casos en que, en términos de apariencia, la utilización de plantas ornamentales incrementa la estética; siendo que las personas empatizarían más con los HC como tratamiento de AR, incluso dándole la atención que estos sistemas requieren. Es importante destacar que muchas empresas, hoy en día, ofrecen manejo de imagen paisajística del entorno de los complejos turísticos siendo este un factor que pudiera ser incorporado en este aspecto.

17 BIBLIOGRAFÍA

Chang, N.-B. y otros, 2009. *Remoción de nutrientes y patógenos con un sistema pasivo innovador subsuperficial para tratamiento in situ.*, Kansas: American Society of Civil Engineers (ASCE).

Departamento de Servicios de Salud de California, 2006. *Posibles efectos en la salud relacionados con nitratos y nitritos en agua de pozos privados*, California: Rama de Investigaciones de Salud Ambiental

Moschione, E., 2011. Calidad de Aguas para Consumo Humano: Presencia de Nitrato en Aguas Subterráneas. Revisión del estado de situación. *Revista Tecnología y Ciencia- Noticias de Universidad Tecnológica Nacional*, 23(66).

Ramos Montaña, C., Cárdenas-Avella, N. M. & Herrera Martínez, Y., 2013. Caracterización de la comunidad de Macrófitas acuáticas en lagunas del Páramo de La Rusia (Boyacá-Colombia). *Revista Ciencia en Desarrollo*, 4(2), p. 10.

Abdelhakeem, S., Aboulroos, S. & Kamel, M., 2016. Desempeño de un humedal construido de flujo vertical bajo diferentes condiciones de operación. *Advanced research- Universidad del Cairo*, p. 12.

Aguado, R. y otros, 2022. Simulación y modelado de humedales construidos de flujo subsuperficial. *Procesos de ingeniería del agua*, p. 14.

Akratos, C., Papaspyros, J. & Tsihrintzis, V., 2008. Predicción de la eliminación total de nitrógeno y amoníaco en humedales artificiales de flujo subterráneo horizontal: uso de redes neuronales artificiales y desarrollo de una ecuación de diseño. *Bioresource Technology*, Volumen 100, p. 11.

Akratos, C., Papaspyros, J. & Tsihrintzis, V., 2008. Una red neuronal artificial para el modelado y diseño de ecuaciones de predicción de remoción de DBO y DQO en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. *Chemical Engineering*, p. 15.

Akratos, C., Papaspyros, J. & Tsihrintzis, V., 2009. Uso de redes neuronales artificiales en la predicción de remoción de ortofosfato y fósforo total en humedales artificiales de flujo subterráneo horizontal. *Ingeniería en biosistemas*, p. 12.

Akratos, C. & Tsihrintzis, V., 2007. Efecto de la temperatura, TRH, vegetación y porosidad del medio en la eficiencia de remoción de una planta pilto de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal. *ecological engineering*, p. 19.

Alarcón Herrera, M. T., Zurita Martínez, F., Lara-Borrero, J. & Vidal Sáez, G., 2018. *Humedales de tratamiento : alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Alianza por el Agua, 2008. *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. s.l.:Cento.

- Allen, L., 2015. *Manual de diseño para manejo de aguas grises para riego exterior*. s.l.:Greywater Action .
- Angeles Hernández, J. M., Ojeda Bustamante, W. & Cisneros Estrada, X., 2018. *Métodos de riego y prácticas de manejo de cultivo para el uso de las aguas residuales tratadas en la agricultura en México- IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje*. Aguas Calientes, Institucion Mexicano de tecnología del agua.
- Ann, Y., Reddy, K. & Delfino, J., 1999. Influencia del potencial redox en la solubilidad del fósforo en suelos modificados químicamente. *Ecological Engineering*, Volumen 14, p. 11.
- Ansari, M. I., Schiwon, K., Malik, A. & Grohmann, E., 2014. Capítulo 11. En: *Formacion de biofilm por bacterias del ambiente*. s.l.:s.n., p. 38.
- Arciniega Tenemaza, A. E. & Salazar Chacha, J., 2021. *Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados para la comunidad de Pesillo, Parroquia Olmedo.-Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: Ingeniero e Ingeniera Ambiental..* [Arte] (Universidad Politécnica Selesiana).
- Arias, C. & Brix, H., 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Volumen 13, p. 8.
- Arias, C., Del Bubba, M. & Brix, H., 2000. Eliminación de fósforo mediante arenas para uso como medio en lechos de caña en un humedal de flujo subsuperficial. *Water Research*, 35(5), p. 1159–1168.
- Arteaga-Cortez, V. y otros, 2020. Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencia del agua*.
- Asociación de Academias de la Lengua Española (ASALE), 2022. *Real Academia Española*. [En línea] Available at: <https://dle.rae.es/sustrato> [Último acceso: 2022 05 26].
- Asociación Internacional del Agua (IWA), 2006. *Humedales construídos para control de la contaminación- Proceso, performance, diseño y operación*. London: s.n.
- Belda Ibañez, E., 2015. *Desarrollo de herramientas para el análisis y modelación de calidad de aguas en humedales. Aplicación en el ámbito del parque natural de la Albufera de Valencia [Trabajo Master en Ingeniería Hidráulica y medio ambiente]*. [Arte] (Universidad Politécnica de Valencia).
- Bermeo Garay, M. M., 2016. *Tratamiento de aguas residuales: Técnicas convencionales*. Segunda ed. Guayaquil - Ecuador: s.n.
- Bres, P., s.f. *Optimización de la digestión anaeróbica mesofílica del guano de aves ponedoras*. [Arte] (Universidad Nacional de San Martín).
- Brix, H., 1994. Uso de humedales construidos en control de contaminación de aguas. Desarrollo histórico , presente y expectativas futuras. *Water science technology*, 30(8), p. 16.

- Burubai, W., Akor, A., Lilly, M. & Ayawari, D., 2007. Evaluación de la eficiencia de tanques sépticos en el estado de Bayelsa, Nigeria. *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal.*, Volumen 9, p. 9.
- Cáceres Magnus, H., 2018. *Principios para la construcción y mantenimiento de tu sistema de saneamiento*, La Paz: Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia.
- Chandra, R., Dubey, N. K. & Kumar, V., 2018. *Fitoremediación de contaminantes medioambientales*. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press.
- Chang, R., 2003. *Química*. Séptima ed. México: McGraw-Hill.
- Chislock, M., Doster, E., Zitomer, R. & Wilson, A., 2020. Eutrofización: Causas, consecuencias y control en sistemas acuáticos. *Nature Education Knowledge*, p. 9.
- Comisión Nacional del Agua, s.f. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales*. México: s.n.
- Cordoba, J., Ottaviano, A., Mariñelarena, A. & Di Giorgi, H., 2015. *Diseño y construcción de un sistema de depuración de aguas residuales de una quesería familiar en General Rodriguez*, Paraná: s.n.
- Crites, R., Middlebrooks, J., Bastian, R. & Reed, S., 2014. *Sistema natural de tratamiento de aguas residuales*. Segunda ed. New York: CRC Press-Taylor & Francis Group.
- Custodio, E. & Llamas, M. R., 1983. *Hidrología subterránea*. Segunda ed. Barcelona: Omega.
- Darby, J. L. & Leverenz, H., 2004. *Eliminación de virus, fósforo y nitrógeno en procesos de tratamiento de aguas residuales in situ- UC Water Resources Center- Informe técnico de finalización (TCR) para el proyecto WRC W-953*, s.l.: s.n.
- De Anda, J., López-López, A., Villegas-García, E. & Valdivia Aviña, K., 2018. Tratamiento y reúso de Aguas residuales domésticas de alta concentración de contaminantes con métodos en sitios pasivos. *Water-MDPI*, 10(99), p. 14.
- Defo, C., Kaur, R., Bharadwaj, A. & Kumar, P., 2017. Aproximaciones de modelado para simular las dinámicas de contaminantes en humedales. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, p. 39.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F. & Andrade, M., 2010. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba: s.n.
- Departamento provincial de aguas- Provincia de Rio Negro, 2015. *Resolución N° 885/15- Boletín oficial 5379*, Rio Negro: s.n.
- Di Domenico, E. G. y otros, 2015. Desarrollo de un biofilm electroactivo y oxidador de amonio aneróticamente (ANAMMOX) de un digesto en celdas microbianas. *Biomed*.
- Dotro, G. y otros, 2021. *SERIE TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES: Humedales para tratamiento*. Séptima ed. s.l.:IWA Publishing.

DuPoldt, C. y otros, 1995. *Manual de humedales contruidos- Una guía para la construcción de humedales para aguas residuales provenientes de: agricultura, doméstica, minería y aguas pluviales*. Washington: s.n.

El-Khateeb, M. & El-Bahrawy, A., 2013. Tratamiento posterior extensivo utilizando humedales artificiales. *Life Science*, p. 9.

ENOHSA- Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento- Secretaria de obras publicas- Presidencia de la Nación, s.f. *Normas de estudio, criterios de diseño y presentación de proyectos de desagûes cloacales*, s.l.: s.n.

Escobar, D., Escobar, G., Escobar, P. & Enrique, C., 2016. *Geomecánica*. Universidad Nacional de Colombia. s.l.:s.n.

Espigares García & Pérez López, s.f. *Aguas residuales- Composición*. [En línea] Available at: https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf

Estado de Michigan, Departamento Ambiental de Calidad, 2017. *Cámaras sépticas y nutrientes*, s.l.: Estado de Michigan.

Fernández-Alba, A. R. y otros, 2006. *tratamientos avanzados de aguas residuales*. Primera ed. Madrid: Universidad de Alcála del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía.

Fu, X. y otros, 2018. Sistema de humedal construído para tratamiento de aguas residuales para una sola casa rural en clima subtropical. *Water*, p. 12.

Gargallo Bellés, S., 2017. *Modelación de la calidad de las aguas en los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS). Aplicación a los HAFS del Tancat de la Pipa en l'Albufera de València [Tesis Doctoral]*. [Arte] (Universidad Politécnica de Valencia).

Giuliano Albo, M. & Blarasin, M., 2014. Hidrogeoquímica y estimación del fondo natural de nitratos del agua subterránea en un agroecosistema del pedemonte de la sierra de Comechingones. *SCIELO-Asociación geológica argentina*, 71(3).

Gonzalez Restrepo, D., 2015. *Remoción de contaminantes en humedales contruidos de flujo vertical sembrados con Heliconia Psittacorum y alimentados con diferentes frecuencias, Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo Químico*. [Arte] (Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de tecnología, escuela de química).

González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G. & Chávez-Ramírez , E., 2012. Porosidad del suelo en tres superficies típicas de las cuencas altas del río Nazas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), p. 9.

- González, M. & César Saldarriaga, J., 2008. Remoción biológica de materia orgánica. nitrógeno y fósforo en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio. *Revista EIA-ISSN 1794-1237* , Issue 10, pp. p 45-43.
- Gray, N., 2004. *Biología del tratamiento de aguas residuales*. Segunda ed. London: Imperial College Press.
- Guerrido , C. & Fernández, D., 2019. *Flora Patagonica*. 2 ed. s.l.:Ecoval.
- Henneck, J. & Axler, R., 2001. Residential subsurface flow treatment wetlands in northern Minnesota. *Water Science & Technology*, 44(11-12), pp. 345-352.
- Herren, L. y otros, 2021. Los sistemas sépticos impulsan el enriquecimiento de nutrientes de las aguas subterráneas y la eutrofización en la laguna urbanizada de Indian River, Florida. *Marine Pollution Bulletin*, Volumen 172, p. 14.
- Ibáñez, J. J., 2010. *Agricultura Sin Suelo: Suelos y Sustratos-Un Universo invisible bajo nuestros pies-Los suelos y la vida-Madrid Blogs*. [En línea] Available at: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/10/26/136863#:~:text=Un%20sustrato%20es%20todo%20material,de%20soporte%20para%20la%20planta>. [Último acceso: 2022 5 26].
- Jenssen, P. y otros, 2010. Sistemas de camas filtrantes para tratamiento de aguas residuales domésticas en países nórdicos- Performance y reuso del medio filtrante. *Ecological Engineering*, p. 9.
- Jenssen, P., Mæhlum, T. & Krogstad, T., 1993. Potencial uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales en climas del norte. *Water Science*, p. 10.
- Jørgensen, S. & Bendoricchio, G., 2001. *Fundamentos del modelado ecológico*. Tercera ed. s.l.:ELSEVIER.
- Kadlec, R. H., 2000. La insuficiencia de los modelos de humedales de tratamiento de primer orden. *Ecological Engineering*, p. 15.
- Kadlec, R. y otros, 2000. *Humedales construidos para control de la contaminación*. s.l.:IWA-Grupo de especialistas.
- Kadlec, R. & Wallace, S., 2008. *Humedales de tratamiento*. Segunda ed. Boca Raton: CRC Press.
- Kiiza, C., Pan, S.-q., Bockelmann-Evans, B. & Babatunde, A., 2020. Predicción de la remoción de contaminantes en humedales construidos usando redes neuronales artificiales (RNA). *Ciencia del agua y ingeniería*, p. 10.
- Kolb, P., 1998. *Diseño de un humedal construido (planta piloto) para la recuperación del río Besós*, Tesis de diploma para obtener el grado académico de ingeniería, Universität für Bodenkultur. [Arte] (Universidad de Bodenkultur).

- Kumar, J. L. & Zhao, Y., 2011. Una revisión de numerosos enfoques de modelado para humedales de tratamiento efectivo, económico y ecológico. *Journal of Environmental Management*, Volumen 92.
- Lemley, D. & Adams, J., 2018. Eutrofización. *Earth Systems and Environmental Sciences*.
- Li, J. y otros, 2022. Efecto cruzado de las propiedades del sustrato de los humedales en las propiedades ANAMMOX en tres humedales construidos para el tratamiento de nitrógeno en bajas relaciones C/N. *Journal Enviroment Managment*.
- Liolios, K., Tsihrintzis, V., Angelidis, P. & Georgiev, K., 2016. Simulación numérica para humedales construidos de flujo subsuperficiales: una breve revisión que incluye efectos geotermiales y soluciones en los límites de procesos de biodegradación. *Instituto Americano de Fisica*.
- Liwa, E. J., 2006. *Un modelo de red neuronal para la clasificación de la estructura de la vegetación de los humedales costeros con datos de espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS)*. [Arte] (Universidad de Lousiana).
- Li, W. y otros, 2018. Uso de una red neuronal artificial de retropropagación para predecir la eliminación de nutrientes en humedales artificiales de flujo de marea. *Water*, 10(83), p. 17.
- Londoño Cardona, L. A. & Venegas, C. M., 2009. *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética*. [Arte] (Universidad Tecnológica de Pereira).
- Lusk, M. y otros, 2017. Una revisión del destino y el transporte de nitrógeno, fósforo, patógenos y sustancias químicas orgánicas traza en los sistemas sépticos. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, p. 187.
- Madigan, M. T. y otros, 2015. *Brok-Biología de los microorganismos*. Catorce ed. Madrid: Pearson.
- Maehlum, T., Jenssen, P. & Warner, W., 1995. Humedales construidos de climas fríos. *Water Science*, p. 7.
- Manzo, L. y otros, 2020. Estanques diseñados como soluciones ambientales y ecológicas en el medio urbano ciclo del agua: un estudio de caso en la patagonia. *Ecological Engineering*, 15(105915), p. 9.
- Mara, D., 2004. *Tratamiento de aguas residuales domésticas en países en desarrollo*. Primera ed. London: Earthscan.
- Mariñelarena, A., 2006. *Manual de autoconstrucción de un sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliarias*. 1 ed. La Plata: FREPLATA.
- Mariñelarena, A., 2010. *Naturaleza y tratamiento in situ de Aguas residuales a pequeña escala*. Embalse, Córdoba, APN, Centro de formación y Capacitación.
- Mena Cabrera, P. A., 2016. *Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el*

colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Mu. [Arte] (Universidad de Buenos Aires- Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).

