

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



**“MANEJO DE LIXIVIADOS DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE
LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL RELLENO SANITARIO DE
ANTA, CUSCO, PERÚ”**

Presentada por:

DIEGO ENRIQUE SUERO SÁNCHEZ

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Lima – Perú

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**“MANEJO DE LIXIVIADOS DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE
LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL RELLENO SANITARIO DE
ANTA, CUSCO, PERÚ”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE

MAGISTER SCIENTIAE

Presentada por:

DIEGO ENRIQUE SUERO SÁNCHEZ

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Wilfredo Baldeón Quispe
PRESIDENTE

Mg.Sc. Rosa Miglio Toledo
ASESOR

Dra. Rosario Pastor Zegarra
CO-ASESOR

Ph.D. Lizardo Visitación Figueroa
MIEMBRO

Dra. Rosemary Vela Cardich
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mi padre Enrique Suero, mi madre Rosario Sánchez, Wendy Johanson y a mis profesoras Rosa Miglio y Rosario Pastor.

AGRADECIMIENTOS

A la Catedra UNESCO de Sostenibilidad de la Universidad Politécnica de Cataluña por las gestiones y el financiamiento que hicieron posible el presente trabajo. A la facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina y la Municipalidad Provincial de Anta.

A mis profesoras Rosa Miglio y Rosario Pastor por todas las enseñanzas y la constante tutoría.

A mis padres Enrique Suero y Rosario Sánchez, quienes gracias a su apoyo se pudo lograr el objetivo del presente trabajo. A mis familiares por siempre estar presentes.

A mis amigos, colegas y al maestro de obra Eloy Sinchi.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1	DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL PERÚ	4
2.2	FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES	8
2.3	LIXIVIADOS DEL COMPOSTAJE DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA	14
2.4.	HUMEDALES CONSTRUIDOS.....	20
2.5.	HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE COMPOSTAJE.....	24
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
3.1.	LUGAR DE INVESTIGACIÓN	27
3.2.	METODOLOGÍA.....	29
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1.	DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE COMPOSTAJE EN EL RELLENO SANITARIO DE ANTA	44
4.2.	CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS LIXIVIADOS GENERADOS EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE DEL RELLENO SANITARIO.....	46
4.3.	SELECCIÓN DE MACRÓFITAS y DILUCIÓN DE LIXIVIADOS	47
4.4.	DISEÑO DEL SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADO DE COMPOSTAJE	48
4.5.	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PILOTO	51
4.6.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS	55
4.7.	EVALUACIÓN DEL DESARROLLO VEGETATIVO EN EL SISTEMA PILOTO.....	56

4.8. EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE TRATAMIENTO DEL SISTEMA PILOTO.....	57
4.9. PROPUESTA DE DISEÑO DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE ANTA.....	63
V. CONCLUSIONES.....	75
VI. RECOMENDACIONES	77
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caracterización de lixiviados en botadero Haquira.....	5
Tabla 2: Cuantificación de residuos generados en seis distritos de la provincia de Anta 6	
Tabla 3: Caracterización de residuos sólidos en el botadero Kehuar	7
Tabla 4: Manejo de lixiviados en Municipios de Ecoclubes en Argentina	11
Tabla 5: Temperaturas y tiempos necesarios para la eliminación de patógenos en compostaje	13
Tabla 6: Comparación de características de compost de fracción orgánica segregada in situ y de relleno sanitario.....	13
Tabla 7: Caracterización de diversos lixiviados de compostaje	17
Tabla 8: Caracterización de lixiviados de compostaje en Croton Point	18
Tabla 9: Ubicación del relleno sanitario de Chacán - Anta.....	27
Tabla 10: Precipitación en estación “Anta – Ancachuro” en el periodo 2010-2016.....	28
Tabla 11: Análisis previos al diseño del piloto de tratamiento	32
Tabla 12: Principales características de la primera etapa del Sistema Francés.....	34
Tabla 13: Principales características de la segunda etapa del Sistema Francés	35
Tabla 14: Principales características del humedal horizontal.....	35
Tabla 15: Preparación de sustrato para humedales.....	36
Tabla 16: Descripción de componentes del sistema de bombeo de lixiviado	37
Tabla 17: Programación de bombes de Sistema Francés	39
Tabla 18: Calendario de medición del desarrollo vegetativo en el Sistema Francés y humedal horizontal	41
Tabla 19: Puntos de muestreo y descripción	42
Tabla 20: Parámetros evaluados en el sistema piloto	42
Tabla 21: Resultados de riego de <i>Schoenoplectus americanus</i> con lixiviado	47
Tabla 22: Dimensiones de las sub unidades del Sistema Francés	49
Tabla 23: Características de capas de sustratos del Sistema Francés	49
Tabla 24: Dimensiones de humedal horizontal	50
Tabla 25: Características de los sustratos del humedal horizontal	51
Tabla 26: Concentraciones promedio de los parametros monitoreados y eficiencias promedio de tratamiento.....	58

Tabla 27: Actividades de operación y mantenimiento	71
Tabla 28: Actividades de operación y mantenimiento	72
Tabla 29: Estimación de costos directos de construcción de sistema de humedales.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Disposición de residuos sólidos en algunos distritos de la provincia de Anta..	6
Figura 2: Trinchera de relleno sanitario de Anta.....	8
Figura 3: Fracción orgánica de los residuos sólidos municipales	9
Figura 4: Esquema de manejo de la fracción orgánica en la planta Torrelles de Llobregat	10
Figura 5: Generación de lixiviado en transporte de residuos sólidos	14
Figura 6: Generación de lixiviado en pilas de compostaje.....	15
Figura 7: Generación de lixiviado en pilas de compostaje.....	16
Figura 8: Manejo de lixiviado en pilas de compostaje	19
Figura 9: Humedal construido y su balance hídrico.....	21
Figura 10: Esquema de humedal construido de sistema francés	22
Figura 11: Humedales verticales y horizontal para el tratamiento de lixiviado diluido de relleno sanitario.....	23
Figura 12: Mapa de ubicación del relleno sanitario de Anta.....	27
Figura 13: Temperatura en estación “Anta – Ancachuro” en el periodo 2010-2016	29
Figura 14: Composteras de concreto en el relleno sanitario de Anta	30
Figura 15: Esquema de composteras en relleno sanitario de Anta	30
Figura 16: Medición del volumen de lixiviado de compostaje en la caja de almacenamiento del relleno sanitario de Chacán – Anta.....	31
Figura 17: Prueba de dilución de lixiviado de compostaje.....	33
Figura 18: A la izquierda confitillo y a la derecha confitillo zarandeado y lavado.....	36
Figura 19: Tuberías de recojo de efluentes y ventilación en Sistema Francés	38
Figura 20: Instalación de tuberías PVC SAL de 2” y sustrato	38
Figura 21: Esquema de puntos de medición de desarrollo vegetativo	41
Figura 22: Esquema de manejo de fracción orgánico en el relleno sanitario de Anta ...	44
Figura 23: Lixiviado de compost rebalsándose de la caja de almacenamiento.....	45
Figura 24: Izquierda riego con lixiviado puro y derecha con lixiviado diluido 1:5	47
Figura 25: Esquema de piloto de humedales construidos	48
Figura 26: Esquema de piloto de Sistema Francés de dos etapas.....	49

Figura 27: Sustratos en Sistema Francés: primera etapa (izquierda) y segunda etapa (derecha).....	50
Figura 28: Vista de planta de humedal horizontal del piloto.....	51
Figura 29: Esquema de funcionamiento de bombeo de lixiviados.....	52
Figura 30: Tanque de bombeo de lixiviado diluido.....	52
Figura 31: Vista de las dos etapas del Sistema Francés	53
Figura 32: Sub unidades de la primera etapa del Sistema Francés.....	53
Figura 33: Bombas para la alimentación de la segunda etapa.....	54
Figura 34: Sub unidades de la segunda etapa del Sistema Francés	54
Figura 35: Humedal subsuperficial horizontal en el mes de febrero.....	55
Figura 36: Ingreso de lixiviado en C.F. 1-3.....	56
Figura 37: Ciclo de funcionamiento del Sistema Francés	56
Figura 38: Promedio de tallos y hojas por metro cuadrado.....	57
Figura 39: Muestra de lixiviado afluente y de efluentes de humedales.....	57
Figura 40: DBO ₅ promedio en los puntos de muestreo	60
Figura 41: DQO promedio en los puntos de muestreo	60
Figura 42: Coliformes fecales promedios en puntos de muestreo.....	61
Figura 43: CE promedio en puntos de muestreo	62
Figura 44: Composteras y almacenamiento de lixiviados de compostaje propuesto	63
Figura 45: Distribución de componentes de sistema de tratamiento propuesto	64
Figura 46: Funcionamiento del sifón para el vertimiento de afluentes en Sistema Francés	66
Figura 47: Vista de composteras y primera etapa de Sistema Francés proyectado.....	67
Figura 48: Vista de segunda etapa de Sistema Francés y humedal horizontal	68
Figura 49: Ubicación de propuesta de humedales en el relleno sanitario de Anta.....	70

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Galería fotográfica	85
Anexo 2: Dimensionamiento del sistema piloto de humedales para el tratamiento de lixiviado de compostaje	89
Anexo 3: Resultados de muestreo de lixiviado y efluentes del sistema piloto de tratamiento	95
Anexo 4: Desarrollo vegetativo en sistema piloto de tratamiento.....	102
Anexo 5: Análisis estadístico de resultado de muestreos del sistema piloto de tratamiento	104
Anexo 6: Dimensionamiento de propuesta para el relleno sanitario de Anta	109
Anexo 7: Planos de piloto de humedales para el tratamiento de lixiviados	114
Anexo 8: Planos propuesta de tratamiento para el relleno sanitario de Anta	118

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es evaluar el funcionamiento de un piloto de humedales construidos para el tratamiento de los lixiviados del proceso de compostaje de la fracción orgánica de los residuos del relleno sanitario de Chacán, Anta , Cusco. Estos lixiviados son generados en 14 composteras del relleno sanitario de Anta y se caracterizaron por tener una alta carga orgánica con un promedio de 3359.62 mg/l de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), teniendo un incremento significativo de caudal en la época de lluvia. Para utilizar los humedales construidos en el tratamiento de estos lixiviados, se estableció que sería necesaria una dilución 1:5 de los lixiviados y para así evitar la muerte de las macrófitas de los humedales. Se diseñó, construyó y evaluó un piloto de humedales construidos compuesto por un Sistema Francés y un humedal horizontal, el cual tuvo una eficiencia global de remoción promedio de 86.46% de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), 88.90% de Demanda Química de Oxígeno (DQO), 94.10% de Sólidos Totales en Suspensión (STS) y 98.25% de coliformes fecales. En base a los resultados del piloto, se elaboró una propuesta a escala real para el tratamiento de la totalidad de los lixiviados del compostaje del relleno sanitario cuya área fue 1495.5 m² lo que representa el 3.5% del área total del relleno sanitario de Anta.

Palabras claves: Relleno sanitario, lixiviado de compostaje, humedal construido, sistema francés, celda francesa.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the operation of a pilot of constructed wetlands for the treatment of leachates from the composting process of the organic fraction of the waste from the Chacán landfill, Anta, Cusco. These leachates are generated in 14 composters located in the Anta landfill and it was identified that these leachates had a high organic load with an average of 3359.62 mg/l of Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), having a significant increase in flow in the rainy season. In order to use the constructed wetlands in the treatment of these leachates, it was established that a 1: 5 dilution of the leachates would be necessary to avoid the death of macrophytes in the wetlands. A constructed wetland pilot composed of a French system and a horizontal wetland was designed, built and evaluated, which had a global average removal efficiency of 86.46% of Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), 88.90% of Chemical Oxygen Demand (COD), 94.10% of Total suspended solids (TSS) and 98.25% of fecal coliforms. Based on the results of the pilot, a full-scale proposal was developed for the treatment of all the leachate from the composting in the Anta landfill, which had an area of 1495.5 m², which represents 3.5% of the total area of the Anta landfill.

Keywords: Landfill, compost leachate, constructed wetland, French system.

I. INTRODUCCIÓN

La disposición final de los residuos sólidos en América Latina y el Caribe se realiza en su mayoría de forma incontrolada o semicontrolada. Según ONU Medio Ambiente (2018) 40 millones de personas carecen de acceso a la recolección de residuos, así mismo, 145 000 toneladas de residuos al día se destinan a basurales. De la reducida cantidad de rellenos sanitarios existentes, algunos no cumplen con las especificaciones técnicas mínimas necesarias para ser denominados como tales, generando problemas de contaminación ambiental y afectando la salud humana.

Esta situación se repite en el Perú en donde, según el Ministerio del Ambiente - MINAM (2021), un total de 1685 distritos no dispondrían sus residuos sólidos en rellenos sanitarios, generando un impacto en el medio ambiente y la salud humana. De los residuos producidos la mayor parte son del tipo orgánico, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI (2020) el 57.5% de los residuos sólidos municipales generados fueron orgánicos, estos son de especial importancia ya que son responsables de la generación de lixiviados, los que se caracterizan por ser altamente contaminantes. Adicionalmente están relacionados con la generación de algunos gases de efecto invernadero.

La ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Perú y su reglamento, promueven la valorización de la fracción orgánica (FO) de los residuos sólidos a través del desarrollo de compostaje. Proceso que permite la generación de un abono orgánico para la mejora de suelos, sin embargo, se pueden generar lixiviados por la descomposición de la materia orgánica, el exceso de agua aplicada y/o por la precipitación que cae en las pilas de compost. La inadecuada disposición de estos lixiviados puede traer consecuencias negativas por su alta carga orgánica, la presencia de coliformes, exceso de nutrientes, entre otros.

La tendencia actual de implementación de rellenos sanitarios a nivel nacional y de plantas de tratamiento de la fracción orgánica, hace significativa la investigación de tecnologías que permitan un manejo adecuado del lixiviado generado en los procesos de compostaje.

Desde abril del 2016 empezó a operar el relleno sanitario de Chacán, en el distrito de Anta, provincia de Anta, región de Cusco. Dentro del relleno se tiene un área destinada al compostaje de parte de la fracción orgánica que llega a las instalaciones. Durante el proceso, se generan lixiviados que son recolectados y almacenados. Eventualmente los lixiviados son recirculados al mismo proceso de compostaje, sin embargo, en época de altas precipitaciones, la producción de lixiviado aumenta significativamente, rebalsándose del punto de almacenamiento e infiltrándose en el suelo. Considerando que estos lixiviados tienen altas cargas orgánicas, se viene generando un problema de contaminación de suelos y eventualmente de los cursos hídricos cercanos.

Una alternativa para el tratamiento de los lixiviados generados por la fracción orgánica, son los humedales construidos. Tecnología que se caracteriza por ser un sistema natural de tratamiento, de bajo costo, alta eficiencia, que utiliza la vegetación local, además de no tener requerimientos significativos de energía eléctrica o de sustancias químicas para su funcionamiento.

Objetivo general

Evaluar el funcionamiento de un piloto de humedales construidos para el tratamiento de los lixiviados del proceso de compostaje de la fracción orgánica de los residuos del relleno sanitario de Chacán – Anta – Cusco.

Objetivos específicos

- a. Realizar el diagnóstico del manejo del compostaje en el relleno sanitario de Chacán – Anta – Cusco.

- b. Diseñar, construir e implementar un piloto de humedales construidos conformados por un sistema francés y un humedal horizontal para el tratamiento de lixiviados de compostaje en el relleno sanitario de Chacán – Anta – Cusco.
- c. Evaluar las eficiencias de los humedales construidos del piloto de tratamiento de lixiviados de compostaje en el relleno sanitario de Chacán – Anta – Cusco.
- d. Realizar una propuesta a escala real de un sistema de humedales construidos para el manejo de los lixiviados de compostaje del relleno sanitario de Chacán – Anta – Cusco.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL PERÚ

OEFA (2016) identificó que, a través de los años, la producción de residuos sólidos en el Perú se ha incrementado considerablemente, mientras que la gestión municipal no ha mejorado al mismo ritmo; esta diferencia pone en riesgo la salud de las personas y genera grandes impactos en el medio ambiente. La insuficiente cantidad de rellenos sanitarios en el Perú, no permite recibir el total de residuos generados, estos, son dispuestos en botaderos, vías públicas, y riberas de ríos o quebradas. Lo que genera problemas como la proliferación de animales e insectos vectores transmisores de enfermedades, la exposición de segregadores informales a riesgos para su salud, la contaminación del aire por la quema de los residuos, la contaminación de cuerpos de agua por los lixiviados, entre otros.