Menendez Gutierrez, C. & Pérez Olmo, J., 2007. *Procesos para el tratamiento biologico de aguas residuales*. La Habana: Editorial Universitaria .

Mihelcic, J. & Zimmerman, J., 2012. *Ingeniería ambiental: fundamento, sustentabilidad y diseño*. s.l.:Alfaomega.

Mikkelsen Jensen, M., 2020. *Propuesta para el tratamiento de efluentes provenientes de la elaboración de cerveza artesanal*. [Arte] (Facultad de Ingeniería – UNCPBA).

Ministerio de turismo– Presidencia de la Nación, 2018. *Pliego Parte 2 (PLIEG-2018-11782151-APN-SCEIT#MTU)- PROYECTO “IBERÁ SALVAJE”. CENTRO DE INTERPRETACIÓN, REFACCIÓN Y AMPLIACIÓN*, CARLOS PELLEGRINI. DEPARTAMENTO SAN MARTÍN: s.n.

Mitchell, C. & McNevin, D., 2001. Análisis alternativo de la remoción de DBO en humedales artificiales de flujo subsuperficial empleando cinética Monod. *Water Research*, 35(5).

Municipalidad de San Carlos de Bariloche, 2018. *Resolución 200-I-2018 de la Ordenanza 2802-CM-16*. s.l.:s.n.

Municipalidad de San Carlos de Bariloche, s.f. *Ordenanza 2802-CM-16*. s.l.:s.n.

Municipalidad de San Martin de los Andes- Alvarez Mario, 2018. *Diseño ejecutivo de tratamiento de efluentes- Red de cloacas Kaleuche-Covisal*, San Martin de los Andes: Ministerio del interior, obras públicas y viviendas, Presidencia de la Nacion Argentina.

Murray, C. & Hamilton, A., 2010. Perspectivas de tratamiento de aguas residuales y conservación de aves acuáticas. *British Ecological society, Journal of Applied Ecology*, Volumen 47, p. 10.

Naranjo Ríos, Y., 2017. *Trabajo Fin de Máster: Estudio para mejorar la eliminación de fósforo en humedales artificiales empleando fangos generados en la potabilización del agua, mediante procesos de adsorción. Aplicación a la potabilizadora LA PRESA (Manises, Valencia)*.. [Arte] (Universidad Politécnica de Valencia).

Nasr, F. & Mikhaei, B., 2013. Tratamiento de aguas residuales domésticas usando tanques sépticos convencionales y modificados. *Environmental Technology*, 34(16), p. 9.

ONU- HABITAT, 2008. *Manual de Humedales Artificiales. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos*. s.l.:s.n.

Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, 2009. *Guía descriptiva de suelos*. Cuarta ed. Roma: FAO.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO), 2019. *La contaminación del suelo: una realidad oculta*, Roma: FAO.

- Ouellet-Plamondon, C., Chazarenc, F., Comeau, Y. & Brisson, J., 2006. Aireación artificial para incrementar la remoción de contaminantes en humedales construidos en climas fríos. *Science Direct*, p. 7.
- Pacheco Avila, J., Pat Canul, R. & Cabrera Sansores, A., 2002. Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería*, 6(3), pp. 73-81.
- Qin, R. & Chen, H., 2016. *El proceso de mecanismos de remoción de contaminantes de humedales construidos*,. China, 4th International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering.
- Rahman, M. E. y otros, 2020. Diseño, operación y optimización de humedales construidos para remoción de contaminantes. *Environmental Research and Public Health- MPDI*, 17(8339), p. 40.
- Ramalho, R., 2003. *Tratamiento de aguas residuales*. Segunda ed. Barcelona: Reverté.
- Rivera Díaz, F. . A. & Arévalo Sánchez, K. L., 2015. *Dimensionamiento de un humedal artificial como alternativa para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional de Ucayali*, PUCALLPA: Universidad Nacional de Ucayali.
- Rodriguez-Dominguez, M., Konnerup, D., Brix, H. & Arias, C., 2020. Humedales construidos en Latino América: Una revisión de las experiencias en la ultima decada. *Water*, 12(1744), p. 30.
- Rodríguez, S. y otros, 2012. Relación del nitrato sobre la contaminación bacteriana del agua. *SCIELO-Terra Latinoamericana*, 30(2).
- Rosales Escalante, E., 2005. Tanques sépticos. Conceptos teóricos base y aplicaciones. *Tecnología en Marcha*, 18(2), p. 8.
- Rousseau, D., Vanrolleghem, P. & De Pauw, N., 2004. Modelos basados en Humedales Construidos de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales: una revisión. *Water Research- ELSAVIER*, p. 10.
- Rozema, E. y otros, 2016. Humedales construidos para tratamiento de aguas residuales agroindustriales en el noreste de América: una revisión. *Water*, p. 15.
- Ruiz, O. A. A. L. J. R. B. & L. M., 2017. *Planta Piloto para el análisis del rendimiento de la depuración de aguas fecales mediante macrófitas*. - Línea temática C, 15.. s.l., Jornada de Ingeniería del agua 2017.
- Sánchez-Olivares, E., Marín-Muñiz, J. L. & Hernández-Alarcón, M. E., 2007. Liberación de oxígeno radial por las raíces de las plantas nativas de humedales tropicales costeros de Veracruz en respuesta a diferentes condiciones de inundación. *Botanical sciences*.
- Seoanez Calvo, M., 1995. *Aguas residuales urbanas - Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*, Madrid: Mundi-Prensa Libros.

Servicio Meteorológico Nacional- Argentina, 2022. SMN. [En línea]
Available at: <https://www.smn.gob.ar/>

[Último acceso: 2022].

Singh Sagar, S., Kumar, R. & Deshpande Kaistha, S., 2016. Biopelícula- Una eterna crónica de la bacteria. *Indian Journal of Comparative Microbiology, Immunology and Infectious Diseases*, 37(2), p. 87.

Steer, D., Fraser, L., Boddy, J. & Seibert, B., 2002. Eficiencia de un pequeño humedal construido para el tratamiento subsuperficial del efluente generado por una sola familia.. *Ecological Engineering*, p. 12.

Stefanakis, A., Akratos, C. S. & Tsihrintzis, V. A., 2014. *Humedales contruidos de flujo verticales: Sistemas de ecoingeniería para el tratamiento de aguas residuales y lodos*. 1 ed. Amsterdam, Netherlands: ELSEVIER.

Stein, O., Biederman, J., Hook, P. & Allen, W., 2006. Efectos de las especies de plantas y la temperatura en el modelo de primer orden k-C* para la eliminación de DQO en humedales SSF cargados en baches. *Ecological Engineering*, Volumen 26, pp. 100-112.

Sudarsan, J. y otros, 2015. Performance del tratamiento de aguas residuales domésticas usando humedales contruidos. *Water resource Manage*, p. 8.

Tchobanoglous, G., Burton, F. & Stensel, D., 2016. *Metcalf & Eddy, INC-Ingeniería de aguas residuales- Tratamiento y reuso*. Cuarta ed. s.l.:McGraw-Hill.

UNESCO-Educación, ciencia y cultura, 2003. *Agua para las personas, agua para la vida- Resumen ejecutivo de la ONU- Reporte del desarrollo del agua*. [En línea].

Van der Star, W., Banciu, H. & Kleerebezem, R., 2009. El proceso ANAMMOX y sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales. *Studia universitatis babes-bolyai- Reserchgate*, Volumen 2, pp. 97-110.

Vassallo, C. G. M. S. B. A. G. A. L. T. J. M. L., 2008. *Manual para el manejo de efluentes de Tambo*. primera ed. Montevideo.: s.n.

Vera, A. y otros, 2010. Remoción de nutrientes y materia orgánica en huedales contruidos, en función del desarrollo de macrófitas Typha Domingensis Pers. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*.

Vesilind, A., Morgan, S. & Heine, L., 2004. *Introducción a la ingeniería ambiental*. Tercera ed. Mexico: Cengage Learning.

Vidal, G. & Hormazábal, S., 2018. *Humedales contruidos, dieño y operación*, Concepción: Universidad de Concepción.

Viraraghavan, T., 1985. Efectos de la temperatura in situ en los sistemas de tratamientos y disposición de aguas residuales. *National Environmental Health Association (NEHA)*, 48(1), p. 5.

- Von Sperling, M., s.f. *Características de las aguas residuales, Tratamiento y disposición*. s.l.:IWA-Desa.
- Vymazala, J. & Kröpfelová, L., 2008. Remoción de materia orgánica con humedales construidos con flujo subsuperficial: una revisión de experiencia en campo. *ScienceDirect*, p. 12.
- Vymazal, J., 2022. El histórico desarrollo de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. *Land*, 11(174), p. 29.
- Vymazal, J. & Kröpfelová, L., 2008. *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*. s.l.:Springer Science.
- Wang, M., Zhang, D. Q., Dong, J. W. & Tan, S. K., 2016. Humedales construidos para tratamiento de aguas residuales en climas fríos- Un repaso. *ScienceDirect*, p. 19.
- Wetlands International, 2003. *El uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales*. Malasia: s.n.
- Wu, H. y otros, 2015. Una revisión de la sustentabilidad de los humedales construidos para tratar aguas residuales: diseño y operación. *Bioresource Technology*, p. 8.
- Wu, S. y otros, 2014. Desarrollo de humedales construidos en intensificaciones de rendimiento para el tratamiento de aguas residuales: una revisión específica de nitrógeno y materia orgánica. *ScienceDirect*, p. 16.
- Xu, D., Xu, J., Wu, J. & Muhammad, A., 2006. Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems. *Chemosphere*, Volumen 63, p. 344–352.
- Zanuttín, G., 2018. *Comparación de sistemas de tratamiento de efluentes para un hotel en ambiente urbano. Dimensionamiento del proceso seleccionado*. [Arte] (Universidad Nacional de Río Negro- Especialización en Tratamiento de efluentes y residuos orgánicos).
- Zhu, D., Sun, C., Wu, Z. & Zhang, Y., 2012. Rol de la vegetación, tipo de flujo y profundidad en el tratamiento de aguas residuales ganaderas a través de humedales construidos a base de desechos mineralizados de niveles múltiples. *Ingeniería Ecológica*, p. 9.
- Zidan, A., Rashed, A., Hatata, A. & Abd El-Hady, M., 2015. *Redes neuronales artificiales para predecir tratamientos en aguas residuales en diferentes medios de humedales construidos de flujo subsuperficial*. s.l., IOWTA, p. 11.

18 ANEXOS

18.1 ABREVIATURAS

1/S	Área específica inversa
ACP	Análisis de componentes principales
A_H	Área humedal

ANAMMOX Oxidación Anaerobia de Amonio

ANN	Red Neuronal Artificial
AOA	Arqueas Oxidantes de Amonio
AR	Aguas Residuales
ARU	Aguas Residuales Urbanas
BOA	Bacterias Oxidantes de Amonio
BF	Aporte de barros frescos
C*	Concentración de fondo
CC	Carrizo Común
CEB	Cooperativa de Electricidad Bariloche Ltda.
C_{in}	Concentración entrada

COCAPRHI Control de Calidad y Protección del os Recursos Hídricos Provinciales

C_{out}	Concentración salida
CR	Canto Rodado
CS	Cámara Séptica
D	Diámetro
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DTD	Distribución de los Tiempos de Detención

ENOHSA Ente Nacional De Obras Hídricas De Saneamiento

FP	Flujo Pistón
GF	Grava Fina
GM	Grava Media
HAB	Habitante Aportante
HC	Humedal/es Construido/s

HFS	Humedal/es Construido/s de Flujo Superficial
HFSS	Humedal/es Construido/s de Flujo Subsuperficial
K	Constante de degradación
K_A	Constante de degradación de área
K_C	Constante de degradación según el contaminante
K_V	Constante de degradación volumétrica
L_A	Ancho humedal
L_H	Altura CS
L_L	Largo humedal
M	Valor muestreado
MLP	Perceptrón Multicapa
n	Porosidad
N	Numero de tanques
NIPALS	Nonlinear Iterative Partial Least Squares
N_T	Nitrógeno Total
OD	Oxígeno Disuelto
P_d	Permanencia mínima en zona de digestión
P_T	Fósforo Total
Q	Caudal
q	Caudal por habitante aportante diario
q_A	Caudal diario por habitante aportante
R_C	Porcentaje remoción de contaminantes
S_F	Sólidos Fijos
S_V	Sólidos Volátiles
S_T	Sólidos Totales
TDS	Sólidos Totales Disueltos
T_{HD}	Tiempo mínimo de detención Hidráulica
TIS	Tanques en serie

TL	Espadaña
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
TSS	Sólidos Sedimentables
VA	Volumen requerido para el almacenamiento de barros frescos
V_{MCS}	Volumen Mínimo de CS
VG	Volumen de grasas y aceites
V_H	Volumen humedal
V_{MH}	Volumen Mínimo de zona de sedimentación
V_{TCS}	Volumen total de CS

18.1 BIOFILM- BIOPELÍCULA

El biofilm es una comunidad compleja de microorganismos en la que estos están adheridos a una superficie y rodeados por una matriz de sustancias extracelulares y exopoliméricas producidas por las células bacterianas que lo componen. Esta estructura y organización tridimensional proporciona protección contra el estrés ambiental. La formación de biopelículas ocurre como resultado de una secuencia de eventos: adhesión de células microbianas individuales a una superficie, proliferación celular y agregación en micro colonias, producción de matriz y desprendimiento de células. El inicio de la formación de biopelículas se caracteriza por la interacción entre las células bacterianas y la superficie, así como entre las propias células (Ansari, *et al.*, 2014; Singh Sagar, *et al.*, 2016).

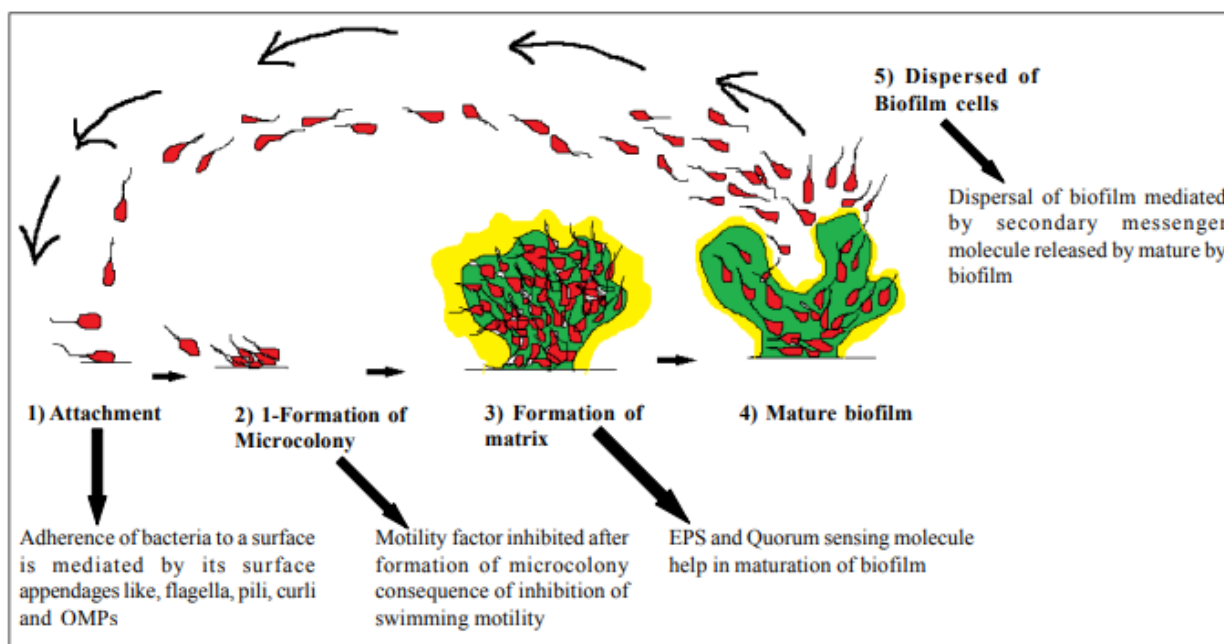


FIGURA 54: NOTA: FORMACIÓN DEL BIOFILM. EXTRAÍDO DE [RESERCHGATE](#)

18.2 MACRÓFITAS

Las plantas macrófitas son aquellas que prosperan en ambientes acuáticos e inundables, desarrollando adaptaciones que les permiten crecer, reproducirse y sobrevivir en condiciones de inundación o encharcamiento durante largos períodos. Se pueden clasificar según su morfología y fisiología (Ramos Montaña, *et al.*, 2013):

- ❖ **Plantas macrófitas emergentes:** son generalmente plantas perennes que tienen órganos reproductores aéreos y viven en suelos anegados de forma permanente o temporal.
- ❖ **Plantas macrófitas de hojas flotantes:** estas son principalmente angiospermas, cuyos órganos reproductores flotan o se encuentran en la superficie del agua, y viven sobre suelos anegados.
- ❖ **Plantas macrófitas sumergidas:** aunque en su mayoría son tipo helechos, musgos, etc., también se incluyen angiospermas. Este tipo de plantas se encuentran en zonas iluminadas por la luz solar y generalmente no viven (en el caso de angiospermas vasculares) a profundidades mayores a unos 10 metros. Sus órganos reproductores pueden ser aéreos, flotantes o sumergidos.

- ❖ En el argot del sector de las **plantas ornamentales** y en especial en los de la **bioingeniería del paisaje y restauración paisajística**, se acuña o refieren al término de plantas macrófitas, básicamente a un grupo de **plantas acuáticas** que permiten ser utilizadas en estos campos con garantía de éxito en cuanto a los resultados que se esperan de ellas.

Además, las **plantas palustres** son aquellas plantas que están en lugares bordean los hábitats acuáticos y que presenta los órganos perdurables sumergidos bajo el agua.

18.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS FRENTE AL USO Y PRESENCIA DEL OXÍGENO:

Los microorganismos se clasifican en diferentes categorías según su respuesta a la presencia de oxígeno, como se describe en (Madigan, *et al.*, 2015):

- ❖ **Aerobios:** Estos microorganismos pueden crecer en presencia de oxígeno y utilizan el O₂ en su metabolismo. Algunos aerobios son:
 - ✓ Los **microaerófilos**, son aerobios que pueden utilizar el oxígeno solo cuando está presente en concentraciones más bajas que las del aire (condiciones microóxicas). Esto se debe a que su capacidad de respiración está limitada o porque contienen enzimas sensibles al oxígeno.
 - ✓ **Facultativos:** son aerobios que pueden crecer en ausencia de oxígeno en condiciones adecuadas de nutrientes y cultivo.
- ❖ **Anaerobios:** estos microorganismos no pueden utilizar el oxígeno para su metabolismo. Se dividen en dos categorías:
 - ✓ Los **anaerobios aerotolerantes**, pueden tolerar la presencia de oxígeno, pero no lo utilizan para su crecimiento y metabolismo.
 - ✓ Los **anaerobios estrictos**, el oxígeno inhibe o incluso puede ser letal para ellos, por lo que requieren ambientes completamente libres de oxígeno para crecer y sobrevivir.
- ❖ Cuando hablamos de "hábitats microbianos anóxicos", nos referimos a ambientes donde no hay presencia de oxígeno. En estos lugares, los microorganismos anaerobios pueden prosperar, ya que no dependen del oxígeno para su funcionamiento metabólico

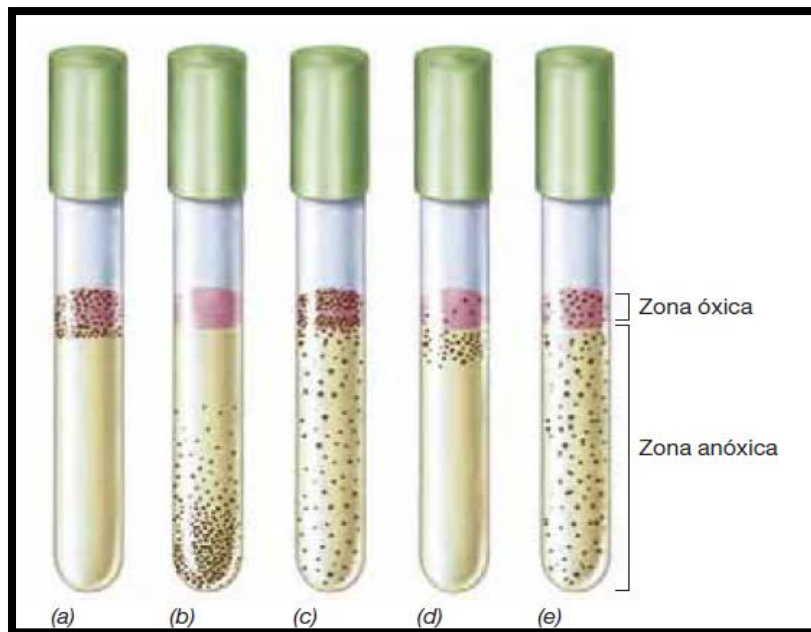


FIGURA 55: NOTA: MICROORGANISMOS Y SU RESPIRACIÓN.
EXTRAÍDO DE MADIGAN ET AL (2015)

a → aerobios
b → anaerobios
c → Aerobios facultativos
d → Microaerófilos
e → Anaerobios
aerotolerantes

En resumen:

TABLA 59: TIPOS DE RESPIRACIÓN REALIZADA POR LOS MICROORGANISMOS. EXTRAÍDO DE MADIGAN, ET AL., (2015)

GRUPO		RELACIÓN CON EL OXÍGENO	TIPOS DE METABOLISMO
AEROBIO	Estricto	Necesario	Respiración aerobia
	Facultativo	No es necesario, pero funciona mejor con el O ₂	Respiración aerobia, Respiración anaerobia y fermentación
	Microaerófilo	Necesario en pequeñas concentraciones (menor a la atmosférica)	Respiración aerobia
ANAEROBIO	Aerotolerante	No es necesario, no crecen mejor con el O ₂	Fermentación
	Estricto	Dañino o letal	Fermentación o respiración anaerobia

18.4 CLASIFICACION SEGÚN USO DEL CARBONO Y OBTENCIÓN DE ENERGIA

TABLA 60: CLASIFICACIÓN DE LOS ORGANISMOS SEGÚN LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA. EXTRAÍDO MADIGAN, ET AL., 2015

FUENTE DE ENERGÍA	Luz	FOTÓTROFOS: Obtienen energía por medio de energía solar
	Química	QUIMIOORGANÓTROFOS: Organismos que obtienen energía a partir de compuestos orgánicos QUIMIOLITOTROFOS: Organismos que captan energía disponible en compuestos inorgánicos
FUENTE DE CARBONO	HETERÓTROFOS: La fuente de carbono proviene de varios compuestos orgánicos.	
	AUTÓTROFOS (productores primarios): Si la fuente de carbono es el CO ₂ .	

18.5 OXIDACIÓN:

El término "reacción de oxidación" se refiere a una semirreacción que implica la pérdida de electrones por parte de una especie química. En tiempos antiguos, los químicos utilizaban el término "oxidación" para describir la combinación de elementos con oxígeno. No obstante, en la actualidad, su significado se ha ampliado considerablemente y abarca también reacciones en las que no está involucrado el oxígeno como tal (Chang, 2003).

18.5.1 OXIDACIÓN BIOLÓGICA

El proceso de oxidación-reducción es un mecanismo fundamental que ocurre en las células vivas y que implica la transferencia de hidrógenos o electrones entre moléculas para la producción de energía. En los sistemas biológicos, tanto las reacciones que capturan energía, como la fotosíntesis, como las que liberan energía, como la respiración y la glucólisis, son reacciones de oxidación-reducción. Por ejemplo, la oxidación de la glucosa libera 686 kilocalorías de energía libre.

Las células poseen componentes que pueden transformar la energía de flujo electrónico en trabajo útil. El oxígeno es un elemento altamente reactivo y puede reaccionar con muchos

componentes celulares. La presencia de oxígeno permite una oxidación más completa de las moléculas ingeridas. Por ejemplo, en presencia de oxígeno, la glucosa puede ser completamente degradada a CO_2 y agua, mientras que en su ausencia solo puede ser degradada a ácido láctico o etanol, proceso conocido como glucólisis anaeróbico (Chang, 2003).

18.6 DIGESTIÓN ANAERÓBICA

El tratamiento anaeróbico es un proceso en el cual la materia orgánica se descompone mediante la acción de un complejo grupo de microorganismos que realizan la fermentación anaerobia. Como resultado de esta descomposición, se produce un biogás que está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además de pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S) e hidrógeno (H_2). El esquema básico de este proceso es el siguiente:

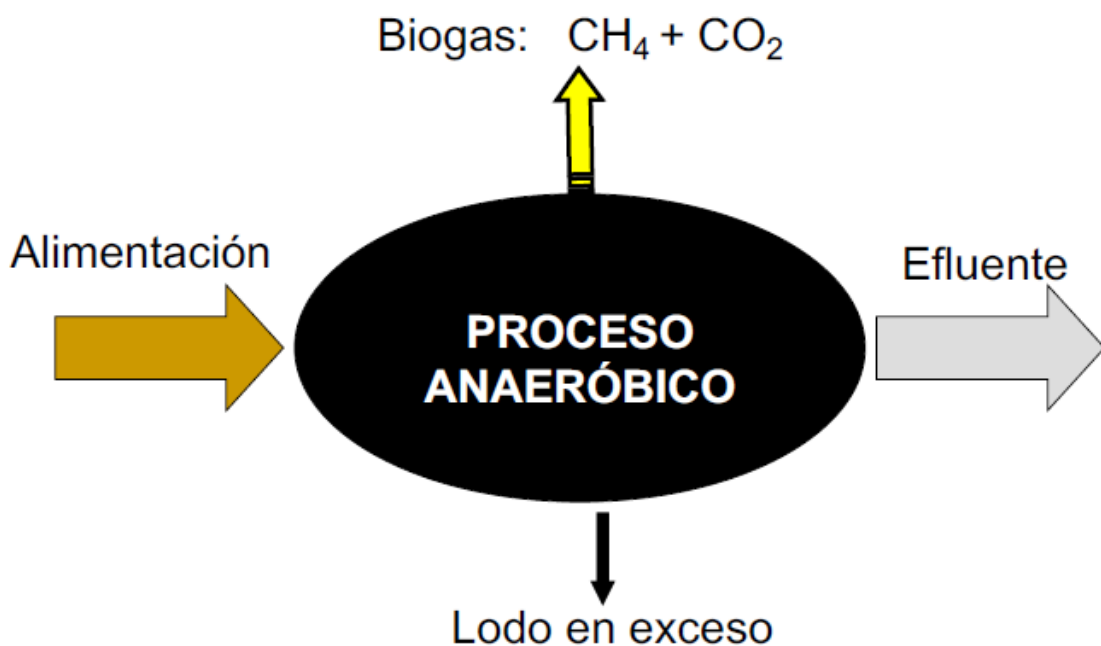


FIGURA 56: NOTA: PROCESO ANAERÓBICO. EXTRAÍDO DE AIDIS

Las sales y la materia orgánica e inorgánica refractaria se convierten en subproductos y permanecen junto con la nueva masa de células como residuo de la fermentación, conocido como

digerido. Sin embargo, a diferencia de los sistemas aeróbicos de lodos activados, en el tratamiento anaeróbico, la materia orgánica se transforma mayoritariamente en metano como producto final.

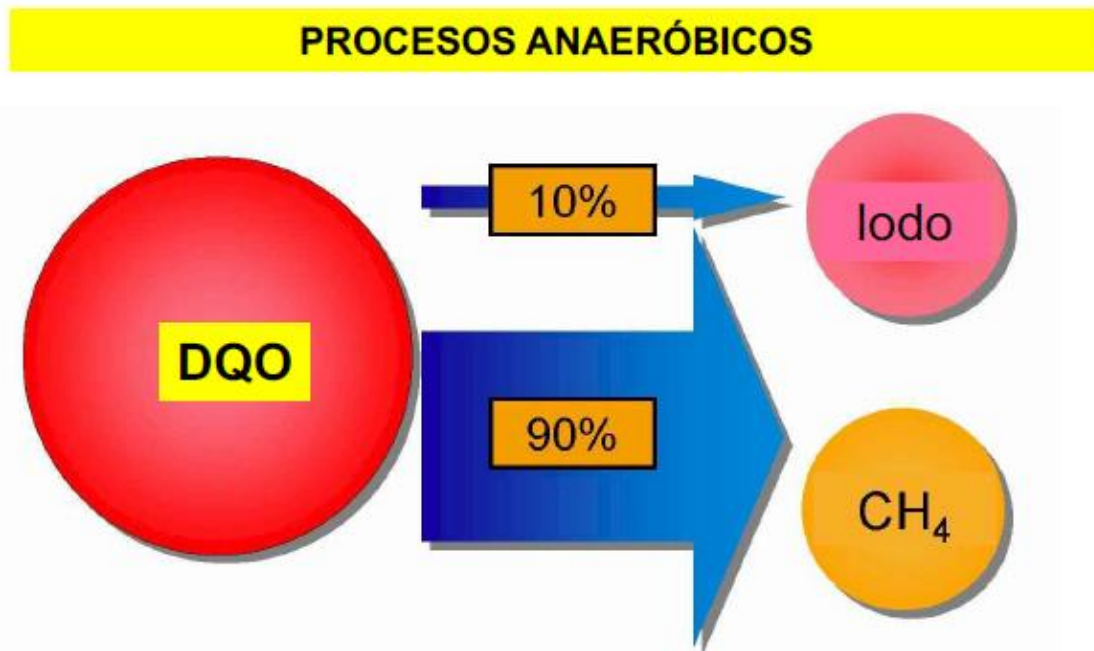


FIGURA 58: NOTA: DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA. EXTRAÍDO DE AIDIS

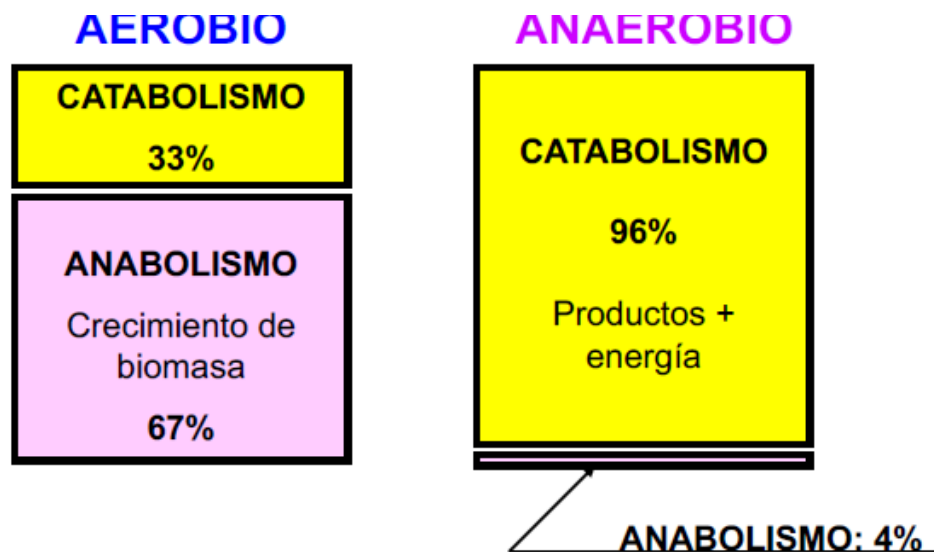


FIGURA 57: NOTA: COMPARACIÓN DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA. EXTRAÍDO DE AIDIS

La degradación anaeróbica de la materia orgánica es el resultado de interacciones múltiples y recíprocas entre distintos consorcios microbianos con diferentes roles. Estos grupos de microorganismos actúan tanto secuencial como paralelamente, ya que los productos generados por un grupo se convierten en sustrato para el siguiente. Las distintas etapas de degradación se describen a continuación.