Según el Ministerio del Ambiente - MINAM (2021) en el Perú a julio del 2021 existieron 58 rellenos sanitarios, los cuales solo estarían atendiendo a 189 de los 1874 distritos del país. Así mismo, Defensoría del Pueblo (2019) reportó que en las supervisiones realizadas por OEFA entre octubre de 2018 y septiembre 2019 se identificó que solo el 55% de los rellenos sanitarios supervisados cumplían con las obligaciones fiscalizadas, por lo que se hace importante que se garantice que estas infraestructuras de disposición final funcionen correctamente y cumplan con las normas técnicas, ambientales y administrativas

2.1.1. Disposición de residuos sólidos en Cusco

Hasta el año 2016 el departamento de Cusco no contaba con rellenos sanitarios, en todas sus provincias la disposición de los residuos sólidos era realizada en botaderos. En la ciudad de Cusco la disposición de residuos se realiza en el botadero “Haquira”, el que ocupa un área de cinco hectáreas y está ubicado en la comunidad campesina de Haquira

Grande, a 7.7 km al Noreste de la ciudad de Cusco. Según Ambia y Farfán (2012) la inadecuada disposición de los residuos sólidos en este botadero genera problemas de contaminación del aire, suelo y recursos hídricos. Los lixiviados generados son transportados a través de canales de tierra, hacia pozas de almacenamiento impermeabilizadas, desde donde eventualmente son recirculados. Estos lixiviados provenientes de los residuos sólidos municipales tienen elevadas cargas orgánicas como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Caracterización de lixiviados en botadero Haquira

Parámetros	Autores de las caracterizaciones	
	Ambia y Farfán (2012)	Huamán y Jordán (2013)
DBO ₅	1175	2048
DQO	5200	7134
pH	8	7.5
Sólidos totales	-	12233
Fecha de muestreo	Septiembre de 2011	Junio de 2013

FUENTE: Ambia y Farfan (2012) y Huamán y Jordán (2013)

Al año 2019 el departamento de Cusco cuenta con dos rellenos sanitarios ubicados en las provincias de Anta y Urubamba. Los cuales atienden a 10 de los 112 distritos de la región. Así mismo, a nivel de departamento se tiene una generación municipal anual de 228 104.01 toneladas de residuos sólidos, y una generación per cápita de 0.66 kg/hab./día (Ministerio del Ambiente – MINAM 2019).

2.1.2. Disposición de residuos sólidos en la provincia de Anta

Desde el año 2007 hasta el 2015 operó en Anta el botadero controlado “Kehuar”, el que ocupaba un área de 3.16 hectáreas. Aquí se disponían los residuos del distrito de Anta y eventualmente de algunos distritos cercanos. En el resto de distritos, la disposición de residuos se realizaba en botaderos no controlados (Figura 1). En la Tabla 2 se presenta información de la cantidad de residuos dispuestos entre los años 2004 al 2008 en el botadero de Kehuar y en la Tabla 3 su caracterización.



Figura 1: Disposición de residuos sólidos en algunos distritos de la provincia de Anta
 FUENTE: Municipalidad Provincial de Anta (2013)

Tabla 2: Cuantificación de residuos generados en seis distritos de la provincia de Anta

Distritos de la provincia de Anta	Generación per cápita Kg/hab/día	Población Urbana N° de hab.	Cantidad diaria de RRSS Urbanos (kg)	Cantidad diaria de RRSS Urbanos (TM)
Anta	0.550	7891	4340	4.340
Cachimayo	0.404	1920	776	0.776
Pucyura	0.475	3912	1858.2	0.1858
Ancahuasi	0.627	2894	1815	0.1815
Mollepata	0.592	3543	2097	0.2097
Chinchaypucyo	0.430	1950	840	0.840

FUENTE: Municipalidad Provincial de Anta (2013)

Tabla 3: Caracterización de residuos sólidos en el botadero Kehuar

N°	Tipo de residuo	Componente porcentual
1	Materia orgánica	46%
2	Follaje y madera	1%
3	Papel	3%
4	Cartón	4%
5	Plástico PET	3%
6	Plástico duro	3%
7	Vidrio	2%
8	Bolsas plásticas	8%
9	Tetrapack	1%
10	Textiles	2%
11	Metal	2%
12	Tecnopor	2%
13	Residuos sanitarios	11%
14	Cerámico	2%
15	Pilas	0%
16	Caucho, cuero y jebe	1%
17	Material inerte	8%
18	Otro	0%
	Total	100%

FUENTE: Adaptado de Municipalidad Provincial de Anta (2013)

Una vez realizado el cierre del botadero de Kehuar, entró en funcionamiento el relleno sanitario de Chacán – Anta, ubicado en terrenos de la comunidad campesina de Chacán. Su construcción se inició en el año 2015 y su funcionamiento en abril del 2016. El relleno sanitario de Anta ocupa un área de cuatro hectáreas y está compuesto por:

- Área administrativa
- Almacén
- Vestidores y comedor
- Área de segregación
- Área de compostaje
- Trincheras 1 y 2 (ver Figura 2)
- Tanque de almacenamiento de lixiviados de trincheras
- Cerco perimétrico



Figura 2: Trinchera de relleno sanitario de Anta

FUENTE: Fuente propia

2.2 FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Si bien los materiales considerados como fracción orgánica de los residuos sólidos municipales pueden variar ligeramente en función del país o región, por lo general, se incluye a los restos de frutas y verduras, restos de panadería, café, té, frutas y vegetales enteros, bolsas biodegradables, restos de huevos, carne y pescado, huesos, restos de pasta y cereales, productos lácteos, golosinas, otros tipos de alimentos y residuos biodegradables no comestibles e impurezas (Campuzano y González-Martínez 2016).

El manejo de la fracción orgánica de los residuos sólidos resulta complicado por el alto contenido de humedad y su rápida putrefacción. Su disposición de manera directa en rellenos sanitarios genera la formación de lixiviados con altas cargas orgánicas, que pueden contaminar las aguas superficiales y/o subterráneas, además de la emisión de gases de efecto invernadero (Lastra 2013).

En la Figura 3 se presenta ejemplos de fracción orgánica de los residuos sólidos municipales.



Figura 3: Fracción orgánica de los residuos sólidos municipales

FUENTE: Campuzano y González-Martínez (2016)

En botaderos y en mayor medida en rellenos sanitarios se dan condiciones para que la digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos genere gases de efecto invernadero. En el Perú se estima que el 36% de las emisiones de metano se debe a los residuos sólidos. Para evitar estos efectos negativos se promueve en distintos países la reducción gradual de los residuos orgánicos biodegradables que son destinados a las trincheras de los rellenos sanitarios (ONU Medio Ambiente 2018).

En Europa desde el año 1999 existe la directiva “Landfill Directive 1999/31/EC” (Council of the European Union 1999) que busca reducir la cantidad de desechos biodegradables que llegan a las trincheras de los rellenos sanitarios; a partir del año 2016, el porcentaje máximo admisible de residuos orgánicos en las trincheras de rellenos sanitarios fue de 35% en comparación a la producción de residuos de 1995.

2.1.3. Plantas de tratamiento de fracción orgánica

El procesamiento de la fracción orgánica de los residuos municipales, puede realizarse en plantas de tratamiento especializadas. La naturaleza y nivel de impurezas presentes en la fracción orgánica determina las necesidades tecnológicas de tratamiento en la planta. Los dos principales procesos en este tipo de plantas son el compostaje y la digestión anaerobia (Alvarez 2014).

Un ejemplo de planta de tratamiento que de manera exitosa procesa la fracción orgánica, es la planta de compostaje de Torrelles de Llobregat en Barcelona - España, la que tiene una superficie de 9645 m² y fue dimensionada para tratar 6000 toneladas al año de fracción orgánica de residuos municipales (FORM) y 900 toneladas al año de fracción vegetal, bajo el sistema de compostaje en pilas con volteo. Como se presenta en la Figura 4, se incluye el manejo del lixiviado en los procesos de la planta (Huerta *et al.* 2008).

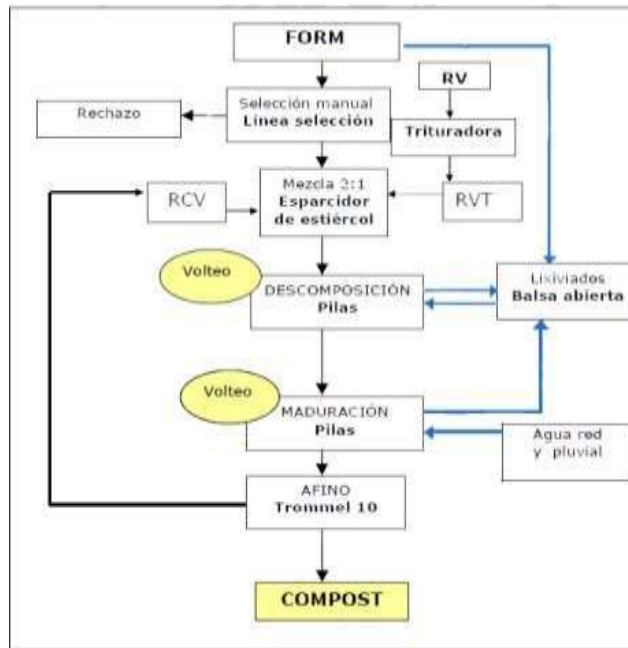


Figura 4: Esquema de manejo de la fracción orgánica en la planta Torrelles de Llobregat

FUENTE: Huerta *et al.* (2008)

En Sudamérica, existen experiencias exitosas en la construcción y operación de plantas de tratamiento de fracción orgánica. En Argentina, alrededor de 50 municipios implementaron una propuesta para el manejo integral de los residuos urbanos, de esta forma surgió la organización de Ecoclubes, que se conforman en redes municipales. Los residuos orgánicos recolectados, son llevados a plantas de tratamiento, las que suelen estar conformadas por plataformas de concreto donde se realiza el proceso de compostaje. Muchas de estas municipalidades derivan sus lixiviados a plantas de tratamiento de aguas residuales como se presenta en la Tabla 4 (Bertolino *et al.* 2008).

Tabla 4: Manejo de lixiviados en Municipios de Ecoclubes en Argentina

Localidad	Depósito de lixiviados	Destino final de lixiviado
Villa Eloísa	1 cámara séptica: 2.50 x 1.50 x 2 m	Riego
Chovet	2 cámaras sépticas: 1.000 lt.	Planta de tratamiento de residuos cloacales
Chañar Ladeado	2 cámaras sépticas: 2.50 x 1.50 x 2 m	Retirado por camión
Arequito	1 cámara séptica	Riego
Firmat	2 cámara sépticas: 2.00 x 2.00 x 1 m	Planta de tratamiento de residuos cloacales
Federal	Cámaras sépticas cada 2 plataformas	Lechos nitrificantes
Marcos Juárez	2 cámaras sépticas de 8 m ³	Laguna en el vertedero
Cañada de Gómez	3 cámaras sépticas	Filtro biológico
Pergamino	2 cámaras sépticas	Planta de tratamiento de residuos cloacales
Paraná	2 cámaras sépticas	Se utiliza para riego

FUENTE: Bertolino *et al.* (2008)

2.1.4. Compostaje de la fracción orgánica de los residuos sólidos

El compostaje es un proceso de descomposición aerobia de la fracción orgánica, en la que actúan poblaciones microbianas de bacterias, hongos y otros microorganismos, quienes transforman los sustratos orgánicos iniciales en CO₂, H₂O, energía calórica y un producto final estable denominado compost. Este producto final deberá estar libre de organismos patógenos y de malos olores, de forma que pueda ser aplicado en suelos como enmienda orgánica (Pérez y Herrero 2015).

El proceso de compostaje como alternativa para la reducción de los residuos biodegradables ha ido en aumento a nivel mundial. En el caso de Europa, la fracción orgánica de residuos sólidos municipales compostada en 2019 fue de 39 millones de toneladas, lo que representa un aumento de 176% en comparación con la producción de 1995 (European Statistical Office - Eurostat 2015).

En América Latina la falta de infraestructura para el procesamiento de la fracción orgánica lleva a que sea dispuesta en rellenos sanitarios, lo cual agrava los problemas ya existentes de generación de lixiviado y de gases de efecto invernadero. Ante esto, en varios países se ha vuelto una práctica común el compostaje, sin embargo, este ha sido

limitado a instalaciones de pequeña escala. Teniendo como principales dificultades los altos costos, inadecuada planificación y dimensionamiento de las plantas de tratamiento, la falta de capacitación y de entidades de certificación (Graziani 2018).

a. Proceso de compostaje

Según Álvarez (2014) la duración del proceso de compostaje depende de factores como las tecnologías empleadas, las condiciones locales, los materiales de entrada, entre otros. Por lo general el proceso oscila entre 8 y 14 semanas de duración.

Según Bohórquez (2019) y Pérez y Herrero (2015) se distinguen cuatro fases en función de la temperatura generada a lo largo del proceso de compostaje, estas fases y sus características son:

- Fase mesófila: Temperatura ambiental al inicio del proceso, debido a la actividad microbiana la temperatura aumenta en pocos días hasta alcanzar los 40°C.
- Fase termófila o de higienización: La temperatura alcanza entre 70 y 80°C, por la mayor actividad microbiana. La mayor parte de la celulosa es degradada. Una temperatura mínima de 70°C es necesaria para la eliminación de microorganismos y parásitos patógenos.
- Fase de enfriamiento: Una vez consumidas las fuentes de carbono y en especial de nitrógeno, la temperatura desciende hasta alrededor de los 40 °C a 45 °C. En esta etapa continua la degradación de celulosa y ya empiezan a aparecer hongos.
- Fase de maduración: El compost permanece a temperatura ambiente. Esta fase suele durar tiempos prolongados, lo que tiene un impacto positivo para garantizar la seguridad del compost.

En la Tabla 5 se presentan las temperaturas y tiempos necesarios para la eliminación de algunos patógenos.

Tabla 5: Temperaturas y tiempos necesarios para la eliminación de patógenos en compostaje

Microorganismos	Temperatura	Tiempo de exposición
Salmonella spp	55 °C	1 hora
	65 °C	15 - 20 minutos
Escherichia coli	55 °C	1 hora
	65 °C	15 - 20 minutos
Brucella abortus	55 °C	1 hora
	62 °C	3 minutos
Parvovirus bovino	55 °C	1 hora
Huevos de Ascaris lumbricoides	55 °C	3 días

FUENTE: Román *et al.* (2013)

b. Compost provenientes de segregación in situ y de rellenos sanitarios

Según Huerta *et al.* (2008), el compost producido de la fracción orgánica de residuos Municipales recogida in situ, se diferencia del compost producido de la fracción orgánica segregada en un relleno sanitario, en el contenido de impurezas y metales pesados. En la Tabla 6 se presentan las características de la fracción orgánica de ambas procedencias.

Tabla 6: Comparación de características de compost de fracción orgánica segregada in situ y de relleno sanitario

	FO segregada in situ	FO de relleno sanitario	FO segregada in situ	FO de relleno sanitario
Planta	Torrelles	Mataró	Varias	Varias
Año	1997	1997	2006	2006
pH	5.62	5.83	5.32	6.52
CE dS/m	2.58	6.58	2.93	6.23
Humedad %	79.58	48.42	71.96	56.21
N-NH ₄ ⁺ ppm soluble	725	1241	701	3451
MOT %	76.64	51.39	86.71	62.55
N _{org} %	2.53	1.7	2.67	1.78
C / N	15.39	15.73	16.9	18.21
% Fe	0.17	1	0.11	0.69
ppm Zn	82	219	45	422
ppm Mn	71		32	108
ppm Cu	24	202	14	122

<<Continuación>>

ppm Ni	27	100	2	30
ppm Cr	37	64	3	42
ppm Pb	14	152	7	43
ppm Cd	0.2	1.1	0.3	0.9

FUENTE: Adaptado de Huerta *et al.* (2008)

2.3 LIXIVIADOS DEL COMPOSTAJE DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA

El lixiviado de compostaje es el líquido que se drena por efecto de la sobresaturación de los residuos sólidos orgánicos en el proceso de compostaje. Suele formarse en las pilas de compost con exceso de agua y material fresco. Cuando el lixiviado procede de un compost fresco tienen un aspecto oscuro, pH ácido y mal olor (Román *et al.* 2013).

El lixiviado de compostaje es generalmente abundante en nutrientes solubles, materia orgánica disuelta y particulada, así como en una gran variedad de microorganismo. También puede encontrarse la presencia de metales pesados, dependiendo del origen de la materia prima (Mohammadipour *et al.* 2020).

En las Figura 5 y 6 se presenta la generación de lixiviados a lo largo de distintos procesos dentro del compostaje (transporte, recepción, segregación y formación de pilas).