TABLA 61: ETAPAS DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA POR ACCIÓN ANAERÓBICA. ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE VARIOS AUTORES

ETAPA HIDRÓLISIS	El primer paso implica que las bacterias toman la materia orgánica virgen, con sus largas cadenas estructuradas carbonáceas (proteínas, lípidos e hidratos de carbono), y las despolimerizan e hidrolizan en cadenas más cortas y simples (ácidos orgánicos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes), liberando H_2 y CO_2. Este proceso es llevado a cabo principalmente por un grupo complejo de microorganismos, la mayoría de los cuales son anaerobios facultativos. La primera etapa del proceso es crucial, ya que los compuestos orgánicos complejos, como la celulosa, proteínas y lípidos, no pueden ser absorbidos y utilizados directamente por los microorganismos. Además, la tasa de descomposición es lenta y depende en gran medida de las características físicas y químicas del sustrato. Debido a esto, la hidrólisis frecuentemente se convierte en la etapa limitante del proceso.	
FERMENTACIÓN ÁCIDA	ACIDOGÉNESIS	Los productos resultantes de la etapa anterior son sometidos a biooxidación, donde los ácidos orgánicos de cadena corta, como el acético ($CH_3 - COOH$), propiónico (CH_3CH_2COOH) y butírico ($CH_3-CH_2-CH_2-COOH$), son generados gracias a la acción de una población heterogénea de bacterias facultativas y anaerobias. En esta fase, no se produce una reducción significativa de la DQO (Demanda Química de Oxígeno), ya que principalmente lo que ocurre es la conversión de moléculas orgánicas complejas en ácidos orgánicos de cadena corta, los cuales también generan una demanda de oxígeno. Las bacterias acidogénicas son rápidamente reproductoras y poco sensibles a los cambios de temperatura y acidez. Estas características les

		permiten desempeñar un papel importante en el proceso de biooxidación.
	ACETOGENESIS	Las bacterias acetogénicas degradan los ácidos orgánicos al transformarlos en ácido acético (CH_3COOH) y liberar H_2 y CO_2. Esta reacción es demandante de calor y ocurre en una relación simbiótica con las bacterias metanogénicas. El acetato puede producirse no solo a través de la fermentación de compuestos orgánicos solubles, sino también mediante la fermentación de hidrógeno y CO_2. Los microorganismos homoacetogénicos reducen continuamente H_2 y CO_2 a ácido acético, mientras que los heteroacetogénicos oxidan ácidos grasos, como el propiónico y el butírico, para producir ácido acético, H_2 y CO_2.
FERMENTACIÓN METÁNICA		El último paso del proceso es llevado a cabo por los microorganismos metanogénicos anaerobios estrictos, los cuales se reproducen lentamente. En esta etapa, las moléculas ácidas se descomponen repetidamente, dando lugar al ácido $\text{CH}_3\text{COOH} \xrightarrow[\text{metanogénicas}]{\text{Bacterias}} \text{CO}_2 + \text{CH}_4$ acético, que posteriormente se convierte en CO_2 y CH_4 (metano). La producción de metano también puede ocurrir mediante la vía del H_2 y CO_2, los cuales son transformados en metano y agua por estos microorganismos metanogénicos. Los microorganismos mayormente involucrados en la producción de metano son <i>Metanobacterium</i>, <i>Methanobacillus</i>, <i>Methanosarcina</i> y <i>Methanococcus</i>.

ETAPAS

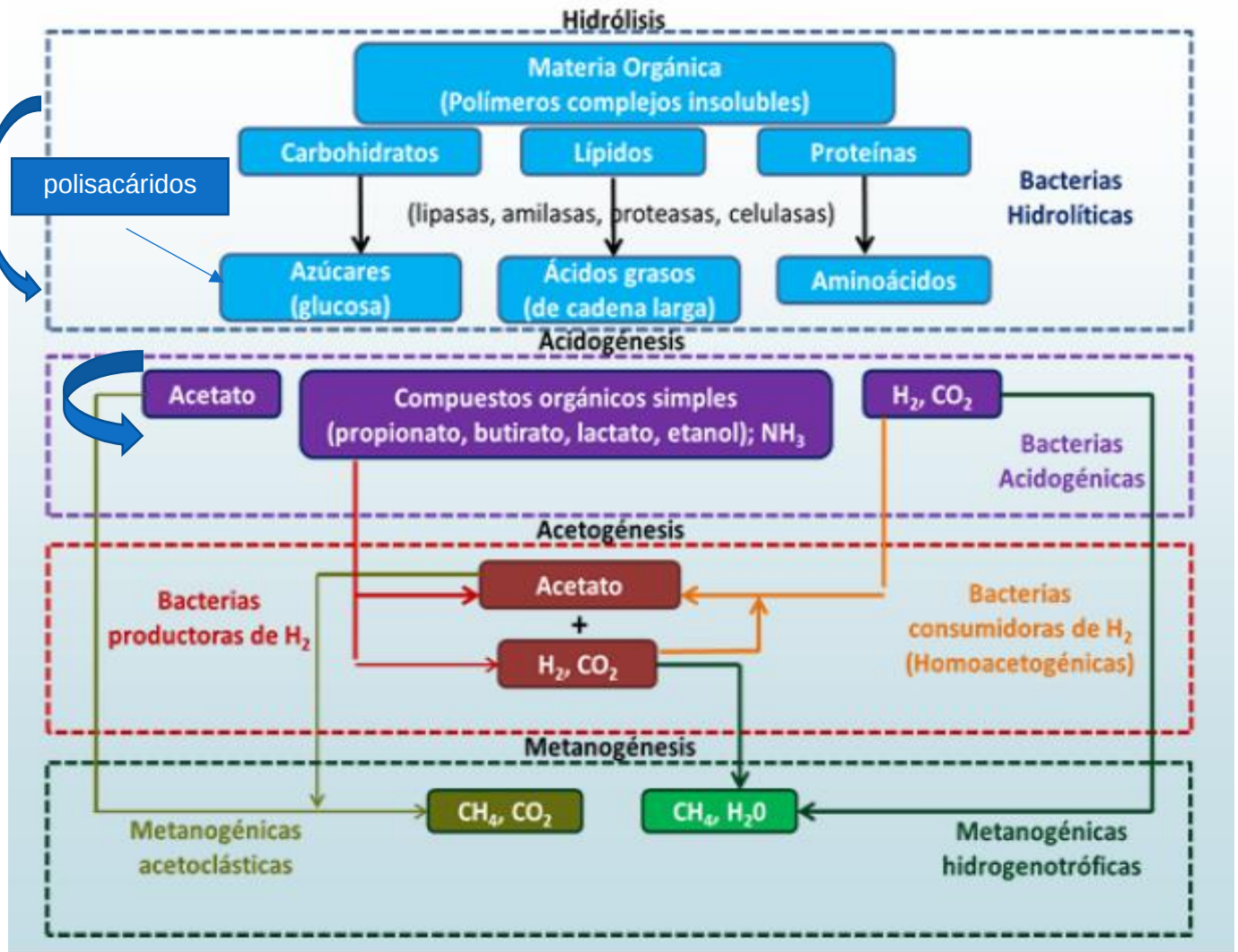


FIGURA 59: NOTA: DIAGRAMA DE FLUJO ANAERÓBICO. EXTRAÍDO DE BRES

18.7 FITOREMEDIACIÓN

El término "fito" significa planta y "remediación" significa restaurar o limpiar. En conjunto, este término abarca una diversidad de tecnologías verdes basadas en plantas, ya sean naturales o genéticamente modificadas, que se utilizan para remover, transferir, estabilizar o degradar contaminantes presentes en el suelo, sedimento o agua (Chandra, *et al.*, 2018).

Las plantas proporcionan un sistema de raíces, tallos o hojas que actúa como hábitat para una gran cantidad de microorganismos capaces de descomponer contaminantes. Además, mediante

procesos biológicos, químicos y físicos, como la adsorción, el transporte, la translocación, la acumulación, la transformación y la mineralización, las plantas pueden llevar a cabo la remediación de contaminantes (Chandra, *et al.*, 2018).

Existen diversos tipos de fitorremediación, entre los cuales se destacan:

- ❖ Fitoextracción: la planta absorbe el contaminante y lo acumula dentro de la misma;
- ❖ Fitofiltración: las plantas usan la raíz para absorber contaminantes de una matriz acuosa;
- ❖ Fitoestabilización: las plantas inmovilizan contaminantes en la matriz del suelo, reduciendo su biodisponibilidad;
- ❖ Fitovolatilización: contaminantes que fueron absorbidos y luego volatilizados en la atmosfera;
- ❖ Fitodegradación: el uso de la asociación planta-microorganismos para degradar contaminantes orgánicos;
- ❖ Rizodegradación: mejora de la degradación de contaminantes orgánicos en la zona de la raíz de la planta por microorganismos.

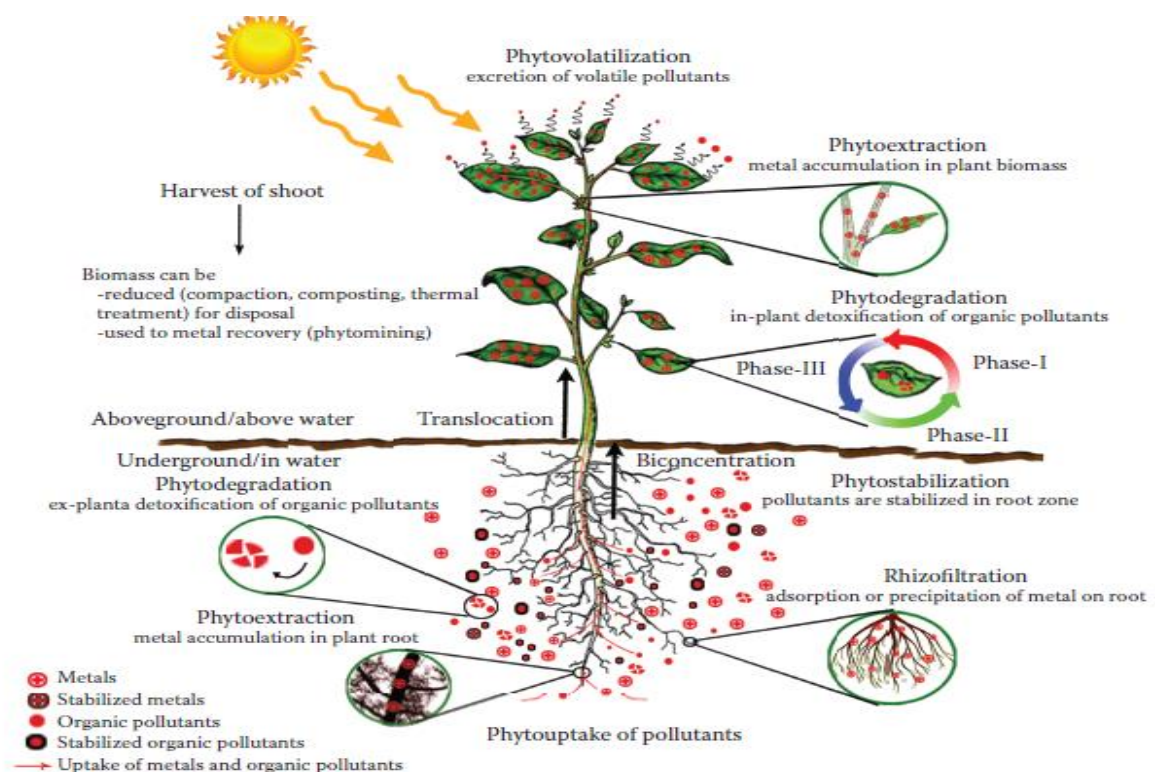


FIGURE 1.1
Schematic representation of various phytoremediation strategies.

FIGURA 60: NOTA: TIPOS DE FITOREMEDIACIÓN DE LAS PLANTAS. EXTRAÍDO DE BIBLOTECA DIGITAL UBA

18.8 SUSTRATO

Un sustrato es cualquier material sólido diferente al suelo, ya sea natural, sintético o residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, ya sea en forma pura o en mezcla, proporciona el anclaje necesario para el sistema radicular de la planta, desempeñando así un papel de soporte para su crecimiento. El sustrato puede o no intervenir en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta (Ibáñez, 2010) (Asociación de Academias de la Lengua Española (ASALE), 2022).

18.9 MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

18.9.1 USO DE EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL.

Es de vital importancia que los operadores conozcan y apliquen rigurosamente las siguientes medidas de seguridad antes de involucrarse en la operación y mantenimiento del sistema. Estas precauciones son esenciales para salvaguardar su salud y prevenir posibles riesgos, los elementos necesarios para este trabajo se ilustran en la siguiente tabla:

TABLA 62: ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL.

ELEMENTO	RAZÓN
GUANTES DE LATEX	Es obligatorio el uso de un overol, guantes y botas para evitar el contacto directo con las aguas residuales. Esto se debe a que existe un riesgo significativo de infecciones, así como la posibilidad de que los contaminantes se transporten hasta el hogar del operador, poniendo en peligro la salud de los miembros de su familia.
BOTAS DE HULE	
ROPA DE TRABAJO	

18.9.2 MANTENIMIENTO DEL HUMEDAL

Como medida inicial para el cuidado del humedal se recomienda que se evite el ingreso de animales o niños al interior del humedal, para evitar que las plantas sean estropeadas o se rompan.

La operación y el mantenimiento se pueden dividir en tres categorías:

- Puesta en marcha,
- Operaciones rutinarias
- Operaciones a largo plazo.

La diferenciación es producto de que la puesta en marcha muestra mucha variabilidad en el humedal. Mientras que las operaciones rutinarias pueden verse afectadas por los detalles de diseño y operación a largo plazo.

18.9.3 PUESTA EN MARCHA

El período de puesta en marcha de los humedales es esencial para establecer la vegetación asociada a los procesos de tratamiento y promover el desarrollo de microorganismos responsables de reducir los compuestos en el humedal. Es importante destacar que el período de puesta en marcha para los humedales de flujo subsuperficial es menos crítico en comparación con otros tipos, ya que su rendimiento depende en menor medida de la vegetación en comparación con el tratamiento proporcionado por el sustrato.

En humedales de flujo subsuperficial, el nivel de agua es el aspecto más crítico para la supervivencia de las plantas durante el primer año después de la siembra. Un error común es asumir que, debido a que la planta es una planta de humedal, puede tolerar agua profunda. Es por esto que, durante el proceso de puesta en marcha, la principal responsabilidad del operador es ajustar el nivel del agua en el humedal. Por lo general, se requiere que los humedales se llenen de agua hasta que el sustrato esté cubierto al final de la plantación. A medida que las plantas comienzan a enraizar, se puede reducir gradualmente el nivel del agua al nivel de funcionamiento previamente diseñado. Además, es fundamental eliminar las malas hierbas que puedan competir con la vegetación plantada en el humedal.

Puede ser necesario una protección para evitar que los animales dañen las plantas recién establecidas como una depredación significativa en brotes jóvenes y plántulas y al arrancar raíces, rizomas y tubérculos.

En resumen, gran parte del esfuerzo involucrado en este proceso se basa en la observación visual de las condiciones y la corrección de problemas que puedan surgir. Los aspectos clave de interés incluyen:

- ❖ Mantener el nivel de agua para un crecimiento óptimo de las macrófitas.
- ❖ Asegurar la uniformidad en la distribución y recolección del flujo.
- ❖ Preservar la integridad de los bordes.
- ❖ Promover la salud y el crecimiento de las macrófitas.
- ❖ Eliminar cualquier vegetación no deseada.

18.9.4 ACTIVIDADES DE RUTINA

Las tareas de rutina necesarias para mantener en buen estado y asegurar el funcionamiento eficiente de los humedales son actividades que, en su mayoría, no requieren una capacitación extensa, lo que permite que estos sistemas sean operados de manera sencilla.

El objetivo primordial de la operación de los humedales artificiales es asegurar que el sistema funcione de acuerdo con el diseño original para obtener el mejor rendimiento posible. El propósito del mantenimiento, por su parte, radica en mantener las instalaciones en óptimas condiciones de manera continua, ya sea mediante reparaciones o la sustitución de partes o equipos dañados debido al desgaste.

Dado que los humedales construidos son sistemas de tipo "natural", la operación rutinaria tiende a ser en su mayoría pasiva y requiere una intervención mínima por parte del operador. El operador debe ser un observador atento, estar preparado para tomar medidas adecuadas cuando surjan problemas y llevar a cabo el monitoreo operativo necesario según sea requerido.

Las actividades que se realizan de manera rutinaria en el caso de los humedales artificiales incluyen:

TABLA 63: RESUMEN DE ACTIVIDADES DE RUTINA. ELABORACIÓN PROPIA

TAREA	DESCRIPCIÓN
LIMPIEZA ESTRUCTURA	Extracción de basuras acumuladas en las estructuras de entrada y distribución de caudal (cajas de registro, tubería y vertedores). Los colectores de entrada y salida deben inspeccionarse rutinariamente y ajustarse regularmente, además de limpiarse de residuos que puedan obstruir las entradas y salidas. También puede ser necesario realizar una limpieza adicional con un chorro de agua a alta presión o mediante medios mecánicos. Los sólidos suspendidos en el influente se acumularán cerca de las entradas al humedal
AJUSTE DE NIVEL DE AGUA	El nivel de agua y el control del flujo son generalmente las únicas variables operativas que tienen un impacto significativo en el rendimiento de un humedal construido bien diseñado. Usualmente diez centímetros por debajo de la superficie en los humedales de flujo subsuperficial.
CONTROL VEGETACIÓN	Eliminación de malezas y basuras (hojarasca) dentro del lecho del humedal y los bores del humedal.
CONTROL DE OLORES	Los olores rara vez son un problema molesto en humedales de flujo subsuperficial. Los olores ocurren si el agua inunda la superficie del lecho, por lo tanto, la regulación del sistema de nivel de agua o el control de obstrucciones será fundamental.
CONTROL DE FUNCIONAMIENTO	Realizar muestreo para registrar y controlar la forma en que afecta a su funcionamiento. La madurez de los sistemas se refleja en una capacidad depuradora más o menos constante, su disminución indica el inicio de algún problema y debe ser evaluado

TABLA 64: CHECK LIST DE TAREAS. ELABORACIÓN PROPIA

CHECK LIST DE TAREAS	FECHA:
CONTROL DE DISPOSITIVOS DE ENTRADA Y SALIDA	☐
AJUSTE DEL NIVEL DE AGUA	☐
ELIMINACIÓN DE MALEZA	☐
PODA DE LA VEGETACIÓN	☐
CONTROL DE VEGATACIÓN (Verificación de salud de las plantas y control de claros dentro del HFSSH)	☐
MUESTREO	☐

La evaluación periódica del rendimiento del humedal es fundamental para asegurar su efectividad. Se deben tomar muestras y realizar análisis con el fin de determinar las eficiencias de tratamiento.

TABLA 65: DETERMINACIONES NECESARIAS PARA REALIZAR EL CONTROL DE FUNCIONAMIENTO EN EL LABORATORIO

PARÁMETROS A DETERMINAR EN UN LABORATORIO (ENTRADA Y SALIDA)

DBO ₅
DQO
Nitrógeno total
Fósforo total
Coliformes fecales

18.9.5 OPERACIONES A LARGO PLAZO

El propósito de mantener un crecimiento activo de la vegetación y, por ende, la remoción de nutrientes, la vegetación debe ser cosechada. En general se debe eliminar con la poda entre un 10% al 15%, principalmente aquellas partes que luzcan un color amarillento, ya que representa la vegetación de mayor edad. Se recomienda que se realicen estas tareas con una frecuencia de dos a tres veces anualmente, esto permite mantener el vigor (desarrollo) de las especies vegetales y por lo tanto una mejor remoción de los nutrientes.

Con la cosecha o poda de las especies vegetales y su disposición fuera del humedal, se evitaría que las hojas muertas se degraden y reincorporen los nutrientes dentro. La vegetación obtenida en la poda puede ser compostada como fertilizante.

En caso de ser necesario, realizar resiembra de especies vegetales, manteniendo la densidad establecida en la sección de diseño, evitando áreas sin vegetación o vegetación muerta.

Por otro lado, el sustrato debe ser remplazado cada cierto tiempo, debido a que los sitios donde son retenidos los nutrientes son limitados y terminan siendo ocupados a lo largo de su uso. Se recomienda que el sustrato del humedal sea remplazado cada aproximadamente 10 años. El correcto destino final de este material puede ser:

- Llevados al relleno sanitario, por ejemplo, para ser usado como material para realizar tareas de tapadas diarias.
- Material de construcción para diversos usos como adecuación de terreno o materia prima para construcción en sí misma. Un ejemplo puede ser la utilización de este material para caminos dentro de la ciudad.
- Material para realización de trabajos de paisajismo
- Material con nutrientes para realizar proyectos de remediación, como por ejemplo landfarming.

- Material para proyectos de restauración de sitios degradados. Como, por ejemplo, restauración de bordes de camino o taludes.



FIGURA 61: NOTA: REUTILIZACIÓN DE LOS NUTRIENTES CAPTURADOS EN EL HUMEDAL EN FORMA DE COMPOST PARA GENERACIÓN DE PLANTAS ORNAMENTALES. EXTRAÍDO ALARCÓN HERRERA, ET AL., 2018



FIGURA 62: NOTA: LANDFARMING EN TIERRA DEL FUEGO. EXTRAÍDO DE CURSO DE REMEDIACIÓN AMBIENTAL EN LA UTN.

18.10 CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

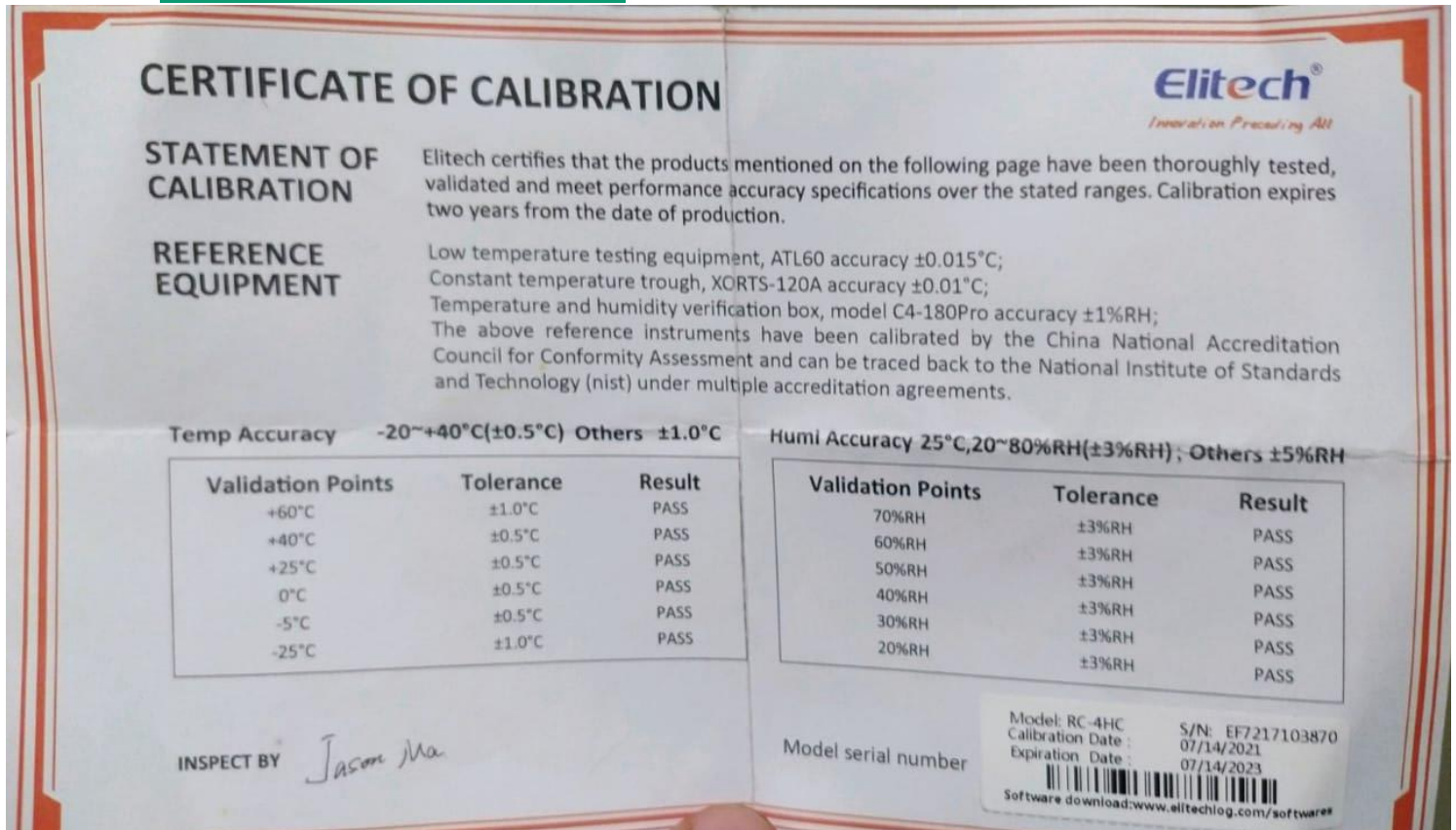


FIGURA 63: NOTA: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN. EXTRAÍDO DE ELITECH.

18.11 TABLA DEL PRIMER REGISTRO DE TEMPERATURAS.

TABLA 66: PRIMER REGISTRO DE TEMPERATURAS CON DATALOGGER. ELABORACIÓN PROPIA

No.	FECHA Y HORA DEL REGISTRO	TEMPERATURA [°C]	HUMEDAD [%]
13	2022-04-30 17:30:23	20,1	66,3
73	2022-04-30 18:00:23	19,9	74,1
133	2022-04-30 18:30:23	19,9	77,1
193	2022-04-30 19:00:23	19,8	78,6
253	2022-04-30 19:30:23	19,8	78,9
313	2022-04-30 20:00:23	19,6	79,3
373	2022-04-30 20:30:23	19,5	79,7
433	2022-04-30 21:00:23	19,4	80
493	2022-04-30 21:30:23	19,3	80,2
553	2022-04-30 22:00:23	19,3	80,5
613	2022-04-30 22:30:23	19,2	81
673	2022-04-30 23:00:23	19,2	81,3

733	2022-04-30 23:30:23	19,1	81,4
793	2022-05-01 00:00:23	19,1	81,1
853	2022-05-01 00:30:23	19	81,3
913	2022-05-01 01:00:23	18,9	81,4
973	2022-05-01 01:30:23	18,9	81,1
1033	2022-05-01 02:00:23	18,8	81,4
1093	2022-05-01 02:30:23	18,7	81,8
1153	2022-05-01 03:00:23	18,7	82,2
1213	2022-05-01 03:30:23	18,6	82,3
1273	2022-05-01 04:00:23	18,6	82
1333	2022-05-01 04:30:23	18,6	81,6
1393	2022-05-01 05:00:23	18,5	81,8
1453	2022-05-01 05:30:23	18,5	81,7
1513	2022-05-01 06:00:23	18,4	82
1573	2022-05-01 06:30:23	18,4	82,1
1633	2022-05-01 07:00:23	18,3	82,9
1693	2022-05-01 07:30:23	18,2	83,1
1753	2022-05-01 08:00:23	18,1	83,4
1813	2022-05-01 08:30:23	18,1	83,6
1873	2022-05-01 09:00:23	18,1	83,8
1933	2022-05-01 09:30:23	18,1	84,2
1993	2022-05-01 10:00:23	18	84,6
2053	2022-05-01 10:30:23	18	84,8
2113	2022-05-01 11:00:23	17,9	85,1
2173	2022-05-01 11:30:23	17,9	85,5
2233	2022-05-01 12:00:23	17,9	86
2293	2022-05-01 12:30:23	17,8	86,2
2353	2022-05-01 13:00:23	17,8	86,6
2413	2022-05-01 13:30:23	17,7	87,3
2473	2022-05-01 14:00:23	17,7	88,1
2533	2022-05-01 14:30:23	17,6	88,7
2593	2022-05-01 15:00:23	17,6	89
2653	2022-05-01 15:30:23	17,5	89,2
2713	2022-05-01 16:00:23	17,5	89,3
2773	2022-05-01 16:30:23	17,5	89,4
2833	2022-05-01 17:00:23	17,4	89,4
2893	2022-05-01 17:30:23	17,4	89,6
2953	2022-05-01 18:00:23	17,4	89,7
3013	2022-05-01 18:30:23	17,4	89,7
3073	2022-05-01 19:00:23	17,3	89,1
3133	2022-05-01 19:30:23	17,3	88,3
3193	2022-05-01 20:00:23	20,9	88,4
3253	2022-05-01 20:30:23	25,9	87,8
3313	2022-05-01 21:00:23	24,9	87
3373	2022-05-01 21:30:23	24,5	86,8
3433	2022-05-01 22:00:23	22,9	86,8
3493	2022-05-01 22:30:23	22,9	86,6
3553	2022-05-01 23:00:23	22,7	86,2

3613	2022-05-01 23:30:23	22,4	85,6
3673	2022-05-02 00:00:23	22,2	85,2
3733	2022-05-02 00:30:23	22	84,6
3793	2022-05-02 01:00:23	21,7	85,2
3853	2022-05-02 01:30:23	21,5	85,1
3913	2022-05-02 02:00:23	21,3	84,8
3973	2022-05-02 02:30:23	21,1	84,3
4033	2022-05-02 03:00:23	20,9	84
4093	2022-05-02 03:30:23	20,8	83,2
4153	2022-05-02 04:00:23	20,6	83,7
4213	2022-05-02 04:30:23	20,4	83,1
4273	2022-05-02 05:00:23	20,3	83
4333	2022-05-02 05:30:23	20,1	83,7
4393	2022-05-02 06:00:23	20	83,2
4453	2022-05-02 06:30:23	19,8	82,8
4513	2022-05-02 07:00:23	19,5	83
4573	2022-05-02 07:30:23	19,4	82,8
4633	2022-05-02 08:00:23	19,3	82,9
4693	2022-05-02 08:30:23	19,2	82,7
4753	2022-05-02 09:00:23	19,2	82,4
4813	2022-05-02 09:30:23	19,1	83
4873	2022-05-02 10:00:23	19	83,8
4933	2022-05-02 10:30:23	18,9	84,4
4993	2022-05-02 11:00:23	18,8	85,6
5053	2022-05-02 11:30:23	18,7	86,7
5113	2022-05-02 12:00:23	18,6	87,5
5173	2022-05-02 12:30:23	18,6	88
5233	2022-05-02 13:00:23	18,5	88,6
5293	2022-05-02 13:30:23	18,5	89,4
5353	2022-05-02 14:00:23	18,4	89,9
5413	2022-05-02 14:30:23	18,3	90,3
5473	2022-05-02 15:00:23	18,3	90,7
5533	2022-05-02 15:30:23	18,2	91
5593	2022-05-02 16:00:23	18,2	91,3
5653	2022-05-02 16:30:23	18,2	91,3
5713	2022-05-02 17:00:23	18	91,5
5773	2022-05-02 17:30:23	18	91,7
5833	2022-05-02 18:00:23	18	91,5
5893	2022-05-02 18:30:23	18	91,4
5953	2022-05-02 19:00:23	18,4	91,4
6013	2022-05-02 19:30:23	18,4	90,5
6073	2022-05-02 20:00:23	18,2	89,7
6133	2022-05-02 20:30:23	18,1	89,4
6193	2022-05-02 21:00:23	18	89,3
6253	2022-05-02 21:30:23	18	88,9
6313	2022-05-02 22:00:23	18	88,4
6373	2022-05-02 22:30:23	17,9	88,5
6433	2022-05-02 23:00:23	17,9	88,5