Figura 5: Generación de lixiviado en transporte de residuos sólidos

FUENTE: Huerta *et al.* (2008)



Figura 6: Generación de lixiviado en pilas de compostaje

FUENTE: Huerta *et al.* (2008)

Un incorrecto manejo de los lixiviados puede generar problemas de anaerobiosis y producción excesiva de lixiviados. Esto puede bajar el pH del material, dificultando el inicio del proceso de compostaje, al impedir el desarrollo de los microorganismos mesófilos, además de la producción de malos olores. El riego de pilas de compostaje con lixiviado para mantener niveles de humedad, puede causar el aumento de la salinidad, ya que estos proporcionan componentes conductores en solución como los iones de sodio (Huerta *et al.* 2008).

La presencia de amoníaco y sulfatos (NH_3 y SO_4) en lixiviados, producto de procesos de compostaje con exceso de humedad, pueden producir ácido sulfhídrico y dióxido de nitrógeno (H_2S y NO_2), gases considerados de efecto invernadero, lo cual es perjudicial para el ambiente (Román *et al.* 2013).

Para evitar la contaminación del suelo y la infiltración del lixiviado, se deben colocar superficies impermeables, coberturas y sistemas de colección. La recolección de los lixiviados en las pilas de compost, suele hacerse mediante tuberías que concentran los líquidos generados en un único punto de almacenamiento, como se presenta en la Figura 7.

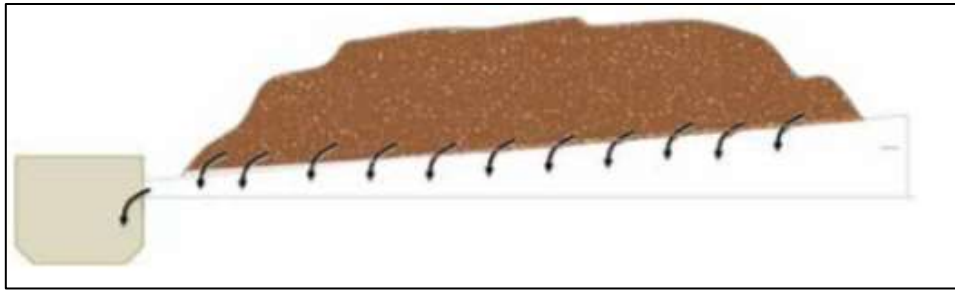


Figura 7: Generación de lixiviado en pilas de compostaje

FUENTE: Román *et al.* (2013)

Para dar solución a la problemática del aumento de la producción de residuos, se espera el aumento de plantas de compostaje, por lo que también se hará necesario el tratamiento de mayores volúmenes de lixiviado de compostaje. Sin embargo, la información existente en el tema aún es limitada. En el periodo comprendido entre los años 2011 y 2015 solo existieron 32 publicaciones científicas relacionadas al lixiviado de compostaje en las bases de datos: Google Scholar y Scopus (Roy *et al.* 2018).

2.3.1 Producción de lixiviados en compostaje

La producción de lixiviado en compostaje está relacionada con el tipo de compostaje realizado, el manejo, el tipo de residuos utilizados y las condiciones climatológicas. En algunos casos, en donde se realizó compostaje con residuos municipales, se han generado aproximadamente de 75 a 100 litros por tonelada de residuos. Dependiendo de la capacidad del relleno sanitario o planta de compostaje y de la cantidad de materia orgánica procesada, se ha identificado una producción de entre 4 y 400 m³ al día de lixiviados de compostaje (Roy *et al.* 2018).

En la planta de compostaje Torrelles de Llobregat en Barcelona – España, se realizaron caracterizaciones de las cantidades de lixiviado producidas y de los efectos de su uso al regar el material en el proceso de compostaje. Como resultado se identificó que, bajo condiciones de una humedad ambiental elevada y una fracción orgánica con alto porcentaje de humedad, se generaban 37 litros de lixiviado por tonelada de mezcla con

una proporción de fracción orgánica de residuos municipales a restos vegetales de 3 a 1 (Huerta *et al.* 2008).

Losada (2009) evaluó la producción de lixiviado generado en el compostaje de los residuos de dos mercados en el departamento de Huila en Colombia. En el compostaje producido con una mezcla de los residuos orgánicos identificó que se generaban 13.5 litros de lixiviado por cada 110 litros de residuos sólidos utilizados.

2.3.2. Caracterización de lixiviados de compostaje

El lixiviado de compostaje tiene grandes cantidades de materia orgánica, por el rompimiento de complejos orgánicos en sustancias simples, debido a la acción de diversos microorganismos en condiciones aerobias. Dichos microorganismos utilizan la materia orgánica disuelta disponible y producen enzimas que reaccionan con la materia orgánica para la liberación de moléculas solubles que están fácilmente disponibles. Los tres procesos que determinan la transferencia de masa a la fase líquida en el proceso de compostaje son la hidrólisis por reacciones enzimáticas, la solubilización de moléculas orgánicas e inorgánicas y el arrastre de material particulado (Roy *et al.* 2018).

En la Tabla 7 se presenta una compilación de caracterizaciones de lixiviado de compostaje.

Tabla 7: Caracterización de diversos lixiviados de compostaje

Autor	DQO (gO ² /l)	DBO ₅ (gO ² /l)	Relación DBO/DQO	TKN (mg N/l)	NH ₄ (mg N-NH ₄ /l)	TP (mg/l)	PO ₄ (mg P-PO ₄ /l)
Laitinen <i>et al.</i> (2006)	1.97 - 2.43	1.0 - 1.6	-	160 - 320	160 - 320	120 - 300	1.4 - 5.6
Trujillo <i>et al.</i> (2006)	169 - 185	85 - 89	0.49	-	-	-	-
Zazouli and Yousefi (2008)	25.8 - 45.5	-	-	-	-	-	-

<<Continuación>>

Zhang <i>et al.</i> (2007)	0.44 - 0.48	-	-	43.6 - 49.2	43.6 - 49.2	36 - 43	-
Maleki <i>et al.</i> (2009)	22.3 - 45	-	-	-	-	-	-
Mokhtarani <i>et al.</i> (2012)	51- 109	23 - 55	0.42 - 0.53	467 - 1860	467 - 1860	258 - 1290	-
Elyasi, Amani <i>et al.</i> (2015)	23 - 40	-	-	-	-	-	-
Bakhshoodeh <i>et al.</i> 2017)	102.8 - 107.9	67.0 - 71.6	-	5820 - 6660	16660 - 6660	275 - 360	-
Liu <i>et al.</i> (2010)	51.2 -71.3	26.2 - 30.4	-	1418 - 2967	2967 - 2967	231 - 796	-
Tabatabaei <i>et al.</i> (2012)	100	-	-	-	-	-	-
Liu <i>et al.</i> (2015)	55.7	-	-	10056	10056	-	-

FUENTE: Roy *et al.* (2018)

Pichtel (2014) identificó una elevada DBO₅ en los lixiviados liberados de las pilas de compostaje, a causa de los procesos de disolución y descomposición de los residuos orgánicos. También reportó la generación de nitratos en la medida que el compostaje incluya restos de poda de césped y hojas. Adicionalmente dependiendo del manejo del compostaje, los lixiviados pueden contener compuestos sintéticos potencialmente tóxicos como pesticidas, compuestos organoclorados, productos de la combustión de gasolina, entre otros. En la Tabla 8 se presenta el promedio de valores de la caracterización de lixiviados de compostaje en la planta de compostaje de Croton Point - Nueva York – EUA.

Tabla 8: Caracterización de lixiviados de compostaje en Croton Point

Parámetro	Promedio (mg/l)	Desviación estándar(mg/l)
CD	ND	
Cu	ND	
Ni	ND	
Cr	ND	
Zn	0.11	0.13
Al	0.33	0.38
Fe	0.57	0.78
Plomo	0.01	0.02

<<Continuación>>

K	2.7	0.99
NH4-N	0.44	0.35
NO3-N	0.96	1
NO2-N	0.02	0.02
Fosforo	0.07	0.08
Fenoles (total)	0.18	0.45
DQO	56.33	371.22
DBO	>41	>60
pH	7.75	0.36

FUENTE: Adaptado de Pichtel (2014)

2.3.3. MANEJO Y TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE COMPOSTAJE

Las tres principales maneras de realizar el manejo de los lixiviados de compostaje son la reducción del lixiviado y el tratamiento físico químico o biológico:

a. Reducción de lixiviados de compostaje

Las características de las pilas de compostaje pueden influir en la generación de lixiviado. Para reducir la cantidad de lixiviado en composteras sin cobertura en una zona de alta precipitación, las pilas deberán estar dispuestas de forma paralela a la pendiente (Figura 8), para permitir que la escorrentía de lluvia se mueva entre las pilas y no a través de ellas. Pilas con la parte superior con forma plana o cóncava retendrán mayor cantidad de agua, mientras que las de forma convexa o en punta retendrán menor cantidad de agua. De la misma forma pendientes poco pronunciadas por ejemplo entre 1% y 2%, previenen flujos significativos de lixiviado de las pilas de compostaje (Government of British Columbia 2016).

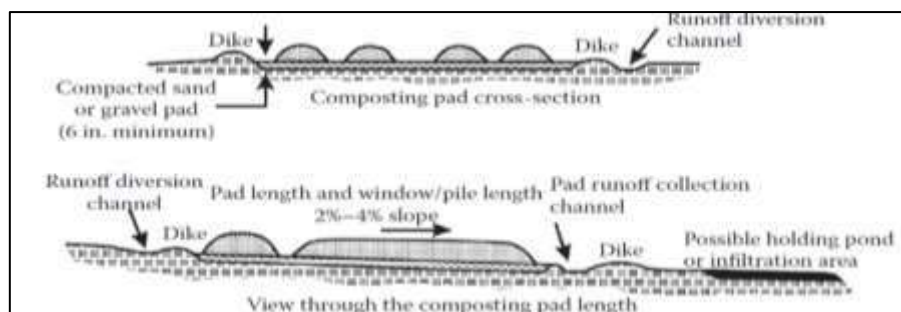


Figura 8: Manejo de lixiviado en pilas de compostaje

FUENTE: Pichtel (2014)

b. Tratamiento biológico

Existen experiencias positivas de tratamiento biológico de lixiviados. Entre las principales tecnologías aplicadas en este tipo de tratamiento se tienen los Biofiltros, en donde el lixiviado de compostaje pasa a través de diferentes sustratos, los que sirven para el crecimiento de la comunidad microbiana responsable de gran parte del tratamiento. Experiencias de estas unidades registran eficiencias máximas de 96% para afluentes con 0.15 y 4.5 g/l de DBO₅. Existen experiencias en el manejo de lixiviado de compostaje a través de reactores anaerobios simples, reactor anaerobio baffle y reactores anaerobios batch en secuencia; dependiendo de la configuración y carga orgánica del afluente se han registrado eficiencias de entre 89% y 99.4% (Roy *et al.* 2018).

c. Tratamiento físico – químico

A través de la floculación y coagulación, con el uso de diferentes coagulantes como: sulfato ferroso, cloruro férrico, cloruro de polialuminio, para la remoción principalmente de DQO y STS, se tienen eficiencias promedio de entre 49% y 51%. También existen experiencias de electro-coagulación/flotación, la que consiste en la aplicación de energía continua en el lixiviado de compostaje y la disolución de electrodos metálicos, además del proceso de flotación (aireación) para la remoción, que a nivel laboratorio encontraron una eficiencia de 96% de remoción de DQO y 99% de STS (Roy *et al.* 2018).

2.4. HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los humedales construidos (Figura 9) son sistemas de ingeniería que buscan maximizar los procesos de tratamiento de aguas residuales que se realizan naturalmente en el medio ambiente. En comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales, destaca en los humedales construidos sus bajas necesidades de operación y mantenimiento, altas eficiencias, resiliencia ante cambios en los afluentes y su capacidad de realizar tratamiento primario, secundario o terciario (Dotro *et al.* 2017).

Los humedales construidos tienen una ventaja en costo-eficiencia en comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales, debido no solo a sus bajos costos de

construcción, operación y mantenimiento sino también a las bajas necesidades energéticas (en algunos casos inexistentes) y la capacidad del reúso de los efluentes. A esta ventaja se le suma la capacidad de los humedales de proveer un hábitat para diferentes organismos y su capacidad de ser introducidos armoniosamente al paisaje (Kadlec *et al.* 2000).

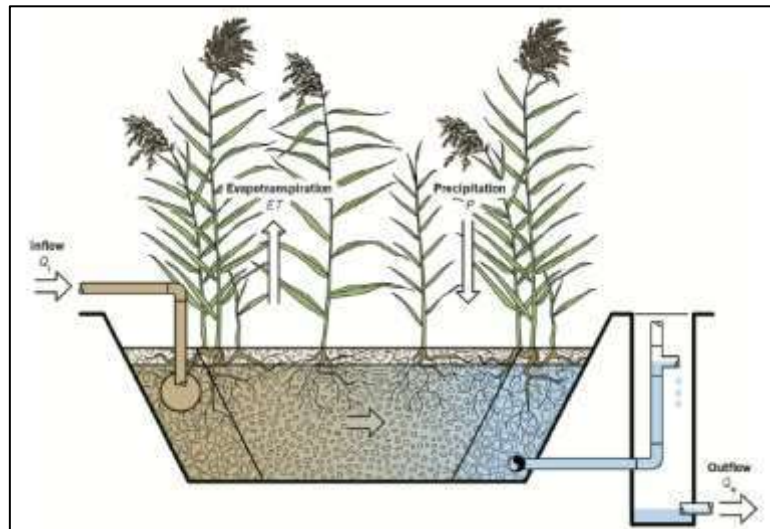


Figura 9: Humedal construido y su balance hídrico

FUENTE: Dotro *et al.* (2017)

Según Hoffman *et al.* (2011) el rango de aplicaciones de los humedales para el tratamiento de efluentes incluye a las aguas domésticas, aguas residuales municipales, efluentes de tratamiento secundario, aguas industriales, aguas pluviales, aguas de escorrentía superficial agrícola, aguas de ríos y lagos contaminados.

Los principales componentes de esta tecnología son sustrato, vegetación y microorganismos. El sustrato es el medio de soporte para el crecimiento de plantas y microorganismos. Dependiendo del tipo de humedal puede estar formado por arena, grava, sedimentos y restos de vegetación (provenientes de la vegetación) que se acumulan en la superficie. La vegetación contribuye de diversas formas al funcionamiento del humedal: al tomar carbono, nutrientes y elementos traza en las aguas para incorporarlos en sus tejidos, transferencia de gases, entre otros. En las raíces y rizomas de las plantas se realiza la transferencia de oxígeno desde la atmósfera hasta sustrato, creando zonas aerobias en

donde los microorganismos participan en los procesos de tratamiento. Los microorganismos tienen la función de transformar gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles, además de consumir mucho del carbono y nutrientes provenientes de las aguas residuales que ingresan al humedal (Delgadillo *et al.* 2010).

2.4.1. Sistema Francés

El Sistema Francés (Figura 10) es una variación de los humedales construidos de tipo vertical. Fueron desarrollados en Francia hace aproximadamente dos décadas por el instituto por la Agricultura y la Ingeniería Ambiental de Francia “CEMAGREF” (actual IRSTEA). La principal característica de este humedal construido es la ausencia de un tratamiento previo al uso del Sistema Francés, por lo que este es alimentado con aguas residuales de manera directa. Por lo general están compuestos de dos etapas, la primera conformada por tres unidades y la segunda por dos unidades. Las etapas se diferencian por los sustratos que lo conforman y por la forma como se introducen a estas los afluentes (Stefanakis *et al.* 2014).

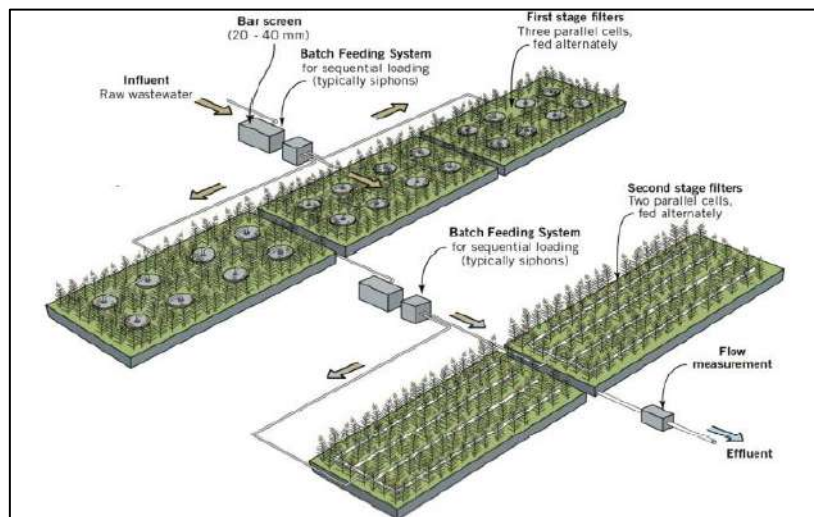


Figura 10: Esquema de humedal construido de sistema francés

FUENTE: Dotro *et al.* (2017)

El vertimiento de aguas residuales se realiza a través de ciclos de alimentación y descanso. En la primera etapa la alimentación se realiza por lo general durante 3.5 días para luego

tener un descanso de aproximadamente 7 días. En la segunda etapa los efluentes de la primera etapa ingresan a la segunda etapa, durante aproximadamente 3.5 días teniendo un tiempo de descanso de 3.5 días. El riego alternado entre unidades del Sistema Francés es fundamental para controlar el crecimiento de biomasa en la superficie de la unidad, mantiene las condiciones aerobias en el filtro y permite la mineralización de la materia orgánica acumulada en la superficie del humedal. Para mantener las condiciones aerobias en el filtro es importante también generar una oxigenación en el fondo del filtro, la que se logra a través de acondicionar la tubería de colección en el fondo del humedal de forma que permita el ingreso de aire al momento que el agua residual tratada es colectada (Dotro *et al.* 2017).

Stefanakis *et al.* (2014) reportan eficiencias del Sistema Francés de 82% para DQO, 53.7% para NTK. Molle *et al.* (2005) indican que este sistema tiene eficiencias para tratamiento de aguas residual de 90% para DQO y 95% para solidos suspendidos.

Wojciechowska (2017) llevó a cabo un estudio de tratamiento de lixiviado de relleno sanitario diluido con humedales verticales dispuestos en dos etapas, muy similar al Sistema Francés con la diferencia que llevaba un sustrato de mayor tamaño. Los efluentes la segunda etapa de los humedales verticales son tratados en un humedal horizontal como se muestra en la Figura 11.

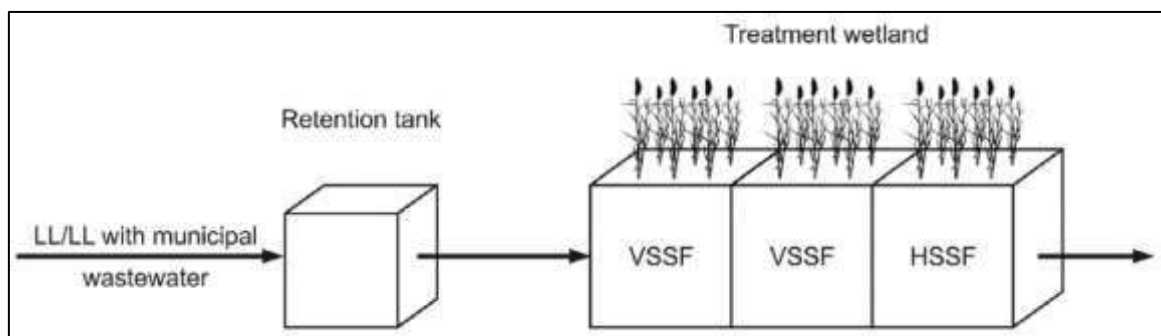


Figura 11: Humedales verticales y horizontal para el tratamiento de lixiviado diluido de relleno sanitario

FUENTE: Wojciechowska (2017)

El piloto tuvo tres periodos de evaluación en donde la carga hidráulica fue de 12, 8.5 y 12 mm/d. A lo largo de la evaluación se realizó la dilución del lixiviado con agua residual doméstica en proporciones de lixiviado a aguas residuales domesticas que van desde 10:1 a 40:1. Las cargas de DQO aplicadas y sus desviaciones estándar fueron de 20.1 ± 1.9 , 15.6 ± 2.7 y 2.0 ± 3.0 gO₂/m²·d. Obteniendo una eficiencia de todo el sistema entre 88% y 95% para DBO₅ y entre 47.8% y 86.6% para DQO (Wojciechowska 2017).

2.5. HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE COMPOSTAJE

A pesar de que los humedales construidos son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales, cada vez existen más aplicaciones de esta tecnología en el tratamiento de aguas residuales de procesos industriales, agricultura, agro-industria, lixiviados de rellenos sanitarios, entre otros. Los efluentes de estas actividades suelen caracterizarse por tener altas cargas orgánicas además de por su variabilidad de caudal y calidad a lo largo del año. (Akratos *et al.* 2015)

Para el caso de los lixiviados de las trincheras de los rellenos sanitarios, los que son similares a los lixiviados de compostaje, Kadlec *et al.* (2000) indican que los humedales construidos tienen muchas ventajas como solución tecnológica en la medida que ofrecen un tratamiento sostenible con bajos costos de operación y mantenimiento, lo cual es especialmente importante en el manejo de lixiviados de rellenos sanitarios ya que son procesos que por lo general requieren sistemas de tratamiento con tiempos de vida indefinidos.

2.5.1. Pretratamiento de lixiviados de compostaje

Kadlec *et al.* (2000) identifican que lixiviados en rellenos sanitarios pueden contener cargas orgánicas tan altas que resultan dañinas para los organismos del humedal. Por lo que establece dos métodos para controlar dichas cargas orgánicas:

- Disolución con agua residual o un efluente reciclado de alguna etapa del sistema.
- Aislamiento de sedimentos con altas cargas orgánicas en el fondo del humedal evitando el contacto con los organismos del humedal. Esto se puede lograr a través de humedales superficiales con aglomerados flotantes o de forma general aumentando la profundidad de los humedales.

Para efluentes provenientes de procesos agro-industriales, con características similares al lixiviado de compost, existen diversas experiencias en la implementación de una etapa previa al tratamiento con humedales construidos, debido al riesgo que existe por la excesiva carga orgánica y de sólidos suspendidos. Para el tratamiento previo a humedales de flujo vertical las tecnologías aplicadas exitosamente fueron la dilución, filtro biológico o la oxidación electroquímica. Mientras que previo al uso de humedales subsuperficiales de flujo horizontal se ha aplicado un tratamiento biológico, lagunas de estabilización, tanques de sedimentación, coagulación o dilución dependiendo de la procedencia de los afluentes (Akratos *et al.* 2015).

En experiencias de tratamiento de lixiviado con humedales construidos se ha demostrado que la dilución previa al tratamiento permitió el desarrollo normal de los humedales. Bakhshoodeh *et al.* (2017) llevaron a cabo la dilución de lixiviados en una proporción 1:10 (lixiviado de compostaje a agua potable) y Vázquez *et al.* (2013) realizaron una dilución con una proporción de entre 1:2 a 1:5 (lixiviado a recirculación de efluentes).

2.5.2. Experiencias de tratamiento de lixiviado de compostaje con humedales construidos

Vázquez *et al.* (2013) realizaron el tratamiento de lixiviado de compostaje en una granja de cerdos. El tratamiento se llevó a cabo con un humedal vertical, previo al cual se realizó la dilución de los lixiviados. Como resultado del tratamiento se redujo la DBO₅ de 1382 mg/l a 6.7 mg/l (eficiencia de 99%), la DQO se redujo de 10640 mg/l a 626 mg/l (eficiencia de 94.1%), los sólidos suspendidos totales disminuyeron de 2549 mg/l a 116 mg/l (eficiencia de 95.5%) y la conductividad eléctrica disminuyó de 7.07 mS/cm a 1.67 mS/cm.

Bakhshoodeh *et al.* (2017) llevaron a cabo el tratamiento de lixiviados provenientes de la planta de compostaje de Isfahan, ubicada en la zona central de Irán. Para el tratamiento se utilizó un humedal piloto de tipo subsuperficial horizontal con Vetiver, previo al cual se realizó una dilución 1:10. Logró una reducción promedio de DBO₅ de 12 268 mg/l a 3136 mg/l (eficiencia de 74.5%), una reducción de DQO promedio de 16 366 mg/l a 7572 mg/l (eficiencia de 53.7%), una reducción de conductividad eléctrica de 6.8 ds m⁻¹ a 5.62 ds m⁻¹. Las eficiencias de remoción podrían haberse visto influenciadas por la alta evapotranspiración en el periodo de funcionamiento del humedal.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Ubicación geográfica

La investigación se realizó en el relleno sanitario de Chacán – Anta, ubicado en el distrito de Anta, provincia de Anta, departamento de Cusco (Figura 12). El piloto de tratamiento fue instalado en la zona de compostaje del relleno sanitario de Anta. En la Tabla 9 se presenta la ubicación en coordenadas UTM del relleno sanitario.

Tabla 9: Ubicación del relleno sanitario de Chacán - Anta

Sistema de coordenadas	Coordenada Este	Coordenada Norte	Zona
UTM WGS84	808612.29 m E	8512944.82 m S	18 S

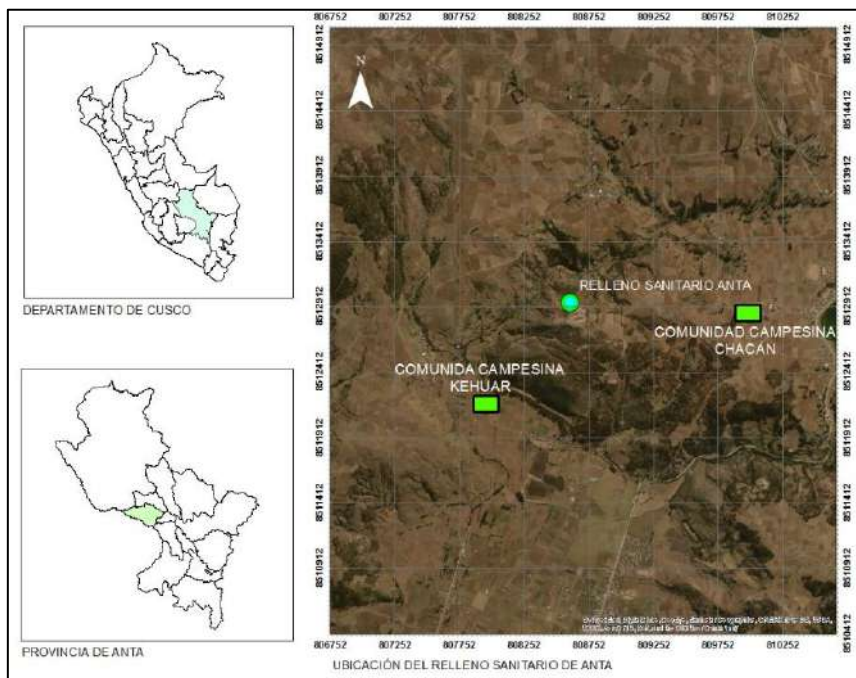


Figura 12: Mapa de ubicación del relleno sanitario de Anta

3.1.2. Topografía y características del suelo

La topografía en el área del relleno sanitario de Anta tiene pendientes menores a 5%. El tipo de suelo predominante es el suelo franco arcilloso. Según la zonificación ecológica económica de Cusco elaborada en 2009, está ubicado en tierras para la producción forestal. En las zonas aledañas existe la presencia de cárcavas, como consecuencia de los procesos de erosión (Municipalidad Provincial de Anta 2009).

3.1.3. Características climatológicas

Los datos climatológicos son importantes en la medida que influyen en el proceso de compostaje y los caudales de lixiviados generados en las pilas de compost. La precipitación en la provincia de Anta es estacional, con fuertes lluvias entre los meses de octubre y abril. También existe variabilidad interanual, con una marcada diferencia entre meses que normalmente deberían tener altas precipitaciones. Esto puede apreciarse en la información de la Tabla 10 basada en la estación climatología “Anta-Ancachuro” ubicada a 8.3 km del relleno sanitario de Anta.

Tabla 10: Precipitación en estación “Anta – Ancachuro” en el periodo 2010-2016

Año/ mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	289.0	194.2	148.5	26.4	1.2	5.2	3.4	3.5	12.1	89.6	54.7	184.9
2011	139.5	269.3	214.8	78.9	13.6	10.3	11.0	16.6	52.2	89.4	72.8	152.5
2012	136.3	177.8	110.6	47.5	1.8	2.8	8.1	0.0	45.1	26.8	135.3	197.7
2013	161.6	151.1	75.6	7.0	1.9	6.1	1.0	18.3	3.2	104.5	110.3	158.0
2014	134.5	123.5	71.1	46.3	8.9	0.0	0.0	1.3	11.5	62.9	37.6	160.8
2015	180.9	101.4	81.5	79.2	2.9	2.3	6.2	7.2	31.5	50.9	75.4	110.0
2016	140.9	240.1	70.9	25.0	7.3	0.3	3.0	17.7	18.2	71.6	85.6	101.3
Prome- dio	169.0	179.6	110.4	44.3	5.4	3.9	4.7	9.2	24.8	70.8	81.7	152.2
Máximo	289.0	269.3	214.8	79.2	13.6	10.3	11.0	18.3	52.2	104.5	135.3	197.7
Mínimo	134.5	101.4	70.9	7.0	1.2	0.0	0.0	0.0	3.2	26.8	37.6	101.3

FUENTE: Rocca (2018)

Según Rocca (2018) la temperatura media mensual varió entre 9°C y 13.1°C entre los años de 2004 y 2016. Siendo la mínima reportada de 7°C y la máxima de 14°C. En la Figura 13 se presentan las temperaturas mínimas, máximas y promedio.

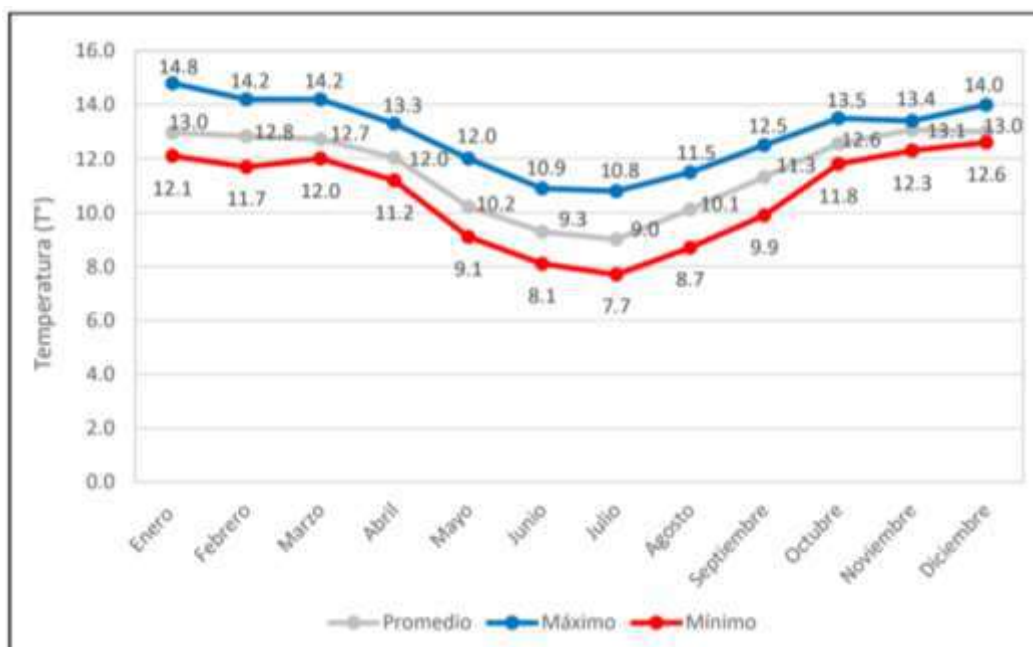


Figura 13: Temperatura en estación “Anta – Ancachuro” en el periodo 2010-2016
FUENTE: Rocca (2018)

3.2. METODOLOGÍA

3.2.1. Diagnóstico del manejo de la fracción orgánica en el relleno sanitario de Anta

Se estimó la cantidad de fracción orgánica que ingresa al relleno sanitario y el porcentaje de esta que es transformado en compost. Así mismo, se caracterizó la composición de la fracción orgánica.

Se reconoció que el proceso de compostaje se realizaba en ocho composteras de concreto (Figura 14), las que tuvieron un largo de 16.0 m, ancho de 1.65 m, altura de 0.30 m y en un extremo del fondo contaron con un orificio para la recolección de lixiviados. A través de tubería PVC los lixiviados eran conducidos a una caja de almacenamiento de concreto de un metro cubico de capacidad (Figura 15). Esta caja no tiene ningún desfogue por lo

que en época de altas precipitaciones los lixiviados se rebalsaban infiltrándose en el suelo. Debido a la necesidad de disminuir la cantidad de fracción orgánica que ingresaba a la trinchera del relleno sanitario, los operadores adicionaron seis pilas de compost, que no contaron con recolección de lixiviados.