6493	2022-05-02 23:30:23	17,8	88,3
6553	2022-05-03 00:00:23	17,8	88,6
6613	2022-05-03 00:30:23	17,7	88,5
6673	2022-05-03 01:00:23	17,7	88,4
6733	2022-05-03 01:30:23	17,7	88,4
6793	2022-05-03 02:00:23	17,6	88,8
6853	2022-05-03 02:30:23	17,6	89
6913	2022-05-03 03:00:23	17,5	89,2
6973	2022-05-03 03:30:23	17,5	89,2
7033	2022-05-03 04:00:23	17,4	89,2
7093	2022-05-03 04:30:23	17,4	88,8
7153	2022-05-03 05:00:23	17,4	88,5
7213	2022-05-03 05:30:23	17,4	88,9
7273	2022-05-03 06:00:23	17,4	89,3
7333	2022-05-03 06:30:23	17,3	89,8
7393	2022-05-03 07:00:23	17,3	90
7453	2022-05-03 07:30:23	17,2	90,2
7513	2022-05-03 08:00:23	17,2	90,4
7573	2022-05-03 08:30:23	17,2	90,7
7633	2022-05-03 09:00:23	17,1	90,8
7693	2022-05-03 09:30:23	17,1	90,8
7753	2022-05-03 10:00:23	17,2	91
7813	2022-05-03 10:30:23	17,3	91,9
7873	2022-05-03 11:00:23	17,4	92,6
7933	2022-05-03 11:30:23	17,9	93,1
7993	2022-05-03 12:00:23	18,9	93,4
8053	2022-05-03 12:30:23	18,6	93,8
8113	2022-05-03 13:00:23	18,5	94,2
8173	2022-05-03 13:30:23	18,3	94,7
8233	2022-05-03 14:00:23	18,3	94,8
8293	2022-05-03 14:30:23	18,2	94,7
8353	2022-05-03 15:00:23	18	94,4
8413	2022-05-03 15:30:23	18	93,9
8473	2022-05-03 16:00:23	17,9	93,5
8533	2022-05-03 16:30:23	17,7	93
8593	2022-05-03 17:00:23	17,6	92,6
8653	2022-05-03 17:30:23	17,6	92,4
8713	2022-05-03 18:00:23	17,5	92,1
8773	2022-05-03 18:30:23	17,5	92
8833	2022-05-03 19:00:23	17,5	91,7
8893	2022-05-03 19:30:23	22,9	91,9
8953	2022-05-03 20:00:23	22,8	91,8
9013	2022-05-03 20:30:23	22,5	91,7
9073	2022-05-03 21:00:23	23,8	91,8
9133	2022-05-03 21:30:23	23,6	92,1
9193	2022-05-03 22:00:23	23,2	92,1
9253	2022-05-03 22:30:23	23	92
9313	2022-05-03 23:00:23	22,8	91,9

9373	2022-05-03 23:30:23	22,5	91,5
9433	2022-05-04 00:00:23	22,3	91,3
9493	2022-05-04 00:30:23	22,2	91,2
9553	2022-05-04 01:00:23	22	91
9613	2022-05-04 01:30:23	21,8	90,8
9673	2022-05-04 02:00:23	21,5	90,6
9733	2022-05-04 02:30:23	21,4	90,6
9793	2022-05-04 03:00:23	21,2	90,4
9853	2022-05-04 03:30:23	21	90,2
9913	2022-05-04 04:00:23	20,9	90,1
9973	2022-05-04 04:30:23	20,8	90
10033	2022-05-04 05:00:23	20,6	90
10093	2022-05-04 05:30:23	20,5	89,6
10153	2022-05-04 06:00:23	20,4	89,6
10213	2022-05-04 06:30:23	20,2	89,1
10273	2022-05-04 07:00:23	20,1	88,7
10333	2022-05-04 07:30:23	20	88,9
10393	2022-05-04 08:00:23	19,9	89,2
10453	2022-05-04 08:30:23	19,8	89,3
10513	2022-05-04 09:00:23	19,8	89,3
10573	2022-05-04 09:30:23	19,7	89,6
10633	2022-05-04 10:00:23	19,5	90,4
10693	2022-05-04 10:30:23	19,4	91
10753	2022-05-04 11:00:23	19,3	91,6
10813	2022-05-04 11:30:23	19,2	92
10873	2022-05-04 12:00:23	19,2	92,3
10933	2022-05-04 12:30:23	19,1	92,6
10993	2022-05-04 13:00:23	19	92,8
11053	2022-05-04 13:30:23	19	92,7
11113	2022-05-04 14:00:23	18,8	92,2
11173	2022-05-04 14:30:23	18,8	91,7
11233	2022-05-04 15:00:23	18,7	91,4
11293	2022-05-04 15:30:23	18,7	91,1
11353	2022-05-04 16:00:23	18,6	90,9
11413	2022-05-04 16:30:23	18,6	90,8
11473	2022-05-04 17:00:23	18,6	90,7
11533	2022-05-04 17:30:23	18,6	90,6
11593	2022-05-04 18:00:23	18,6	90,2
11653	2022-05-04 18:30:23	18,5	90,1
11713	2022-05-04 19:00:23	18,4	90
11773	2022-05-04 19:30:23	18,4	90
11833	2022-05-04 20:00:23	18,3	90,1
11893	2022-05-04 20:30:23	18,3	90,1
11953	2022-05-04 21:00:23	18,3	90,2
12013	2022-05-04 21:30:23	18,3	90,3
12073	2022-05-04 22:00:23	21,3	90,2
12133	2022-05-04 22:30:23	21,5	90,3
12193	2022-05-04 23:00:23	21	90,2

12253	2022-05-04 23:30:23	20,9	90,2
12313	2022-05-05 00:00:23	20,9	90
12373	2022-05-05 00:30:23	20,7	90,2
12433	2022-05-05 01:00:23	20,5	90,1
12493	2022-05-05 01:30:23	20,3	90,4
12553	2022-05-05 02:00:23	20,2	90,2
12613	2022-05-05 02:30:23	20	90,1
12673	2022-05-05 03:00:23	19,8	89,9
12733	2022-05-05 03:30:23	19,7	89,9
12793	2022-05-05 04:00:23	19,6	89,8
12853	2022-05-05 04:30:23	19,5	89,6
12913	2022-05-05 05:00:23	19,3	89,8
12973	2022-05-05 05:30:23	19,2	90,1
13033	2022-05-05 06:00:23	19,1	90
13093	2022-05-05 06:30:23	19,1	90,3
13153	2022-05-05 07:00:23	18,9	90,5
13213	2022-05-05 07:30:23	18,9	90,7
13273	2022-05-05 08:00:23	18,9	90,6
13333	2022-05-05 08:30:23	18,8	90,4
13393	2022-05-05 09:00:23	18,7	90,5
13453	2022-05-05 09:30:23	18,7	90,8
13513	2022-05-05 10:00:23	18,6	91,1
13573	2022-05-05 10:30:23	18,6	91,2
13633	2022-05-05 11:00:23	18,5	91,6
13693	2022-05-05 11:30:23	18,5	92
13753	2022-05-05 12:00:23	18,4	92,3
13813	2022-05-05 12:30:23	18,4	92,5
13873	2022-05-05 13:00:23	18,3	92,7
13933	2022-05-05 13:30:23	18,3	93
13993	2022-05-05 14:00:23	18,3	92,6
14053	2022-05-05 14:30:23	18,2	91,7
14113	2022-05-05 15:00:23	18,1	91,2
14173	2022-05-05 15:30:23	18,1	90,9
14233	2022-05-05 16:00:23	18,1	90,6
14293	2022-05-05 16:30:23	18,1	90,5
14353	2022-05-05 17:00:23	18	90,5
14413	2022-05-05 17:30:23	18,1	90,5
14473	2022-05-05 18:00:23	18	90,4
14533	2022-05-05 18:30:23	21,9	90,6
14593	2022-05-05 19:00:23	21,6	90,7
14653	2022-05-05 19:30:23	21,4	90,9
14713	2022-05-05 20:00:23	21,1	90,9
14773	2022-05-05 20:30:23	20,9	90,8
14833	2022-05-05 21:00:23	20,7	90,7
14893	2022-05-05 21:30:23	20,3	90,9
14953	2022-05-05 22:00:23	20,1	90,9
15013	2022-05-05 22:30:23	19,9	90,9
15073	2022-05-05 23:00:23	19,8	90,6

15133	2022-05-05 23:30:23	19,7	90,4
15193	2022-05-06 00:00:23	19,6	90,8
15253	2022-05-06 00:30:23	19,5	90,6
15313	2022-05-06 01:00:23	19,4	90,5
15373	2022-05-06 01:30:23	19,2	90,6
15433	2022-05-06 02:00:23	19,2	90,6
15493	2022-05-06 02:30:23	19,1	90,6
15553	2022-05-06 03:00:23	19	90,6
15613	2022-05-06 03:30:23	19	90,6
15673	2022-05-06 04:00:23	18,9	90,4
15733	2022-05-06 04:30:23	18,8	89,9
15793	2022-05-06 05:00:23	18,7	89,6
15853	2022-05-06 05:30:23	18,7	89,3
15913	2022-05-06 06:00:23	18,6	88,9
15973	2022-05-06 06:30:23	18,6	88,8

18.12 TABLA: SEGUNDO REGISTRO DE TEMPERATURAS

TABLA 67: SEGÚNDO REGISTRO DE TEMPERATURAS CON DATALOGGER. ELABORACIÓN PROPIA

No.	FECHA Y HORA DEL REGISTRO	TEMPERATURA [°C]	HUMEDAD [%]
1	2022-06-18 09:27:52	17,4	58
2	2022-06-18 10:27:52	2,4	60,9
3	2022-06-18 11:27:52	15,3	75,1
4	2022-06-18 12:27:52	15,3	79,6
5	2022-06-18 13:27:52	15,3	81,9
6	2022-06-18 14:27:52	15,3	82,5
7	2022-06-18 15:27:52	15,3	83,7
8	2022-06-18 16:27:52	15,3	84,1
9	2022-06-18 17:27:52	15,3	85
10	2022-06-18 18:27:52	15,3	85,9
11	2022-06-18 19:27:52	15,3	86
12	2022-06-18 20:27:52	15,3	86,7
13	2022-06-18 21:27:52	15,3	87,3
14	2022-06-18 22:27:52	15,3	87,6
15	2022-06-18 23:27:52	15,3	87,4
16	2022-06-19 00:27:52	15,3	87,7
17	2022-06-19 01:27:52	15,3	87,8
18	2022-06-19 02:27:52	15,3	87,9
19	2022-06-19 03:27:52	15,3	88,1
20	2022-06-19 04:27:52	15,2	88,2
21	2022-06-19 05:27:52	15,2	88,1
22	2022-06-19 06:27:52	15,2	87,9
23	2022-06-19 07:27:52	15,2	88,1
24	2022-06-19 08:27:52	15,2	87,9
25	2022-06-19 09:27:52	15,1	88

Alumno: Samudio Caballero Juan Francisco- Trabajo Final Integrador de Ingeniería Ambiental

26	2022-06-19 10:27:52	15,1	88,3
27	2022-06-19 11:27:52	15,1	88,7
28	2022-06-19 12:27:52	15,1	89,2
29	2022-06-19 13:27:52	15	90
30	2022-06-19 14:27:52	15	90
31	2022-06-19 15:27:52	15	90,3
32	2022-06-19 16:27:52	15	90,8
33	2022-06-19 17:27:52	14,9	91
34	2022-06-19 18:27:52	14,9	90,9
35	2022-06-19 19:27:52	14,9	91
36	2022-06-19 20:27:52	14,8	89,9
37	2022-06-19 21:27:52	14,8	88,5
38	2022-06-19 22:27:52	14,8	88,4
39	2022-06-19 23:27:52	14,7	88,2
40	2022-06-20 00:27:52	14,7	88,2
41	2022-06-20 01:27:52	14,7	88,6
42	2022-06-20 02:27:52	14,7	88,5
43	2022-06-20 03:27:52	14,7	88,4
44	2022-06-20 04:27:52	14,7	88,1
45	2022-06-20 05:27:52	14,7	88,6
46	2022-06-20 06:27:52	14,7	88
47	2022-06-20 07:27:52	14,7	88
48	2022-06-20 08:27:52	14,7	88,1
49	2022-06-20 09:27:52	14,7	87,9
50	2022-06-20 10:27:52	14,7	88,4
51	2022-06-20 11:27:52	14,7	88,7
52	2022-06-20 12:27:52	14,7	88,4
53	2022-06-20 13:27:52	14,7	89,2
54	2022-06-20 14:27:52	14,7	89,6
55	2022-06-20 15:27:52	14,7	90,2
56	2022-06-20 16:27:52	14,8	90,1
57	2022-06-20 17:27:52	14,8	90,7
58	2022-06-20 18:27:52	14,8	89,3
59	2022-06-20 19:27:52	14,8	88,4
60	2022-06-20 20:27:52	14,8	87,5
61	2022-06-20 21:27:52	14,8	87
62	2022-06-20 22:27:52	14,8	86,4
63	2022-06-20 23:27:52	14,8	86,8
64	2022-06-21 00:27:52	14,8	86,3
65	2022-06-21 01:27:52	14,8	86,4
66	2022-06-21 02:27:52	14,8	86,1
67	2022-06-21 03:27:52	14,8	86,4
68	2022-06-21 04:27:52	14,8	86,8
69	2022-06-21 05:27:52	14,7	86,9
70	2022-06-21 06:27:52	14,7	87,5
71	2022-06-21 07:27:52	14,7	87,1
72	2022-06-21 08:27:52	14,7	87,6
73	2022-06-21 09:27:52	14,7	87,9

Alumno: Samudio Caballero Juan Francisco- Trabajo Final Integrador de Ingeniería Ambiental

74	2022-06-21 10:27:52	14,7	88,3
75	2022-06-21 11:27:52	14,7	88,7
76	2022-06-21 12:27:52	14,7	88,9
77	2022-06-21 13:27:52	14,7	89,9
78	2022-06-21 14:27:52	14,6	90,1
79	2022-06-21 15:27:52	14,6	90,3
80	2022-06-21 16:27:52	14,6	90,1
81	2022-06-21 17:27:52	14,5	90,3
82	2022-06-21 18:27:52	14,5	89,9
83	2022-06-21 19:27:52	14,5	89,6
84	2022-06-21 20:27:52	14,4	89,6
85	2022-06-21 21:27:52	14,4	89,3
86	2022-06-21 22:27:52	14,4	89,3
87	2022-06-21 23:27:52	14,3	89,2
88	2022-06-22 00:27:52	14,3	89
89	2022-06-22 01:27:52	14,3	89,3
90	2022-06-22 02:27:52	14,3	89,5
91	2022-06-22 03:27:52	14,2	89,3
92	2022-06-22 04:27:52	14,2	89,5
93	2022-06-22 05:27:52	14,2	89,7
94	2022-06-22 06:27:52	14,1	90,1
95	2022-06-22 07:27:52	14,1	89,1
96	2022-06-22 08:27:52	14,1	89,4
97	2022-06-22 09:27:52	14	89,9
98	2022-06-22 10:27:52	14	90,3
99	2022-06-22 11:27:52	14	90,7
100	2022-06-22 12:27:52	14	91,1
101	2022-06-22 13:27:52	14	91,7
102	2022-06-22 14:27:52	13,9	92,3
103	2022-06-22 15:27:52	13,9	92,5
104	2022-06-22 16:27:52	13,9	92,3
105	2022-06-22 17:27:52	13,9	92,3
106	2022-06-22 18:27:52	13,8	91,4
107	2022-06-22 19:27:52	13,8	90,3
108	2022-06-22 20:27:52	13,8	90,1
109	2022-06-22 21:27:52	13,7	90,4
110	2022-06-22 22:27:52	13,7	89,8
111	2022-06-22 23:27:52	13,7	89,6
112	2022-06-23 00:27:52	13,7	90,1
113	2022-06-23 01:27:52	13,7	90,5
114	2022-06-23 02:27:52	13,6	90,1
115	2022-06-23 03:27:52	13,6	89,4
116	2022-06-23 04:27:52	13,6	89,3
117	2022-06-23 05:27:52	13,6	89,4
118	2022-06-23 06:27:52	13,6	90,3
119	2022-06-23 07:27:52	13,6	89,8
120	2022-06-23 08:27:52	13,6	90,1
121	2022-06-23 09:27:52	13,6	90,3