Figura 14: Composteras de concreto en el relleno sanitario de Anta

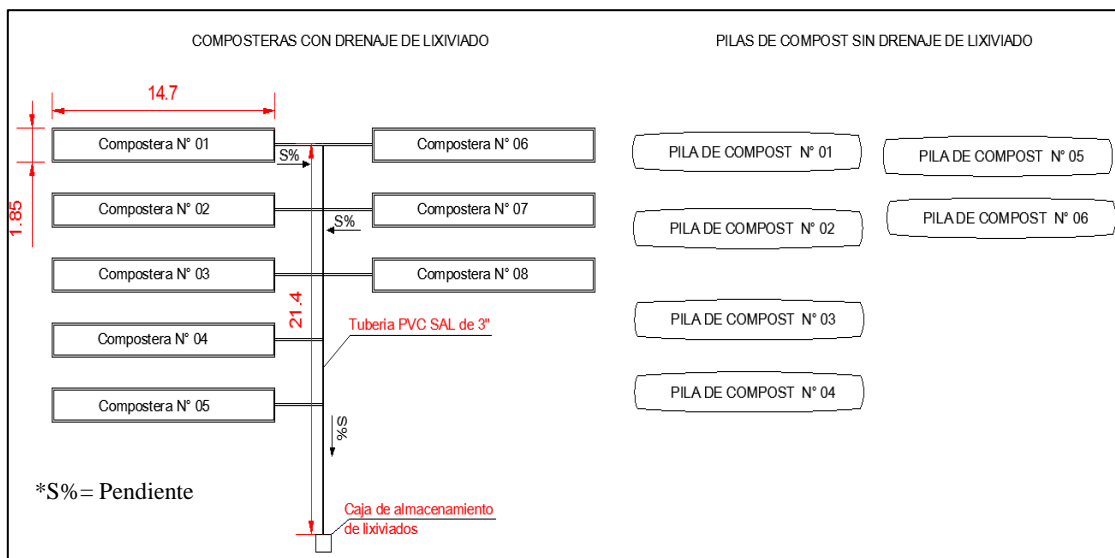


Figura 15: Esquema de composteras en relleno sanitario de Anta

3.2.2. Caracterización inicial de los lixiviados del compostaje en el relleno sanitario de Anta

a. Cuantificación de caudal de lixiviados de compostaje

Para el cálculo de caudal se utilizó el método volumétrico. Cuando era posible se utilizó la misma caja de concreto de almacenamiento de lixiviados de compostaje como se muestra en la Figura 16. Cuando los lixiviados se rebalsaban se tuvo que utilizar un recipiente de volumen conocido conectado a la caja de almacenamiento. El valor de volumen se dividió entre el tiempo requerido para llenar el recipiente. El resultado fue el caudal en litros/hora. Se realizaron seis repeticiones en un lapso de tres meses.

El caudal obtenido representó solo la producción de las 8 composteras con recolección de lixiviado, al existir seis composteras que no tenían recolección de lixiviados, se esperaba que el caudal real sea mayor.



Figura 16: Medición del volumen de lixiviado de compostaje en la caja de almacenamiento del relleno sanitario de Chacán – Anta.

b. Calidad de los lixiviados del compostaje

Al inicio de la operación del relleno sanitario en 2016, se realizó un muestreo puntual en la caja de almacenamiento de lixiviados de compostaje para descartar la presencia de metales pesados en los lixiviados. Los procesos analíticos se realizaron en el laboratorio AGQ en la ciudad de Lima, los resultados obtenidos son presentados en el Anexo 3.

Para tener una referencia de la calidad de los lixiviados en el diseño del piloto de tratamiento, se realizaron muestreos puntuales en la caja de almacenamiento de lixiviado de compostaje, se hicieron un total de cuatro muestreos; en el primero se midieron los parámetros: DBO₅ (mg/l), DQO (mg/l), STS (mg/l) y coliformes fecales (NMP/100ml) como se muestra en la Tabla 11. En los siguientes tres muestreos solo se midió la DBO₅. Los procesos analíticos se realizaron en el laboratorio Louis Pasteur ubicado en la ciudad de Cusco.

Tabla 11: Análisis previos al diseño del piloto de tratamiento

Parámetros	Parámetros	Fecha de muestreo	Métodos de procesos analíticos
Muestreo 1	DBO ₅ , DQO, STS y coliformes fecales	03/05/2018	-DBO ₅ : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd (2017) -DQO: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 5220 C, 23rd (2017) -STS: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 2540 D, 23rd (2017) -Coliformes fecales: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 9221 E-1, 23rd (2017)
Muestreo 2	DBO ₅	13/09/2018	DBO ₅ : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd (2017)
Muestreo 3	DBO ₅	20/09/2018	DBO ₅ : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd (2017)
Muestreo 4	DBO ₅	27/09/2018	DBO ₅ : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd (2017)

3.2.3. Selección de macrófitas para los humedales construidos y dilución de lixiviados

Para poder diseñar el piloto de humedales construidos, fue necesario determinar si era necesario diluir los lixiviados y en qué cantidad. Esto debido a que las altas cargas orgánicas de los lixiviados pueden provocar la muerte de la vegetación. La macrófita escogida para los humedales construidos fue la *Schoenoplectus americanus* debido a que es una planta silvestre adaptada a las condiciones locales, crece en riachuelos y zonas húmedas del distrito Anta. Se colectó *Schoenoplectus americanus* de un humedal construido, ubicado en la Institución Educativa 50106 Haparquilla, como se muestra en el Anexo 1.

Para evaluar las necesidades de dilución en el riego de *Schoenoplectus americanus*, se realizó una prueba de cuatro semanas de duración, en donde se regó a esta especie con diferentes diluciones de lixiviado. Como se muestra en la Figura 17, se prepararon tres grupos de macetas las que fueron regadas con lixiviado puro (Grupo A), lixiviado diluido 1:2 (Grupo B) y lixiviado diluido 1:5 (Grupo C). Cada grupo estaba compuesto por tres macetas que contenían el mismo sustrato (grano menor a 2 mm), que sería usado en los humedales del piloto de tratamiento. A lo largo del periodo de evaluación de cuatro semanas se midió el número de hojas y tallos que presentaba cada maceta.

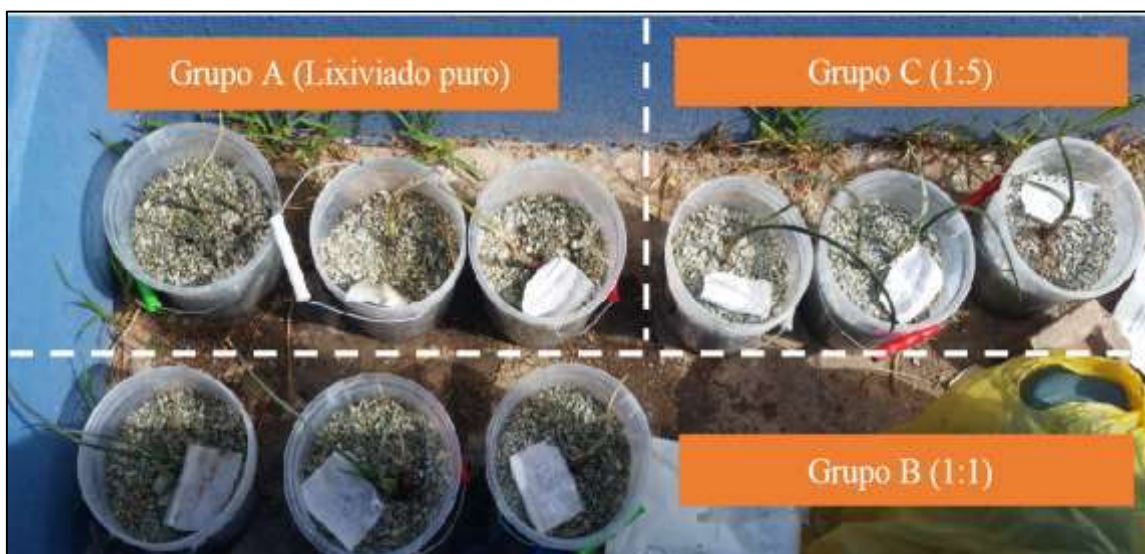


Figura 17: Prueba de dilución de lixiviado de compostaje

3.2.4. Diseño del sistema piloto de humedales construidos para el tratamiento de lixiviados de compostaje

a. Sistema Francés

Para el tratamiento de lixiviados se seleccionó el Sistema Francés basado en el modelo de Dotro *et al.* (2017). Este sistema tiene dos etapas de tratamiento en serie, la primera conformada por tres sub unidades y la segunda por dos sub unidades como se muestra en la Figura 10.

No existe un método empírico o modelo para el dimensionamiento de un Sistema Francés aplicado al tratamiento de lixiviado de compostaje. Por lo que se tomaron como referencia, rangos de carga orgánica superficial y eficiencias de remoción de carga orgánica como las presentadas por Wojciechowska (2017), para aproximar un dimensionamiento. En el Anexo 2 se detalla el proceso de dimensionamiento del Sistema Francés y humedal horizontal. En la Tabla 12 se presentan las principales consideraciones y características del diseño de la primera de esta tecnología.

Tabla 12: Principales características de la primera etapa del Sistema Francés

Parámetros	Unidad	Valor
Caudal de afluente	l/d	60
Vegetación	-	<i>Schoenoplectus americanus</i>
Número de sub unidades (celdas)	unid	3
Número de vertimientos de afluente por día	unid	3
Duración de cada vertimiento	segundos	60
Caudal en cada vertimiento	l/min	21
Ciclo de funcionamiento	-	7 días
Eficiencia esperada en remoción de DBO ₅	%	50
Concentración DBO ₅ de esperada en afluente	mg/l	600

La segunda etapa recibe los efluentes de la primera etapa del Sistema Francés; tiene las mismas capas de sustrato que la primera etapa, pero con diferentes

alturas. En la Tabla 13 se presentan las principales características de la segunda etapa.

Tabla 13: Principales características de la segunda etapa del Sistema Francés

Parámetros	Unidad	Valor
Caudal de afluente	l/d	60
Vegetación	-	<i>Schoenoplectus americanus</i>
Número de sub unidades (celdas)	unid	2
Número de vertimientos de afluente por día	unid	3
Duración de cada vertimiento	segundos	60
Caudal en cada vertimiento	l/min	21
Ciclo de funcionamiento	-	7 días
Eficiencia esperada en remoción de DBO ₅	%	50
Concentración DBO ₅ de esperada en afluente	mg/l	300

b. Diseño del humedal horizontal

Para el diseño del humedal horizontal se utilizaron los métodos de flujo pistón k-C* y enfoque P-k-C*. De los dos resultados obtenidos, se escogió el resultado de mayor área. En el Anexo 2 se detalla el proceso de dimensionamiento con ambos métodos. En la Tabla 14 se presentan las características consideradas para el dimensionamiento.

Tabla 14: Principales características del humedal horizontal

Parámetros	Unidad	Valor
Caudal de afluente	l/d	60
Vegetación	-	<i>Schoenoplectus americanus</i>
Número humedales	unid	1
Tipo de alimentación	-	Por gravedad y constante
Eficiencia esperada en remoción de DBO ₅	%	80
Concentración DBO ₅ de esperada en efluente	mg/l	35

3.2.5. Construcción del sistema piloto de humedales para el tratamiento de lixiviados de compostaje

a. Movimiento de tierras

Se realizó el movimiento de tierras para nivelar el terreno, para colocar las tuberías de conducción y construir los humedales. Este proceso se realizó de forma manual, removiendo un aproximado de 10.00 m³.

b. Preparación de los sustratos para los humedales

En función de los diseños se prepararon tres tipos de sustrato, los que son detallados en la Tabla 15. En la Figura 18 se presenta el resultado de la preparación del confitillo.

Tabla 15: Preparación de sustrato para humedales

Material	Preparación
Confitillo (grano alrededor de los 2 mm)	La arena fina en el confitillo representó aproximadamente el 35% del volumen, por lo que para retirarla se zarandeó el confitillo a través de una malla de menos de 2 mm de abertura. Posteriormente se realizó el lavado del material. Para la segunda etapa del Sistema Francés se utilizó un confitillo de grano de menor tamaño.
Piedra chancada de entre 3/8" y 1/2"	Este material tuvo poca cantidad de arena fina, para retirarla se realizó solo el lavado del sustrato.
Piedra chancada de 1"	La piedra chancada de 1" adquirida estuvo casi libre de arena fina, por lo que solo se tuvo que lavar el sustrato.



Figura 18: A la izquierda confitillo y a la derecha confitillo zarandeado y lavado

c. Construcción de un sistema de bombeo solar de lixiviados diluidos

Debido al bajo caudal del piloto, no se pudieron utilizar sifones para conducir los afluentes al Sistema Francés; por ello se construyó un sistema de bombeo fotovoltaico, el cual contó con cinco bombas de bajo caudal. Estas bombas recibieron energía de una batería de 35 amperios, la cual fue recargada a través de dos paneles solares de 0.30 m de ancho y 1.00 m de largo. En la Tabla 16 se detallan sus componentes.

Tabla 16: Descripción de componentes del sistema de bombeo de lixiviado

Componente	Cantidad (unidad)	Especificaciones	Función
Bombas de desagüe de lavadoras	5	Caudal aproximado de 20 litros/min, incluye válvula de limpieza y funciona con 220 V, potencia 35 W.	Bombeo de los lixiviados diluidos
Panel controlador de bombas	1	Controlador de las 5 bombas, programado con software	Prender y apagar las bombas según el software. Reporta el voltaje.
Software de control de bombas	1	Modificación de horarios de encendido y apagado de bombas	Almacenar información de bombas, días y horas de prendido y apagado en el panel controlador
Paneles solares	2	Largo: 1.0 m y ancho: 0.30 m	Recargar de energía eléctrica a la batería
Batería	1	DGP (modelo MF40B19FL)	Almacenar y proveer energía al panel controlador y a las bombas

d. Construcción del Sistema Francés

Para cada una de las sub unidades del Sistema Francés se instalaron tanques IBC a los que se les quitó la tapa superior. En la base de los tanques IBC se colocaron dos secciones de tubería PVC SAL de 2" de 1.00 m de largo con perforaciones de 8 mm cada 8 cm para la recogida de efluentes, como se muestra en la Figura 19. Una vez colocadas las tuberías dentro de las sub unidades, se conectaron las dos etapas del sistema y se colocaron los diferentes sustratos (Figura 20).

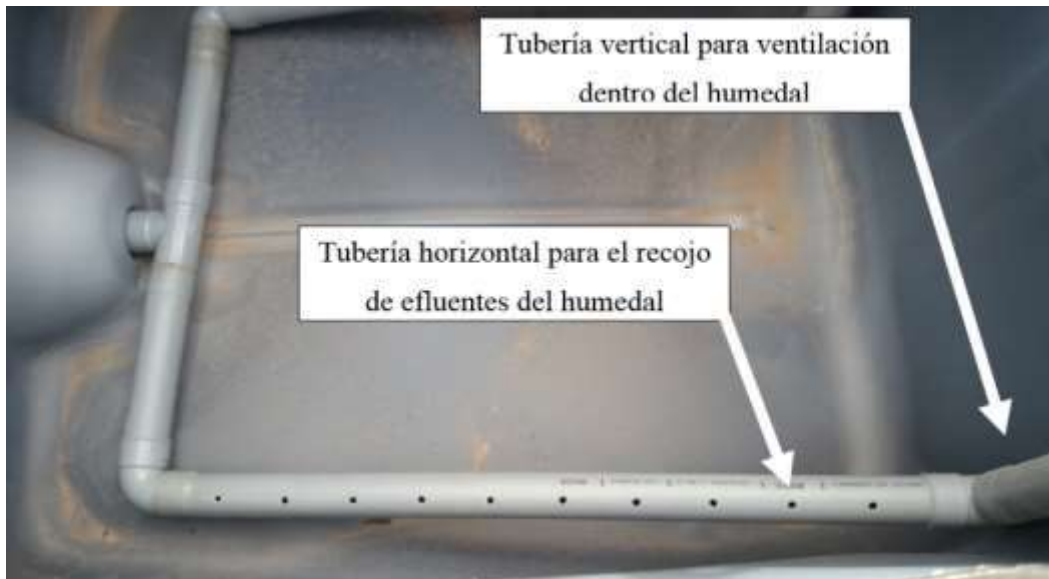


Figura 19: Tuberías de recojo de efluentes y ventilación en Sistema Francés

Se instalaron tres tanques IBC en paralelo para la primera etapa, los cuales se denominaron CF 1-1, CF 1-2 y CF 1-3. Para la segunda etapa se colocaron dos tanques IBC que se denominaron CF 1-2 y CF 2-2. A la salida de cada etapa del Sistema Francés se colocó un cilindro plástico de 80 litros de capacidad, para la recepción de efluentes. Este se conectó a la siguiente etapa a través de tuberías de PVC SAL de 2”.



Figura 20: Instalación de tuberías PVC SAL de 2” y sustrato

e. Construcción de humedal horizontal

Una vez realizado el movimiento de tierra, se inició la impermeabilización del humedal horizontal, para lo cual se utilizó geomembrana HDPE de 1.5 mm de espesor. Para el ingreso y salida del agua en el humedal horizontal se utilizó tubería PVC SAL de 2". Se procedió a la colocación de los sustratos, se utilizó confitillo zarandeado y lavado para al área activa del humedal y piedra chancada de 1" lavada para la protección de las tuberías de ingreso y salida del humedal.

3.2.6. Implementación del sistema piloto de humedales construidos

a. Adaptación de *Schoenoplectus americanus* y plantación en humedales

Se adaptaron las macrófitas para prevenir estrés en las plantas al ser sembradas en los humedales y recibir lixiviados con una alta carga orgánica. Para lo cual se seleccionaron *Schoenoplectus americanus* con una altura de alrededor de 20 cm, las que se regaron con lixiviado diluido. Inicialmente la dilución fue de 1:10, gradualmente se fue aumentando la cantidad de lixiviado hasta llegar a una dilución 1:5. Este proceso de adaptación tuvo una duración de 14 días.

b. Programación de bombes en software controlador de bombas

Para iniciar la operación del Sistema Francés se estableció la programación de las bombas de cada una de las sub unidades como se muestra en la Tabla 17, la cual fue introducida en un software de programación de bombes.

Tabla 17: Programación de bombes de Sistema Francés

Día	Bom -ba	Unidad de tratamiento	Vertimiento 1		Vertimiento 2		Vertimiento 3	
			Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Primera etapa de Sistema Francés								
Lunes	1	CF 1-1	07:00:00	07:01:00	15:00:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Martes	1	CF 1-1	07:00:00	07:01:00	15:00:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Miércoles	2	CF 1-2	07:00:00	07:01:00	15:00:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Jueves	2	CF 1-2	07:00:00	07:01:00	15:00:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00

<<Continuación>>

Viernes	3	CF 1-3	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Sábado	3	CF 1-3	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Domingo	3	CF 1-3	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Segunda etapa de Sistema Francés								
Lunes	4	CF 2-1	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Martes	4	CF 2-1	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Miércoles	4	CF 2-1	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Jueves	5	CF 2-2	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Viernes	5	CF 2-2	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Sábado	5	CF 2-2	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00
Domingo	5	CF 2-2	07:00:00	07:01:00	07:01:00	15:01:00	23:00:00	23:01:00

3.2.7. Evaluación del sistema piloto de humedales construidos

a. Desarrollo vegetativo de las macrófitas en los humedales

El objetivo de estas mediciones fue identificar si existía una respuesta positiva de las plantas del piloto al riego con lixiviado de compostaje en la concentración establecida. Para lo cual se realizó durante 10 semanas (a partir del inicio del funcionamiento del piloto) mediciones de las macrófitas. En cada sub unidad se midió el crecimiento de las plantas (cm), el número de tallos y número de hojas. Tanto en las dos etapas del Sistema Francés como en el humedal horizontal, se establecieron códigos para cada macrófita plantada, de forma que se pudiera llevar un control semanal. En la Figura 21 se presenta los puntos de medición y en la Tabla 18 el calendario de muestreos. De todas las mediciones realizadas se calculó un promedio para cada sub unidad del piloto.

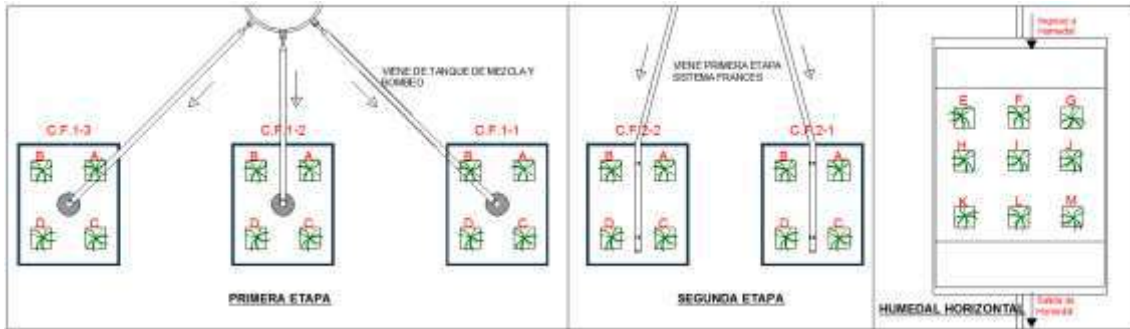


Figura 21: Esquema de puntos de medición de desarrollo vegetativo

Tabla 18: Calendario de medición del desarrollo vegetativo en el Sistema Francés y humedal horizontal

Semana de evaluación	Fecha	Crecimiento semanal (cm)	Número de hojas (unid)	Número de tallos (unid)
Semana 1	14/01/2019	Sistema Francés y humedal horizontal	Sistema Francés y humedal horizontal	Sistema Francés y humedal horizontal
Semana 2	21/01/2019			
Semana 3	28/01/2019			
Semana 4	04/02/2019			
Semana 5	11/02/2019			
Semana 6	18/02/2019			
Semana 7	25/02/2019			
Semana 8	04/03/2019			
Semana 9	11/03/2019			
Semana 10	18/03/2019			

b. Caracterización del afluente y de los efluentes del sistema piloto de tratamiento

Se tomaron muestras puntuales del lixiviado diluido (afluente al sistema) y de los efluentes de cada etapa del Sistema Francés y humedal horizontal, los puntos de muestreo están descritos en la Tabla 19. Para la selección de parámetros, debido a la ausencia de una normativa específica, se tomaron como referencia los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Doméstica o Municipales (PTAR). Los parámetros seleccionados son presentados en la Tabla 20. Los procesos analíticos se realizaron en el laboratorio Louis Pasteur ubicado en la ciudad de Cusco (Tabla 20). En un lapso de 10 semanas, entre febrero y abril de 2019, se realizaron un total de cinco muestreos para todos los puntos de muestreo y parámetros considerados.

Tabla 19: Puntos de muestreo y descripción

Código	Descripción
PM1	Tanque de almacenamiento de lixiviado diluido
PM2	Salida del tanque de almacenamiento de efluentes de primera etapa de Sistema Francés
PM3	Salida del tanque de almacenamiento de efluentes de segunda etapa de Sistema Francés
PM4	Salida del tanque de almacenamiento de efluentes de humedal horizontal.

Tabla 20: Parámetros evaluados en el sistema piloto

N°	Parámetros	Unidad	Métodos de referencia - procesos analíticos
1	DBO ₅	mg/l	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 5210 B, 22nd (2017)
2	DQO	mg/l	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 5220 C, 23rd (2017)
3	Sólidos totales en suspensión	mg/l	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 2540 D, 23rd (2017)
4	Coliformes fecales	NMP/100 ml	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 9221 E-1, 23rd (2017)
5	Conductividad eléctrica	uS/cm	Conductímetro en laboratorio
6	pH	Unidad	Medido en campo
7	Temperatura	°C	Medido en campo

c. Análisis estadístico de los resultados

Mediante el uso del Análisis de la Varianza (Analysis Of Variance, ANOVA) se realizó la comparación de los niveles de tratamiento entre sí, para determinar mediante el contraste de hipótesis si existían diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los grupos; para cada uno de los parámetros de muestreo. El análisis ANOVA solamente detecta la presencia o ausencia de un efecto global de la variable independiente sobre la variable dependiente, sin embargo, fue importante conocer en dónde se encontraban las diferencias estadísticamente significativas que detectó de forma global el ANOVA. Para analizar el patrón de diferencias entre las medias se ejecutó pruebas de hipótesis específicas y las utilizadas implican la comparación de pares de medias, también conocidas como ‘pruebas post hoc’, en el software SPSS. Para encontrar las diferencias posibles entre los pares de medias simples se ejecutó la prueba Tukey.

3.2.8. Propuesta de sistema de tratamiento para los lixiviados de compostaje del relleno sanitario de Anta

En función de los resultados obtenidos en el piloto de tratamiento, se propuso un sistema de humedales a escala real para el tratamiento de la totalidad de los lixiviados de compostaje producidos en el relleno sanitario de Anta. Para realizar la propuesta se analizaron las siguientes variables:

- Caudal de afluente esperado
- Área necesaria para la construcción de los humedales
- Calidad de efluentes esperados
- Necesidades de operación y mantenimiento
- Estimación de costos de implementación, operación y mantenimiento de la propuesta

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE COMPOSTAJE EN EL RELLENO SANITARIO DE ANTA

En el relleno sanitario de Anta se realiza el compostaje de parte de la fracción orgánica de los residuos sólidos que llegan provenientes del distrito de Anta; previo a lo cual se realiza una selección, donde se les retiran plásticos y metales para su reaprovechamiento. Parte de la fracción orgánica es segregada y procesada en pilas estáticas de compostaje al aire libre; este proceso tiene una duración de entre tres a cuatro meses y finaliza con el zarandeado y empaquetado del compost. Los lixiviados generados en el proceso de compostaje son eventualmente recirculados manualmente a las pilas de compost (Figura 22), sin embargo, en época de altas precipitaciones se genera un exceso de los lixiviados, los que se rebalsan e infiltran en el suelo como se muestra en la Figura 23.

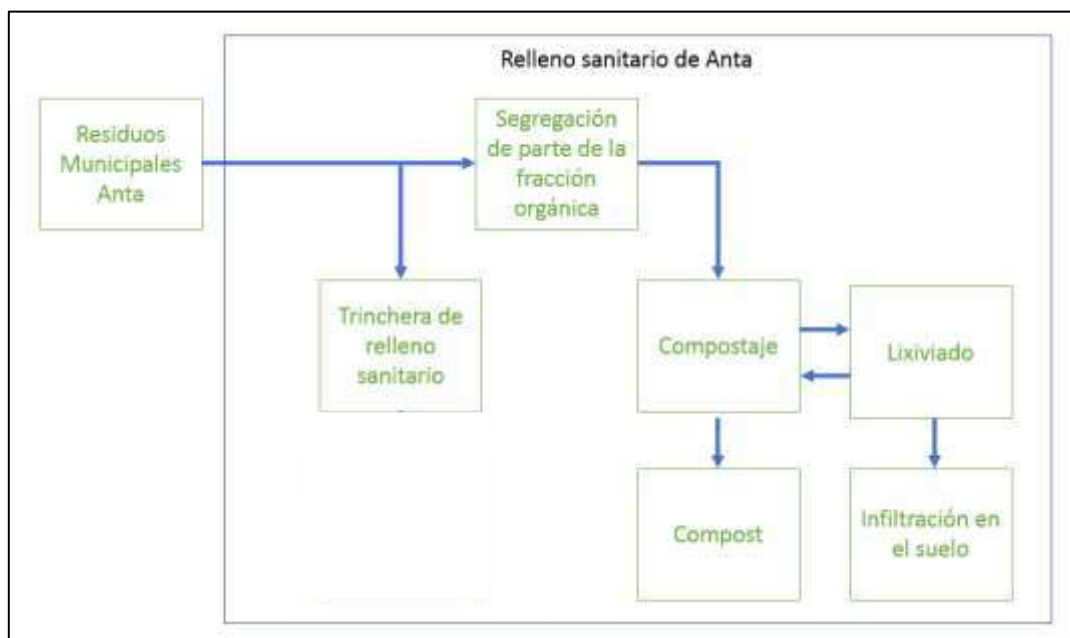


Figura 22: Esquema de manejo de fracción orgánica en el relleno sanitario de Anta



Figura 23: Lixiviado de compost rebalsándose de la caja de almacenamiento

En base a datos tomados de la Municipalidad Provincial de Anta (2015), se estimó que la cantidad de fracción orgánica que ingresa al relleno sanitario de Anta es de 4.924 toneladas/día. Existen un total 14 composteras, las cuales procesan aproximadamente 152.80 tn/año, lo que representa el 8.5% de la fracción orgánica que ingresa anualmente al relleno sanitario. El material con que se elaboraron las pilas de compostaje contuvo restos de verduras (37.5%), restos de frutas (23.8%), rastrojo (14.0%), excremento animal (10.1%), papel (5.0%) e impurezas como plásticos (4.2%) y gravas pequeñas (5.4%). La densidad del conjunto de componentes de la fracción orgánica es de 293.986 kg/m³, valor cercano al rango característico del material usado en compost según Román *et al.* (2013).

En los primeros meses del 2021, se identificó que, debido a problemas en la gestión del relleno sanitario de Anta, se dejó de cumplir con algunos procesos del compostaje como el volteo del material en las pilas. El compostaje al ser un proceso aerobio, debe tener una correcta aireación, la falta de volteo identificada se manifestó con la presencia de mayores cantidades de lixiviado en el fondo de algunas composteras, lo que podría haber generado un ambiente de anaerobiosis que está relacionado con la presencia de ácido sulfhídrico y metano en exceso. Adicionalmente, se evidenció la falta de control de temperatura en las pilas, lo cual es importante para corroborar que los procesos de higienización se hayan realizado correctamente, obteniendo al final un compost seguro de ser utilizado. De no ser corregidos los aspectos mencionados, el proceso no deberá ser considerado como compostaje.

4.2. CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS LIXIVIADOS GENERADOS EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE DEL RELLENO SANITARIO

4.2.1. Caudal de lixiviados producidos

Al no existir un registro de caudales del lixiviado de compostaje, se realizaron mediciones para estimar un caudal promedio. Los resultados fueron muy variables, ya que la producción de lixiviado depende en gran medida de la precipitación, el número de pilas de compostaje, el material utilizado en dichas pilas y la fase en que se encuentran. Para las 8 composteras con recolección de lixiviado analizadas, el promedio de caudal de lixiviado fue de alrededor 153.75 l/d en los meses de mayor precipitación. Sin embargo, estos podrían variar significativamente ante la presencia de grandes precipitaciones.

Al dividir los caudales promedio de lixiviado (litros/día) entre la cantidad de materia orgánica que es procesada en las composteras diariamente (tonelada/día), se obtuvo una producción de 650.6 litros/tonelada (época de lluvia). Estos valores son superiores a los reportados por Roy *et al.* (2018), quienes identifican para un compostaje con materia prima de residuos sólidos municipales, una producción promedio de 75 a 100 l/tn. Esta diferencia puede deberse a factores climáticos y a la falta de un correcto manejo del proceso de compostaje en el relleno sanitario de Anta.

4.2.2. Calidad de los lixiviados del compostaje

Al inicio del funcionamiento del relleno sanitario de Anta en el año 2016 se realizó un muestreo de los lixiviados del proceso de compostaje, en los resultados no se encontró la presencia de metales pesados, por lo que no se consideraron estos parámetros para el diseño y evaluaciones de la presente investigación. En abril de 2018 previo al diseño del piloto, se realizó un muestreo puntual en la caja de almacenamiento de lixiviado de compostaje, se obtuvo como resultado una DBO₅ de 1260.87 mg/l, DQO de 2552.92 mg/l, STS de 235 mg/l y coliformes fecales de 1.6×10^5 NMP/100 ml. Adicionalmente en septiembre de 2018 se realizaron tres muestreos de DBO₅ (uno por semana) en los que se obtuvo: 1762.84 mg/l, 4778.6 mg/l y 5636.17 mg/l. El promedio de los cuatro análisis de DBO₅ fue de 3359.62 mg/l con desviación estándar de 2171.83 mg/l.

4.3. SELECCIÓN DE MACRÓFITAS Y DILUCIÓN DE LIXIVIADOS

Se seleccionó *Schoenoplectus americanus* para su siembra en los humedales del piloto, con esta macrófita se realizó una prueba de respuesta al riego con tres concentraciones de lixiviado en un periodo de cuatro semanas. Como se muestra en la Tabla 21 y en la Figura 24, se identificó un desarrollo normal de las plantas con una dilución 1:5 (lixiviado a agua potable) o concentración de 16.67%, la que fue escogida para su aplicación en el piloto. Dicho valor de dilución similar al encontrado por Mojiri *et al.* (2016) quienes evaluaron el funcionamiento de humedales para el tratamiento de lixiviado de un relleno sanitario con DQO de 2301 mg/l; la relación óptima de dilución identificada por los autores fue de 1:4 (lixiviado a agua residual). Así mismo, la dilución seleccionada es similar a la reportada por Jinadasa *et al.* (2018), quienes evaluaron el funcionamiento de humedales subsuperficiales aplicados al tratamiento de lixiviados de relleno sanitario; los autores identificaron que la relación óptima de dilución fue de 25% (dilución 1:3 lixiviado a agua), con lo cual el lixiviado diluido tuvo una DBO₅ de 381 mg/l.