122	2022-06-23 10:27:52	13,6	90,4
123	2022-06-23 11:27:52	13,7	90,8
124	2022-06-23 12:27:52	13,7	91,3
125	2022-06-23 13:27:52	13,7	91,5
126	2022-06-23 14:27:52	13,7	91,9
127	2022-06-23 15:27:52	13,7	92,4
128	2022-06-23 16:27:52	13,7	92,4
129	2022-06-23 17:27:52	13,7	92,4
130	2022-06-23 18:27:52	13,7	92,4
131	2022-06-23 19:27:52	13,7	91,9
132	2022-06-23 20:27:52	13,7	91
133	2022-06-23 21:27:52	13,7	90
134	2022-06-23 22:27:52	13,7	90
135	2022-06-23 23:27:52	13,7	90,3
136	2022-06-24 00:27:52	13,7	90,8
137	2022-06-24 01:27:52	13,7	90,7
138	2022-06-24 02:27:52	13,7	90,9
139	2022-06-24 03:27:52	13,7	91,2
140	2022-06-24 04:27:52	13,7	91,5
141	2022-06-24 05:27:52	13,7	91,5
142	2022-06-24 06:27:52	13,7	91,8
143	2022-06-24 07:27:52	13,7	90,3
144	2022-06-24 08:27:52	13,7	90,6
145	2022-06-24 09:27:52	13,6	90,7
146	2022-06-24 10:27:52	13,6	90,6
147	2022-06-24 11:27:52	13,6	90,9
148	2022-06-24 12:27:52	13,6	91,8
149	2022-06-24 13:27:52	13,6	92,6
150	2022-06-24 14:27:52	13,6	93,6
151	2022-06-24 15:27:52	13,6	93,4
152	2022-06-24 16:27:52	13,5	93,6
153	2022-06-24 17:27:52	13,5	92,9
154	2022-06-24 18:27:52	13,5	92,6
155	2022-06-24 19:27:52	13,5	92,6
156	2022-06-24 20:27:52	13,5	92
157	2022-06-24 21:27:52	13,4	91,5
158	2022-06-24 22:27:52	13,4	91,5
159	2022-06-24 23:27:52	13,4	90,7
160	2022-06-25 00:27:52	13,4	91,1
161	2022-06-25 01:27:52	13,4	91,2
162	2022-06-25 02:27:52	13,4	91,4
163	2022-06-25 03:27:52	13,4	91,7
164	2022-06-25 04:27:52	13,4	92
165	2022-06-25 05:27:52	13,3	92,1
166	2022-06-25 06:27:52	13,3	92,3
167	2022-06-25 07:27:52	13,3	92,3
168	2022-06-25 08:27:52	13,3	92,4
169	2022-06-25 09:27:52	13,3	92,6

170	2022-06-25 10:27:52	13,2	89,7
171	2022-06-25 11:27:52	13,2	89,6
172	2022-06-25 12:27:52	13,2	90
173	2022-06-25 13:27:52	13,2	90,5
174	2022-06-25 14:27:52	13,1	90,1
175	2022-06-25 15:27:52	13,1	89,6
176	2022-06-25 16:27:52	13,1	89
177	2022-06-25 17:27:52	13,1	89,3
178	2022-06-25 18:27:52	13,1	89,7
179	2022-06-25 19:27:52	13,1	89,6
180	2022-06-25 20:27:52	13,1	89,6
181	2022-06-25 21:27:52	13,2	89,3
182	2022-06-25 22:27:52	13,2	89,6
183	2022-06-25 23:27:52	13,2	89,6
184	2022-06-26 00:27:52	13,2	89,5
185	2022-06-26 01:27:52	13,2	90
186	2022-06-26 02:27:52	13,3	90,3
187	2022-06-26 03:27:52	13,3	90,3
188	2022-06-26 04:27:52	13,3	90,4
189	2022-06-26 05:27:52	13,3	90,7
190	2022-06-26 06:27:52	13,4	90,7
191	2022-06-26 07:27:52	13,4	91,2
192	2022-06-26 08:27:52	13,4	91,3
193	2022-06-26 09:27:52	13,4	90,9
194	2022-06-26 10:27:52	13,4	90,7
195	2022-06-26 11:27:52	13,4	90,4
196	2022-06-26 12:27:52	13,4	90,1
197	2022-06-26 13:27:52	13,4	91
198	2022-06-26 14:27:52	13,4	91,3
199	2022-06-26 15:27:52	13,4	91,8
200	2022-06-26 16:27:52	13,4	92,3
201	2022-06-26 17:27:52	13,4	93,4
202	2022-06-26 18:27:52	13,4	92,5
203	2022-06-26 19:27:52	13,4	92
204	2022-06-26 20:27:52	13,4	91,1
205	2022-06-26 21:27:52	13,5	90,7
206	2022-06-26 22:27:52	13,5	90,3
207	2022-06-26 23:27:52	13,5	90,5
208	2022-06-27 00:27:52	13,6	91,2
209	2022-06-27 01:27:52	13,6	91,8
210	2022-06-27 02:27:52	13,7	92
211	2022-06-27 03:27:52	13,7	92,4
212	2022-06-27 04:27:52	13,8	92,6
213	2022-06-27 05:27:52	13,8	93
214	2022-06-27 06:27:52	13,9	93,4
215	2022-06-27 07:27:52	13,9	93,1
216	2022-06-27 08:27:52	14	93
217	2022-06-27 09:27:52	14	93,3

218	2022-06-27 10:27:52	14	93,1
219	2022-06-27 11:27:52	14	93,4
220	2022-06-27 12:27:52	14	94
221	2022-06-27 13:27:52	14,1	94,3
222	2022-06-27 14:27:52	14,1	94,7
223	2022-06-27 15:27:52	14,1	94,7
224	2022-06-27 16:27:52	14,1	94,5
225	2022-06-27 17:27:52	14,1	94,9
226	2022-06-27 18:27:52	14,1	94,6
227	2022-06-27 19:27:52	14,2	94,7
228	2022-06-27 20:27:52	14,2	94,4
229	2022-06-27 21:27:52	14,2	93,5
230	2022-06-27 22:27:52	14,2	94,4
231	2022-06-27 23:27:52	14,2	93,4
232	2022-06-28 00:27:52	14,2	93,9
233	2022-06-28 01:27:52	14,2	94,3
234	2022-06-28 02:27:52	14,2	94,1
235	2022-06-28 03:27:52	14,2	93,9
236	2022-06-28 04:27:52	14,3	93,6
237	2022-06-28 05:27:52	14,3	93,3
238	2022-06-28 06:27:52	14,3	93,2
239	2022-06-28 07:27:52	14,3	92
240	2022-06-28 08:27:52	14,4	92
241	2022-06-28 09:27:52	14,4	92,1
242	2022-06-28 10:27:52	14,4	91,6
243	2022-06-28 11:27:52	14,5	91,4
244	2022-06-28 12:27:52	14,5	91,3
245	2022-06-28 13:27:52	14,5	90,5
246	2022-06-28 14:27:52	14,6	90
247	2022-06-28 15:27:52	14,6	89,8
248	2022-06-28 16:27:52	14,6	90,2
249	2022-06-28 17:27:52	14,7	90,2
250	2022-06-28 18:27:52	14,7	89,2
251	2022-06-28 19:27:52	14,7	89,6
252	2022-06-28 20:27:52	14,7	89,9
253	2022-06-28 21:27:52	14,7	91,3
254	2022-06-28 22:27:52	14,7	91,8
255	2022-06-28 23:27:52	14,7	92,6
256	2022-06-29 00:27:52	14,7	93,1
257	2022-06-29 01:27:52	14,7	93,9
258	2022-06-29 02:27:52	14,7	94,4
259	2022-06-29 03:27:52	14,7	94,9
260	2022-06-29 04:27:52	14,7	94,9
261	2022-06-29 05:27:52	14,7	94,3
262	2022-06-29 06:27:52	14,7	93,3
263	2022-06-29 07:27:52	14,6	91,5
264	2022-06-29 08:27:52	14,6	91,8
265	2022-06-29 09:27:52	14,6	90,8

Alumno: Samudio Caballero Juan Francisco- Trabajo Final Integrador de Ingeniería Ambiental

266	2022-06-29 10:27:52	14,5	91,7
267	2022-06-29 11:27:52	14,5	91,8
268	2022-06-29 12:27:52	14,5	92,5
269	2022-06-29 13:27:52	14,5	93,1
270	2022-06-29 14:27:52	14,4	93,2
271	2022-06-29 15:27:52	14,4	93,3
272	2022-06-29 16:27:52	14,4	93,4
273	2022-06-29 17:27:52	14,4	92,9
274	2022-06-29 18:27:52	14,4	91,5
275	2022-06-29 19:27:52	14,3	91,2
276	2022-06-29 20:27:52	14,3	91,1
277	2022-06-29 21:27:52	14,3	90,4
278	2022-06-29 22:27:52	14,3	91
279	2022-06-29 23:27:52	14,3	90
280	2022-06-30 00:27:52	14,3	89,9
281	2022-06-30 01:27:52	14,3	90,2
282	2022-06-30 02:27:52	14,3	90,4
283	2022-06-30 03:27:52	14,3	90,3
284	2022-06-30 04:27:52	14,3	89,9
285	2022-06-30 05:27:52	14,4	89,8
286	2022-06-30 06:27:52	14,4	89,6
287	2022-06-30 07:27:52	14,4	89,2
288	2022-06-30 08:27:52	14,4	89,7
289	2022-06-30 09:27:52	14,4	89,7
290	2022-06-30 10:27:52	14,5	89,9
291	2022-06-30 11:27:52	14,5	90,7
292	2022-06-30 12:27:52	14,5	91,7
293	2022-06-30 13:27:52	14,5	92,8
294	2022-06-30 14:27:52	14,6	92,9
295	2022-06-30 15:27:52	14,6	93,1
296	2022-06-30 16:27:52	14,6	92,6
297	2022-06-30 17:27:52	14,6	93
298	2022-06-30 18:27:52	14,6	92,7
299	2022-06-30 19:27:52	14,6	91,7
300	2022-06-30 20:27:52	14,6	89,2
301	2022-06-30 21:27:52	14,6	89,3
302	2022-06-30 22:27:52	14,6	89,2
303	2022-06-30 23:27:52	14,6	89,2
304	2022-07-01 00:27:52	14,6	89,1
305	2022-07-01 01:27:52	14,6	89
306	2022-07-01 02:27:52	14,6	89,2
307	2022-07-01 03:27:52	14,6	89,6
308	2022-07-01 04:27:52	14,6	90,2
309	2022-07-01 05:27:52	14,6	90,2
310	2022-07-01 06:27:52	14,6	90,5
311	2022-07-01 07:27:52	14,7	90,4
312	2022-07-01 08:27:52	14,7	90,6
313	2022-07-01 09:27:52	14,7	90,7

Alumno: Samudio Caballero Juan Francisco- Trabajo Final Integrador de Ingeniería Ambiental

314	2022-07-01 10:27:52	14,7	90,7
315	2022-07-01 11:27:52	14,7	91
316	2022-07-01 12:27:52	14,7	91,9
317	2022-07-01 13:27:52	14,7	92,7
318	2022-07-01 14:27:52	14,7	93,3
319	2022-07-01 15:27:52	14,7	93,1
320	2022-07-01 16:27:52	14,7	92,6
321	2022-07-01 17:27:52	14,7	91,7
322	2022-07-01 18:27:52	14,7	91,3
323	2022-07-01 19:27:52	14,7	89,9
324	2022-07-01 20:27:52	14,7	89,9
325	2022-07-01 21:27:52	14,7	89,7
326	2022-07-01 22:27:52	14,7	89,9
327	2022-07-01 23:27:52	14,7	90
328	2022-07-02 00:27:52	14,7	89,7
329	2022-07-02 01:27:52	14,7	89,5
330	2022-07-02 02:27:52	14,7	89,7
331	2022-07-02 03:27:52	14,7	90,1
332	2022-07-02 04:27:52	14,6	90,4
333	2022-07-02 05:27:52	14,6	90,8
334	2022-07-02 06:27:52	14,6	90,9
335	2022-07-02 07:27:52	14,6	91,2
336	2022-07-02 08:27:52	14,5	90,9
337	2022-07-02 09:27:52	14,5	90,3
338	2022-07-02 10:27:52	14,5	90,8
339	2022-07-02 11:27:52	14,5	90,5
340	2022-07-02 12:27:52	14,4	90,8
341	2022-07-02 13:27:52	14,4	92,1
342	2022-07-02 14:27:52	14,4	92,4
343	2022-07-02 15:27:52	14,4	92,5
344	2022-07-02 16:27:52	14,4	92
345	2022-07-02 17:27:52	14,4	91,7
346	2022-07-02 18:27:52	14,4	91,7
347	2022-07-02 19:27:52	14,4	91,6
348	2022-07-02 20:27:52	14,4	91,7
349	2022-07-02 21:27:52	14,4	91,9
350	2022-07-02 22:27:52	14,4	91,9
351	2022-07-02 23:27:52	14,4	91,8
352	2022-07-03 00:27:52	14,4	91,5
353	2022-07-03 01:27:52	14,4	91,2
354	2022-07-03 02:27:52	14,4	91,4
355	2022-07-03 03:27:52	14,3	91,7
356	2022-07-03 04:27:52	14,3	91,6
357	2022-07-03 05:27:52	14,3	91,8
358	2022-07-03 06:27:52	14,3	92,3
359	2022-07-03 07:27:52	14,3	92,5
360	2022-07-03 08:27:52	14,2	92,5
361	2022-07-03 09:27:52	14,2	92,8

Alumno: Samudio Caballero Juan Francisco- Trabajo Final Integrador de Ingeniería Ambiental