Tabla 21: Resultados de riego de *Schoenoplectus americanus* con lixiviado

Grupo	Dilución de lixiviado	Estado de macrófitas a la cuarta semana	Crecimiento
Grupo A	Lixiviado puro	Todas las macrófitas se secaron.	-
Grupo B	Lixiviado diluido 1:2	Dos de tres macrófitas tenían sus hojas y tallos secos.	-
Grupo C	Lixiviado diluido 1:5	Todas las macrófitas aumentaron el número de hojas y tallos.	6 cm (promedio de tallos)



Figura 24: Izquierda riego con lixiviado puro y derecha con lixiviado diluido 1:5

4.4. DISEÑO DEL SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADO DE COMPOSTAJE

Se diseñó un sistema piloto de humedales basado en la configuración de Dotro *et al.* (2017). Como resultado el piloto fue proyectado con dilución de lixiviados, un Sistema Francés de dos etapas y un humedal horizontal (Figura 25).

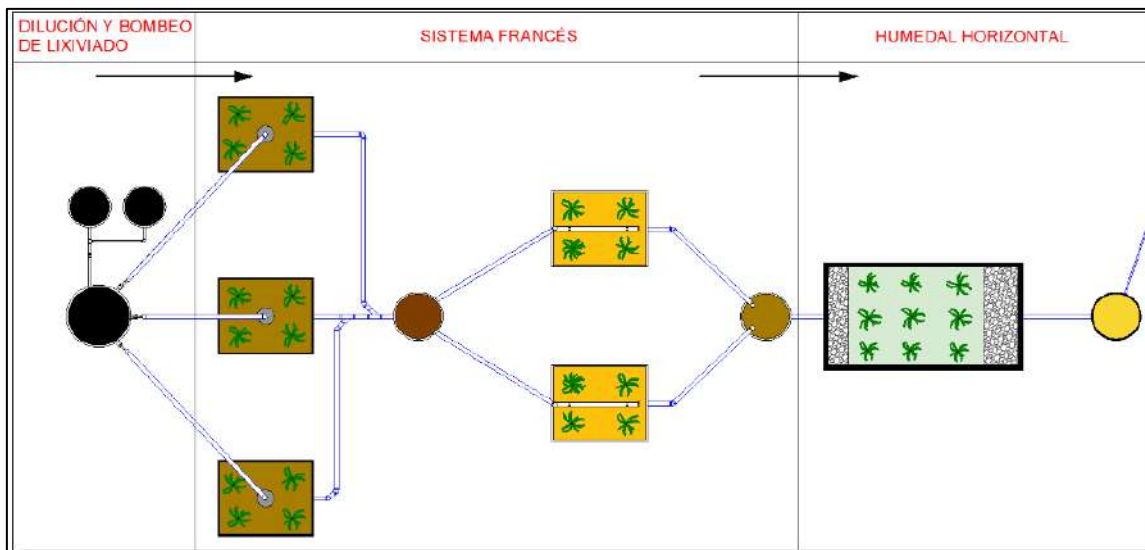


Figura 25: Esquema de piloto de humedales construidos

4.4.1. Diseño del sistema Francés

Se diseñó un piloto de Sistema Francés conformado por dos etapas, con un total de cinco sub unidades (Figura 26). Las dimensiones de las sub unidades son presentadas en la Tabla 22 y el detalle del dimensionamiento en el Anexo 2. El plano del piloto de Sistema Francés es presentado en el Anexo 7 con sus detalles técnicos.

Los sustratos de ambas etapas se seleccionaron en función a la composición típica de sustratos para Sistema Francés presentados por Dotro *et al.* (2017). El resultado es presentado en la Tabla 23 y la Figura 27.

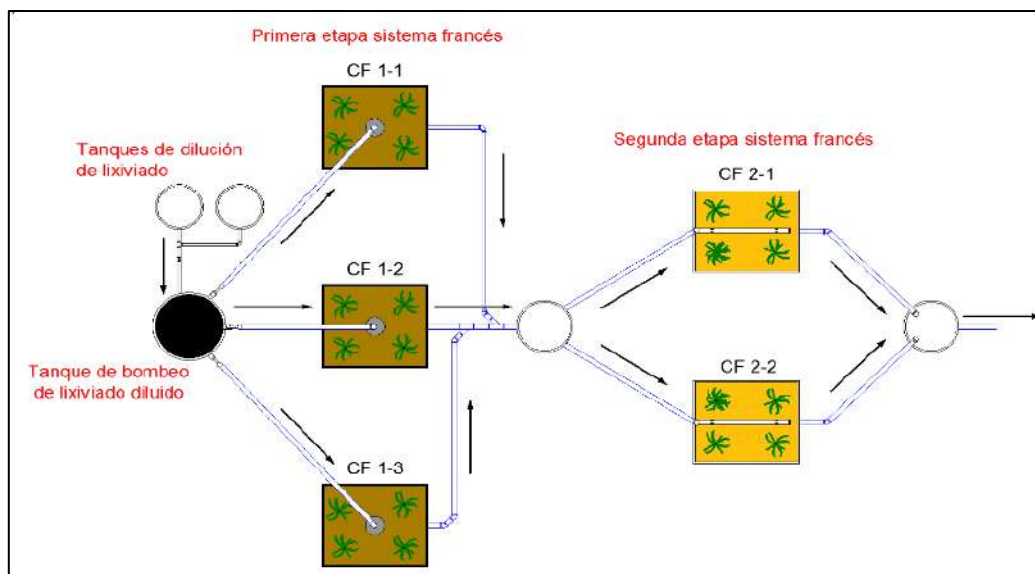


Figura 26: Esquema de piloto de Sistema Francés de dos etapas

Tabla 22: Dimensiones de las sub unidades del Sistema Francés

Parámetros	Unidad	Primera etapa	Segunda etapa
		Valor	Valor
Área	m ²	1.20	1.20
Largo interior	m	1.20	1.20
Ancho interior	m	1.00	1.00
Altura sustrato	m	0.60	0.86
Borde libre	m	0.52	0.26
Altura interior total	m	1.12	1.12
Angulo de las paredes	Grados °	90	90

Tabla 23: Características de capas de sustratos del Sistema Francés

Capa	Parámetro	Unidad	Primera etapa	Segunda etapa
Capa superior	Altura	m	0.30	0.46
	Sustrato Confitillo	-	Material de entre 2 y 6 mm, zarandeado, lavado y libre de arena fina.	Material con tamaño alrededor de los 2 mm, zarandeados, lavados y libres de arena fina.
Capa media	Altura	m	0.10	0.15
	Sustrato de transición	-	Grava de entre 3/8" a 1/2" (lavada y libre de arena fina)	Grava de entre 3/8" a 1/2" (lavada y libre de arena fina)
Capa inferior	Altura	m	0.20	0.25
	Grava de drenaje	-	Grava de 1" (lavada y libre de arena fina)	Grava de 1" (lavada y libre de arena fina)

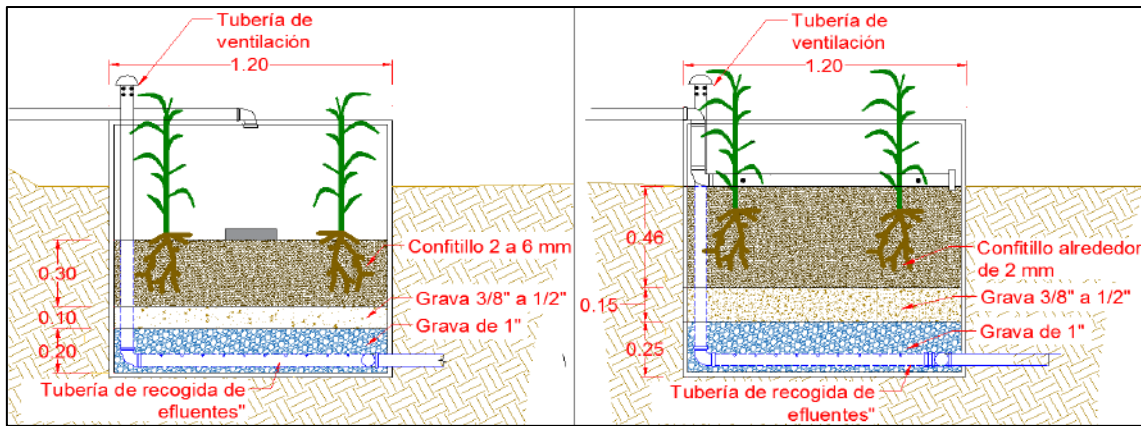


Figura 27: Sustratos en Sistema Francés: primera etapa (izquierda) y segunda etapa (derecha)

4.4.2. Diseño del humedal subsuperficial horizontal

Como resultado del diseño (detallado en el Anexo 2) se proyectó un humedal horizontal con un área de 2.23 m². En la Tabla 24 se presenta el resultado del dimensionamiento de esta unidad. El humedal horizontal fue proyectado con dos tipos de sustratos, el primero para la protección de las tuberías de ingreso y salida del humedal y el segundo para el tratamiento de los afluentes. En la Tabla 25 y en la Figura 28 se detallan los sustratos proyectados.

Tabla 24: Dimensiones de humedal horizontal

Parámetros	Unidad	Primera etapa
		Valor
Área	m ²	2.23
Largo de sustrato	m	1.72
Ancho	m	1.30
Altura sustrato	m	0.60
Borde libre	m	0.10
Altura total	m	0.70
Angulo de las paredes	grados °	60

Tabla 25: Características de los sustratos del humedal horizontal

Capa	Parámetro	Unidad	Valor
Sustrato de protección (ingreso)	Largo	m	0.34
	Tipo de sustrato	-	Grava de 1" (lavada y libre de arena fina)
Sustrato activo	Largo	m	1.7
	Tipo de sustrato	-	Confitillo (material de entre 2 y 6 mm, zarandeado, lavado y libre de arena fina)
Sustrato de protección (salida)	Largo	m	0.45
	Tipo de sustrato	-	Grava de 1" (lavada y libre de arena fina)

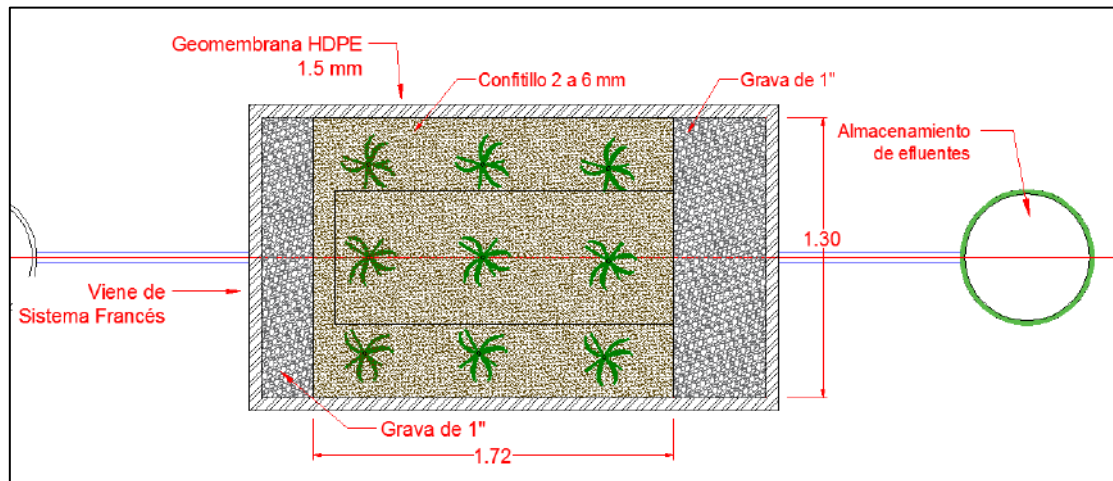


Figura 28: Vista de planta de humedal horizontal del piloto

4.5. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PILOTO

4.5.1. Bombeo de lixiviado al Sistema Francés

Para conducir el lixiviado a las sub unidades del Sistema Francés en diferentes horarios y de forma alternada, se construyó un sistema de bombeo solar programable. En la Figura 29 se presenta un esquema de su funcionamiento y en la Figura 30 se presentan las bombas (de la primera etapa) conectadas al tanque que almacena el lixiviado diluido.

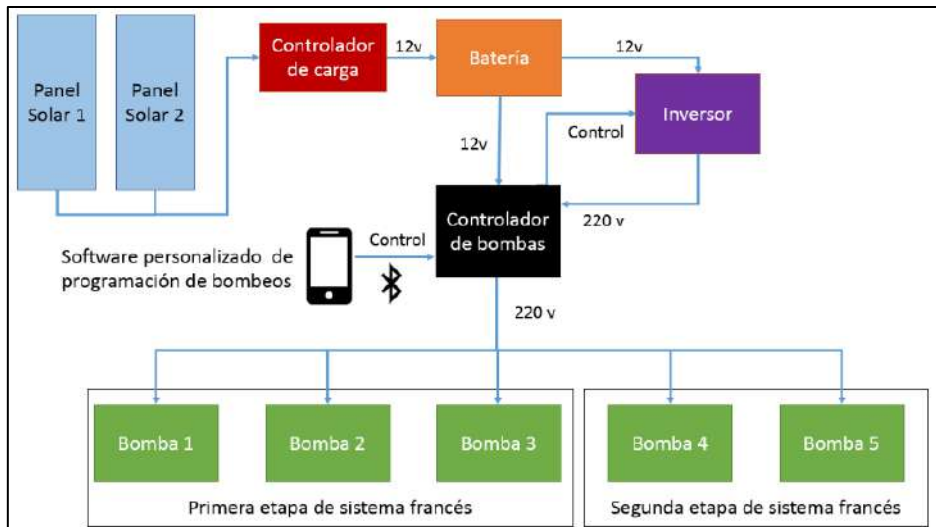


Figura 29: Esquema de funcionamiento de bombeo de lixiviados



Figura 30: Tanque de bombeo de lixiviado diluido

4.5.2. Sistema Francés

Se construyó un Sistema Francés compuesto por dos etapas y un total de cinco sub unidades (Figura 31), con sustratos de acuerdo a lo especificado en la Tabla 23 . Para el revestimiento de las sub unidades se utilizaron tanques IBC, los que se colocaron enterrados. Se instaló tuberías PVC SAL de 2” para la conducción de afluentes y efluentes. En la primera etapa las sub unidades denominadas C.F-1, C.F-2, y C.F-3 (Figura 32) fueron conectadas a las bombas 01, 02 y 03 respectivamente.



Figura 31: Vista de las dos etapas del Sistema Francés

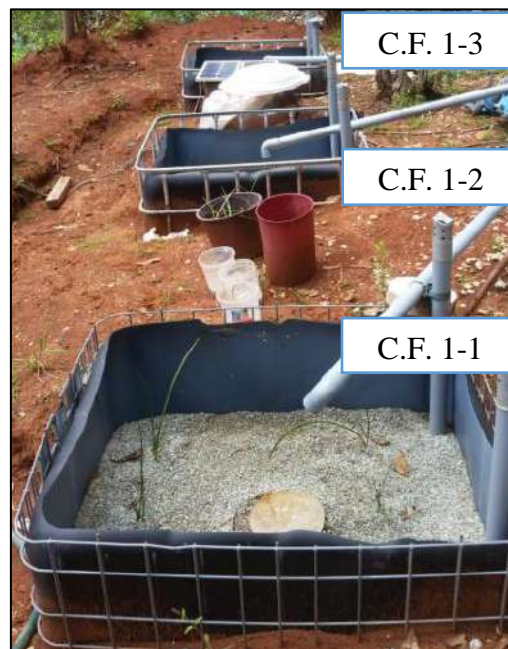


Figura 32: Sub unidades de la primera etapa del Sistema Francés

La segunda etapa contó con dos sub unidades de tratamiento denominadas C.F.2-1 y C.F. 2-2 (Figura 33 y Figura 34), que funcionaron de forma independiente y estuvieron conectadas a las bombas 04 y 05 respectivamente. En su totalidad el Sistema Francés ocupó un área de 30 m² (incluyendo áreas alrededor de las sub unidades, cilindros y tuberías). Todos los detalles técnicos y planos de ambas etapas son presentados en el Anexo 7.