362	2022-07-03 10:27:52	14,2	93,3
363	2022-07-03 11:27:52	14,2	93,9
364	2022-07-03 12:27:52	14,1	94,4
365	2022-07-03 13:27:52	14,1	95,2
366	2022-07-03 14:27:52	14,1	95,6
367	2022-07-03 15:27:52	14	95,7
368	2022-07-03 16:27:52	14	95,9
369	2022-07-03 17:27:52	14	95,7
370	2022-07-03 18:27:52	14	95,6
371	2022-07-03 19:27:52	14	95,4
372	2022-07-03 20:27:52	13,9	95,5
373	2022-07-03 21:27:52	13,9	95,4
374	2022-07-03 22:27:52	13,9	95,4
375	2022-07-03 23:27:52	13,8	94,9
376	2022-07-04 00:27:52	13,8	94,1
377	2022-07-04 01:27:52	13,8	94
378	2022-07-04 02:27:52	13,7	93,9
379	2022-07-04 03:27:52	13,7	93,9
380	2022-07-04 04:27:52	13,7	93,9
381	2022-07-04 05:27:52	13,6	93,9
382	2022-07-04 06:27:52	13,6	94
383	2022-07-04 07:27:52	13,5	94,1
384	2022-07-04 08:27:52	13,5	94,1
385	2022-07-04 09:27:52	13,5	93,6
386	2022-07-04 10:27:52	13,4	92,8
387	2022-07-04 11:27:52	13,4	92
388	2022-07-04 12:27:52	13,4	92,3
389	2022-07-04 13:27:52	13,4	93
390	2022-07-04 14:27:52	13,4	93,2
391	2022-07-04 15:27:52	13,3	92,4
392	2022-07-04 16:27:52	13,3	92,5
393	2022-07-04 17:27:52	13,3	92,1
394	2022-07-04 18:27:52	13,3	92
395	2022-07-04 19:27:52	13,3	91,2
396	2022-07-04 20:27:52	13,3	91,2
397	2022-07-04 21:27:52	13,3	91,4
398	2022-07-04 22:27:52	13,4	91,3
399	2022-07-04 23:27:52	13,4	91,4
400	2022-07-05 00:27:52	13,4	91,5
401	2022-07-05 01:27:52	13,4	91,8
402	2022-07-05 02:27:52	13,4	91,7
403	2022-07-05 03:27:52	13,4	92,4
404	2022-07-05 04:27:52	13,4	93
405	2022-07-05 05:27:52	13,5	93,4
406	2022-07-05 06:27:52	13,5	93,7
407	2022-07-05 07:27:52	13,5	93,8
408	2022-07-05 08:27:52	13,6	94
409	2022-07-05 09:27:52	13,6	94,1

Alumno: Samudio Caballero Juan Francisco- Trabajo Final Integrador de Ingeniería Ambiental

410	2022-07-05 10:27:52	13,6	94,3
411	2022-07-05 11:27:52	13,6	94,2
412	2022-07-05 12:27:52	13,7	94,5
413	2022-07-05 13:27:52	13,7	94,9
414	2022-07-05 14:27:52	13,7	95,1
415	2022-07-05 15:27:52	13,7	95,2
416	2022-07-05 16:27:52	13,7	95,1
417	2022-07-05 17:27:52	13,7	95,3
418	2022-07-05 18:27:52	13,7	95
419	2022-07-05 19:27:52	13,7	95,2
420	2022-07-05 20:27:52	13,7	95,3
421	2022-07-05 21:27:52	13,7	95,4
422	2022-07-05 22:27:52	13,7	95,6
423	2022-07-05 23:27:52	13,7	95,7
424	2022-07-06 00:27:52	13,7	95,9
425	2022-07-06 01:27:52	13,7	95,9
426	2022-07-06 02:27:52	13,6	95,8
427	2022-07-06 03:27:52	13,6	95,9
428	2022-07-06 04:27:52	13,6	95,9
429	2022-07-06 05:27:52	13,6	96
430	2022-07-06 06:27:52	13,6	96
431	2022-07-06 07:27:52	13,5	96
432	2022-07-06 08:27:52	13,5	96
433	2022-07-06 09:27:52	13,5	96
434	2022-07-06 10:27:52	13,5	96,1
435	2022-07-06 11:27:52	13,5	96
436	2022-07-06 12:27:52	13,4	96,1
437	2022-07-06 13:27:52	13,4	96,2
438	2022-07-06 14:27:52	13,4	96,2
439	2022-07-06 15:27:52	13,4	96,3
440	2022-07-06 16:27:52	13,4	96,3
441	2022-07-06 17:27:52	13,4	96,3
442	2022-07-06 18:27:52	13,4	96
443	2022-07-06 19:27:52	13,4	95,6
444	2022-07-06 20:27:52	13,4	95,4
445	2022-07-06 21:27:52	13,4	95,4
446	2022-07-06 22:27:52	13,4	95,5
447	2022-07-06 23:27:52	13,4	95,6
448	2022-07-07 00:27:52	13,4	95,8
449	2022-07-07 01:27:52	13,4	95,8
450	2022-07-07 02:27:52	13,4	96
451	2022-07-07 03:27:52	13,4	95,8
452	2022-07-07 04:27:52	13,4	95,8
453	2022-07-07 05:27:52	13,4	95,8
454	2022-07-07 06:27:52	13,4	95,8
455	2022-07-07 07:27:52	13,4	95,6
456	2022-07-07 08:27:52	13,4	95,6
457	2022-07-07 09:27:52	13,4	95,7

458	2022-07-07 10:27:52	13,4	95,8
459	2022-07-07 11:27:52	13,4	95,8
460	2022-07-07 12:27:52	13,4	96,1
461	2022-07-07 13:27:52	13,5	96,5
462	2022-07-07 14:27:52	13,5	96,9
463	2022-07-07 15:27:52	13,5	97
464	2022-07-07 16:27:52	13,5	96,8

18.13 TABLA REGISTRO DEL SMN

TABLA 68: REGISTRO DE TEMPERATURAS AMBIENTALES SUMINISTRADO POR EL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL ARGENTINO. EXTRAÍDO DEL SMNA

DÍA	TEMPERATURAS [°C]					
	MES DE JUNIO			MES DE JULIO		
	MEDIA	MÁXIMA	MÍNIMA	MEDIA	MÁXIMA	MÍNIMA
1	-2,8	5,3	-7,7	1,1	3,9	-1,9
2	-2,1	5,5	-5,6	2,0	5,0	0,2
3	0,1	1,4	-2,1	2,7	6,0	0,6
4	2,3	8,2	0,0	1,8	4,1	-0,5
5	2,3	9,0	-3,0	0,9	2,7	0,2
6	4,0	8,4	2,6	0,5	2,4	-0,9
7	7,0	9,3	3,5	2,8	4,9	0
8	6,5	9,7	4,2	0,3	7,4	-5,3
9	2,4	5,8	-1,6	2,6	5,2	0,5
10	-1,1	6,9	-6,1	3,0	6,2	1,2
11	-1,4	3,3	-5,2	1,5	5,3	-1,3
12	-1,4	2,4	-3,0	1,8	4,1	0,2
13	0,9	7,2	-4,8	-0,5	4,8	-4,9
14	4,7	9,0	1,9	0,0	2,1	-2,9
15	4,4	6,8	-1,1	-0,4	1,6	-1,2
16	3,8	6,6	-3,0	-2,2	3,1	-7,8
17	2,9	5,2	1,4	2,4	4,5	0,3
18	4,3	7,3	2,0	0,2	3,9	-2,7
19	4,3	5,9	2,4	S/D	S/D	-7,7

Alumno: Samudio Caballero Juan Francisco- Trabajo Final Integrador de Ingeniería Ambiental

20	1,7	6,1	-0,6	S/D	S/D	S/D
21	-0,9	1,3	-5,1	S/D	S/D	S/D
22	0,0	2,1	-1,2	S/D	S/D	S/D
23	0,9	2,7	-0,4	S/D	S/D	S/D
24	-0,7	1,4	-3,9	S/D	S/D	S/D
25	-0,4	1,0	-1,5	S/D	S/D	S/D
26	2,1	8,5	-0,6	S/D	S/D	S/D
27	5,7	7,7	4,3	S/D	S/D	S/D
28	2,7	6,0	0,3	S/D	S/D	S/D
29	3,0	5,9	-0,3	S/D	S/D	S/D
30	2,4	4,9	0,3	S/D	S/D	S/D

18.14 PRESUPUESTO BEHA



BEHA AMBIENTAL SRL Maria Ayelen 5399 – Bº Las Marías - Bariloche - Río Negro
Tel. 0294 4529040/50 - mail:consultas@beha.com.ar - www.beha.com.ar
Laboratorio habilitado por Salud Ambiental de Río Negro bajo el N° 008 - Exp. N° 76389-S-2007

Presupuesto Nro.	2341	Fecha	15 de enero del 2023
Empresa/Organización	Diálisis Patagonia	Contacto	Juan
Mail	caballerojsamudio@gmail.com	Teléfono	2944346980
Información muestras a analizar			
Cantidad	1	Matriz	Efluentes
Tipo de Análisis	Fisicoquímicos	Responsable Muestreo	Beha Ambiental SRL

Código	Grupo	Determinación	Metodología	Límite de detección	Neto	IVA 21%	Total
OB004	Fisicoquímico	DBO	SM 5210 B	< 5 mg/L	\$ 2.595,58	\$ 545,07	\$ 3.140,66
OB005	Fisicoquímico	DQO	5220 D	< 3 mg/L	\$ 3.195,26	\$ 671,00	\$ 3.866,26
OB008	Fisicoquímico	Fósforo Total	SM 4500-P C	0,3 mg/L	\$ 3.128,09	\$ 656,90	\$ 3.784,99
OB007	Fisicoquímico	Nitrógeno Total	SM 4500-N C	10 mg/L	\$ 3.727,77	\$ 782,83	\$ 4.510,60
Total por muestra					\$ 12.646,70	\$ 2.655,81	\$ 15.302,51
Cantidad de muestras				1	\$ 12.646,70	\$ 2.655,81	\$ 15.302,51
Descuento				0%	\$ -	\$ -	\$ -
Toma de muestras y traslado al laboratorio km				0	\$ -	\$ -	\$ -
Total Final					\$ 12.646,70	\$ 2.655,81	\$ 15.302,51

FIGURA 64: NOTA: PRESUPUESTO DE BEHA AMBIENTAL. EXTRAÍDO DE BEHA AMBIENTAL S.R.L

18.15 PLANO DEL HFSSH PARA INFILTRACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

A continuación se ilustra los planos del HFSSH diseñado para el objetivo de infiltración de las aguas residuales:

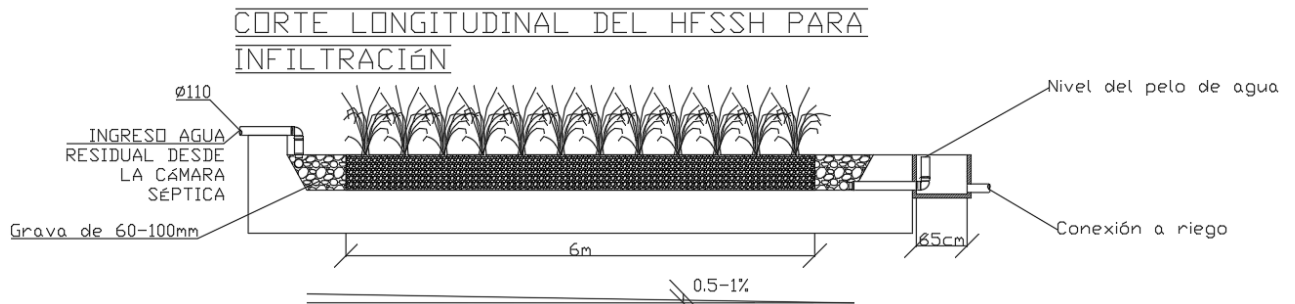


FIGURA 65: NOTA: PLANO DEL HFSSH PARA INFILTRACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA

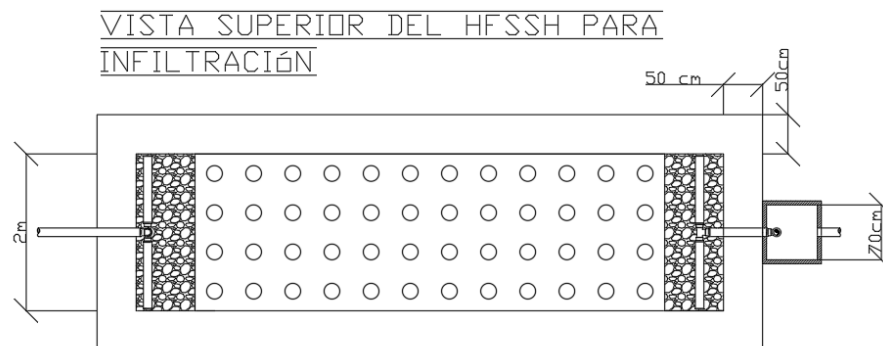


FIGURA 66: NOTA: PLANO DEL HFSSH PARA INFILTRACIÓN VISTA SUPERIOR. ELABORACIÓN PROPIA

18.1 PLANO DEL HFSSH PARA RIEGO DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

A continuación se ilustra los planos del HFSSH diseñado para el objetivo de reúso en riego de las aguas residuales:

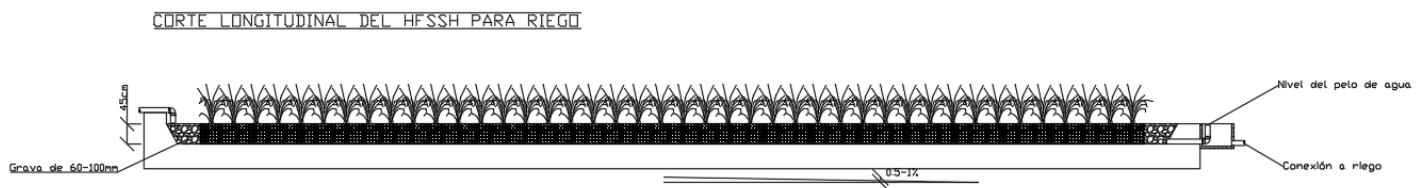


FIGURA 67: NOTA: PLANO DEL HFSSH PARA REÚSO EN RIEGO. ELABORACIÓN PROPIA

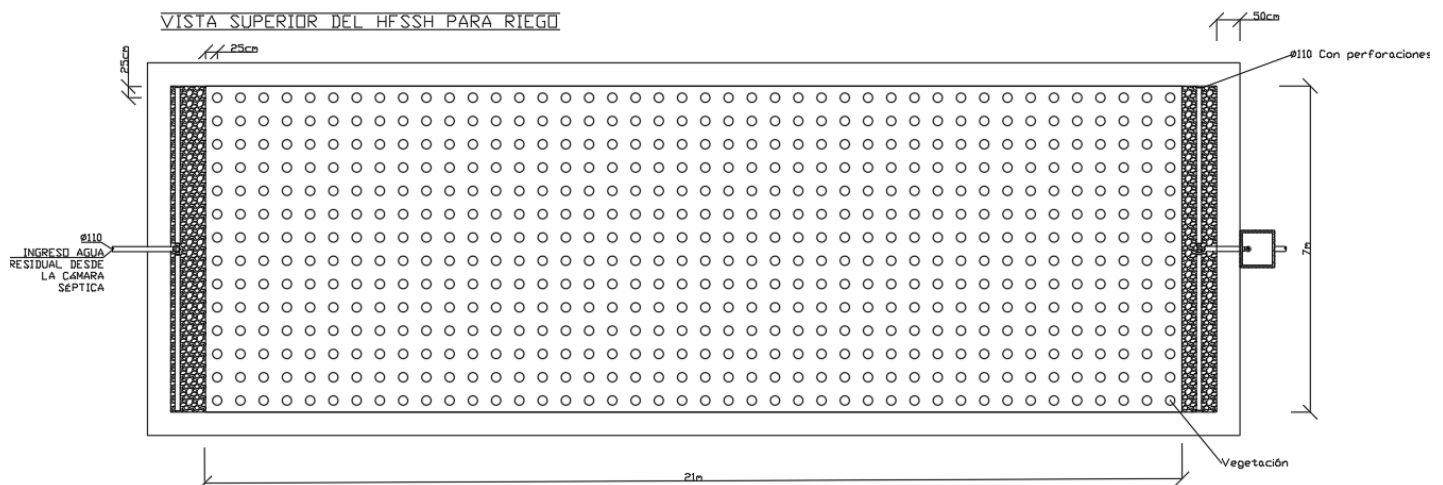


FIGURA 68: NOTA: PLANO DEL HFSSH PARA REÚSO EN RIEGO. ELABORACIÓN PROPIA