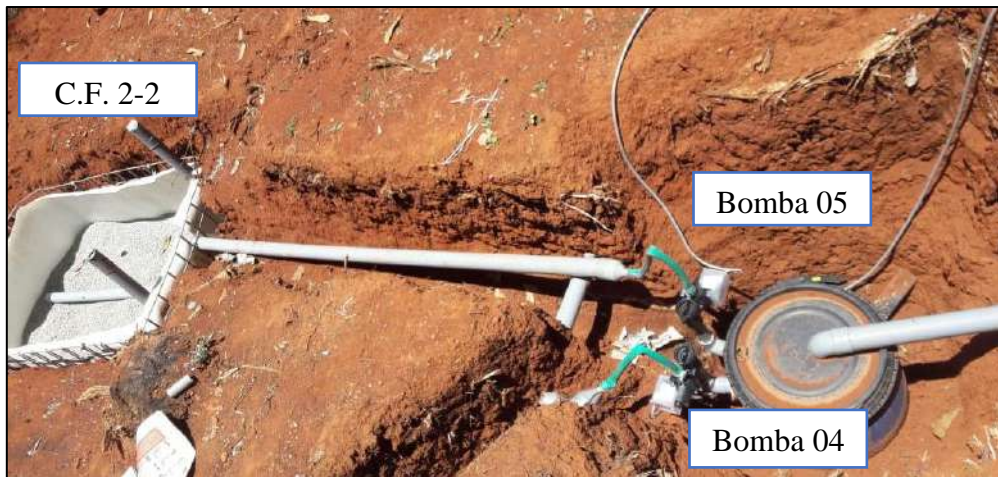


Figura 33: Bombas para la alimentación de la segunda etapa



Figura 34: Sub unidades de la segunda etapa del Sistema Francés

4.5.3. Tratamiento secundario: Humedal construido subsuperficial horizontal

Se construyó un humedal subsuperficial horizontal impermeabilizado con geomembrana HDPE de 1.5 mm (Figura 35). Se conectó al Sistema Francés mediante tubería PVC SAL de 2" y para la recolección de los efluentes se colocó tubería PVC SAL de 2" con perforaciones de 8 mm de diámetro cada ocho centímetros. Los efluentes fueron recolectados en un cilindro plástico, donde se controló el nivel de agua en el humedal. Desde dicho cilindro plástico se infiltraron los efluentes en el terreno.



Figura 35: Humedal subsuperficial horizontal en el mes de febrero

4.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Las *Schoenoplectus americanus* fueron adaptadas a las condiciones de alta carga orgánica de los lixiviados. Al responder positivamente, se procedió a plantarlas en los humedales con una separación aproximada de 0.50 m. Se plantaron cuatro plantas en cada sub unidades del Sistema Francés (Figura 36) y nueve plantas en el humedal horizontal.

Se instalaron dos cilindros plásticos para la dilución de lixiviados, en los cuales se combinó el lixiviado y las aguas grises provenientes del lavadero utilizado para el aseo por parte de los operadores del relleno sanitario, la dilución se realizó en una proporción 1 a 5 (lixiviado a agua gris). Estos cilindros de dilución se conectaron al tanque de bombeo y su recarga se realizó una vez por semana.

El bombeo se realizó en función de las programaciones de la Tabla 17, las que fueron introducidas a un software para celular, preparado para el manejo de las bombas. Para facilitar el manejo de los bombeos, la primera y segunda etapa del Sistema Francés tuvieron un ciclo de funcionamiento de siete días como se muestra en la Figura 37. El humedal horizontal se alimentó con un flujo constante por gravedad, proveniente del tanque de almacenamiento de efluentes del Sistema Francés.



Figura 36: Ingreso de lixiviado en C.F. 1-3

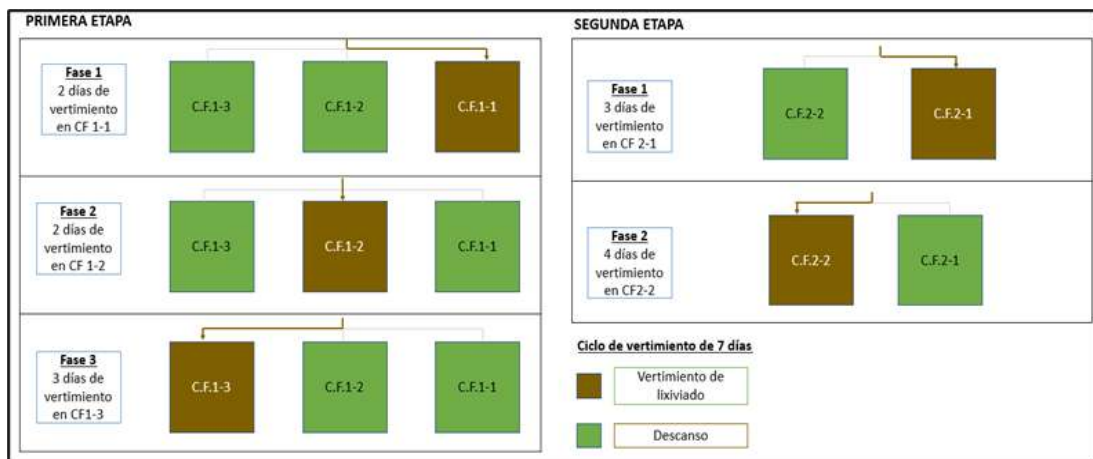


Figura 37: Ciclo de funcionamiento del Sistema Francés

4.7. EVALUACIÓN DEL DESARROLLO VEGETATIVO EN EL SISTEMA PILOTO

Se evidenció un aumento constante de tallos y hojas de las *Schoenoplectus americanus* en el Sistema Francés y en el humedal horizontal. A la décima semana de operación el número de tallos y hojas se multiplicó cuatro veces aproximadamente, alcanzando un promedio de 22 tallos/m² en el Sistema Francés y 24.3 tallos/m² en el humedal horizontal.

El crecimiento del tamaño de las macrófitas en todas las unidades también fue constante, el promedio en el Sistema Francés fue de 2.74 cm/semana y en el humedal horizontal fue 2.28 cm/semana. A pesar del crecimiento constante de las macrófitas, no se alcanzó una

cobertura vegetal óptima, por lo que sería necesaria una mayor densidad de plantación. En el Anexo 4 se presenta el detalle completo de las mediciones realizadas.

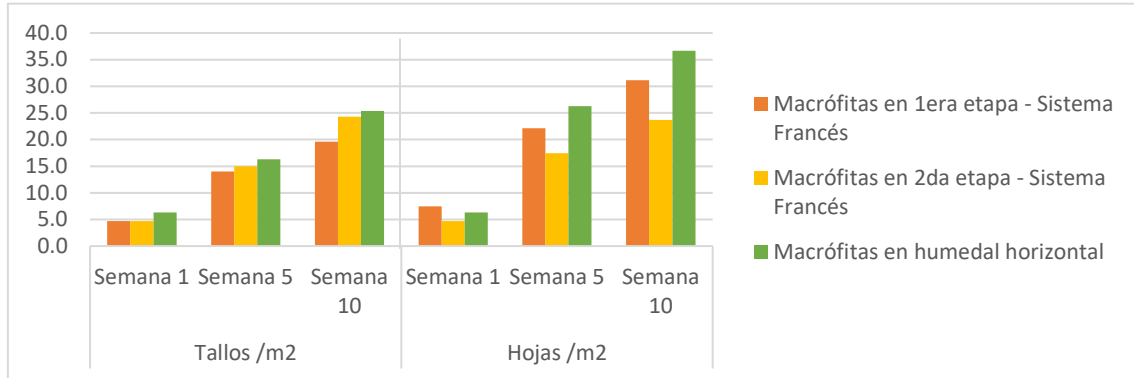


Figura 38: Promedio de tallos y hojas por metro cuadrado

4.8. EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE TRATAMIENTO DEL SISTEMA PILOTO

Se realizaron muestreos en el sistema piloto de tratamiento entre febrero y abril de 2019, en los cuatro puntos de muestreo considerados (Figura 39). El detalle de los resultados de laboratorio es presentado en el Anexo 3. El promedio de los valores de los parámetros considerados, sus desviaciones estándar y las eficiencias globales de tratamiento son presentados en la Tabla 26.



Figura 39: Muestra de lixiviado afluyente y de efluentes de humedales

Tabla 26: Concentraciones promedio de los parametros monitoreados y eficiencias promedio de tratamiento

Afluente y efluentes	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	STS (mg/l)	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	CE (uS/cm)	pH -	Temperatura (°C)
Lixiviado diluido en 1:5 (Afluente)	404.62 (± 118.36)	856.62 (± 102.36)	147.38 (± 86.20)	4.32E+03 (±4.01 E+03)	6097.00 (±1328.90)	8.4 (±0.2)	15.9 (± 0.32)
Efluentes de 1era etapa de Sistema Francés	221.98 (± 59.24)	463.34 (±132.12)	88.75 (±46.73)	4.14E+02 (±2.27 E+02)	3242.20 (±955.08)	8.2 (±0.2)	15.4 (± 0.34)
Efluentes de 2da etapa de Sistema Francés	111.58 (±40.09)	262.99 (±89.81)	59.13 (± 28.56)	9.48E+01 (±4.29E+01)	2564.20 (±1504.92)	7.8 (± 0.2)	15.8 (±0.53)
Eficiencia del Sistema Francés (%)	72.42%	69.30%	59.88%	97.80%	57.94%	-	-
Efluentes humedal horizontal	54.77 (± 21.22)	95.12 (± 95.13)	8.70 (±3.70)	7.54E+01 (±9.25E+01)	1276.90 (±759.56)	7.1 (±0.1)	15.9 (±0.25)
Eficiencia global (%)	86.46%	88.90%	94.10%	98.25%	79.06%	-	-

La carga superficial promedio aplicada al Sistema Francés fue de 22.69 g/m².d para DBO₅ y 48.03 g/m².d para DQO. La relación DBO/DQO promedio del afluente fue 0.472, valor que confirmó su biodegradabilidad y que está dentro del rango que reportan Roy *et al.* (2018) de 0.42 a 0.49 para lixiviados de fracción orgánica de residuos sólidos municipales.

En el Sistema Francés del piloto se encontró una eficiencia promedio de remoción de DBO₅ y DQO fue de 72.42% y 69.30% respectivamente; valores que se encuentran por debajo de las eficiencias típicas de esta tecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales domésticas según lo reportado por Dotro *et al.* (2017); sin embargo, esto puede deberse a las diferencias en las características del lixiviado y las aguas residuales domésticas.

Bakhshoodeh *et al.* (2020) realizaron una revisión sistemática de 85 publicaciones científicas de humedales construidos, aplicados al tratamiento de lixiviado de relleno sanitario, hallando en los humedales verticales un promedio de remoción de DBO₅ y DQO de 79.7% (± 13%) y 59.2% (± 22%) respectivamente; valores similares a los encontrados en el Sistema Francés de la presente investigación, cuyas sub unidades están compuestas por humedales verticales.

En el piloto de tratamiento se encontró una eficiencia de remoción global promedio de DBO₅ y DQO de 86.46% y 88.90% respectivamente; estos valores son próximos al rango presentado por Wojciechowska (2017), quien aplicó una configuración de humedales similar para el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario (dos humedales verticales en serie seguidos de un humedal horizontal), reportando una remoción de DBO₅ de entre 88% y 95% y una remoción de DQO de entre 47.8% y 86.6%.

Bulc (2006) ejecutó una configuración con dos humedales verticales en paralelo seguidos de uno horizontal, obtuvo una eficiencia de remoción de DBO₅ y DQO de 59% y 50% respectivamente, eficiencias menores a las obtenidas en la presente investigación. Esta diferencia puede deberse a que en el Sistema Francés ejecutado se contó con dos etapas de humedales verticales. Adicionalmente, en el caso del autor citado, los lixiviados provenían de un relleno sanitario en etapa predominantemente metanogénica y que eran diluidos por la precipitación, lo cual reducía significativamente la carga orgánica al ingreso del sistema.

Jinadasa *et al.* (2018) evaluaron el tratamiento de lixiviado de relleno sanitario con una configuración de humedal vertical seguido de uno horizontal. El lixiviado fue diluido en diferentes concentraciones, encontrándose las mejores eficiencias de remoción con una concentración de 25% de lixiviado. Como resultado se obtuvo un promedio de remoción de DQO de 82.6% para ambas unidades y de 71.3% solo para el humedal vertical. Ambos valores son similares a los reportados en la presente investigación para la remoción global promedio de DQO (88.90%) y la del Sistema Francés (69.30%).

Como se presenta en la Tabla 26, la eficiencia del humedal horizontal en la remoción de DBO₅ y DQO fue de 50.92% y 63.83% respectivamente; hallazgo semejante al de Bakhshoodeh *et al.* (2020), en el uso de humedales horizontales aplicados al tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, quienes reportaron una eficiencia promedio de remoción de DBO₅ y DQO de 60.1% ($\pm 17\%$) y 54.5% ($\pm 25\%$) respectivamente. Esta similitud puede deberse a que los humedales horizontales analizados por los autores mencionados eran generalmente utilizados para el tratamiento de lixiviados de bajas cargas orgánicas.

Los efluentes del piloto tuvieron valores promedio de DBO₅ y DQO de 54.77 mg/l y 95.12 mg/l respectivamente, como se muestra en la Figura 40 y Figura 41, ambos valores se encuentran por debajo de los LMP para efluentes de PTAR doméstica, normativa que fue tomada solo como una referencia ante la ausencia de una normativa específica para lixiviados. Como se muestra en Tabla 26 y las Figuras 40, 41 y 42, los parámetros medidos en los efluentes del piloto no superarían los LMP para PTAR doméstica con lo cual estos efluentes no causarían daños a la salud, el bienestar humano y el ambiente.

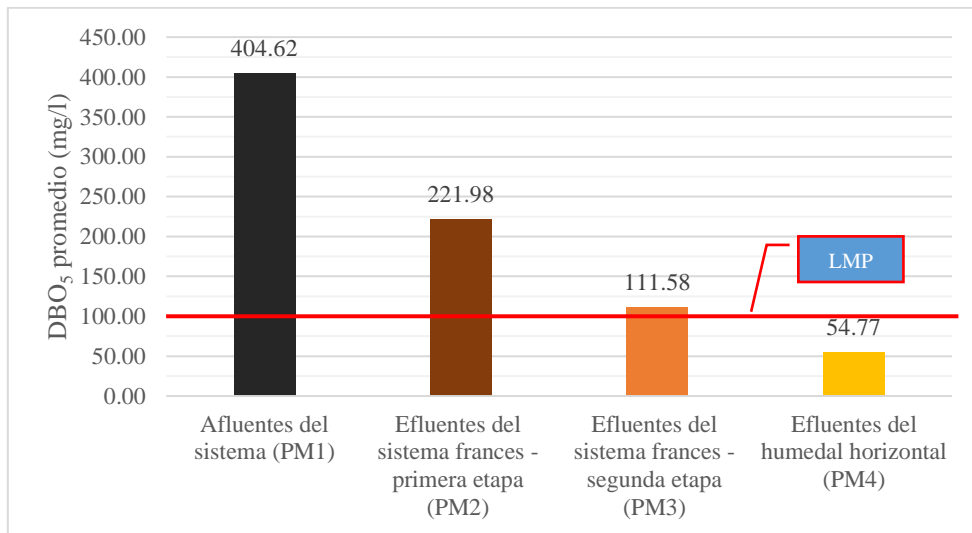


Figura 40: DBO₅ promedio en los puntos de muestreo

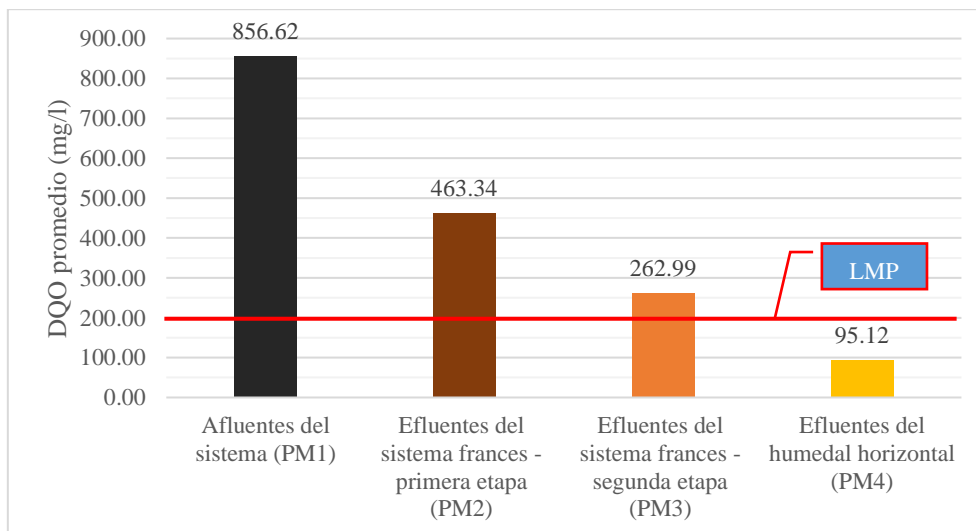


Figura 41: DQO promedio en los puntos de muestreo

El lixiviado diluido afluente al piloto tuvo unos STS promedio de 147.38 mg/l, considerando que los lixiviados fueron diluidos 1:5, los valores están dentro de los rangos reportados por Laitinen *et al.* (2006) de 480 mg/l (\pm 260) y Lafrance (1996) de entre 80 y 600 mg/l. La eficiencia de remoción de STS del Sistema Francés fue de 59.88%, valor similar al de humedales verticales para el tratamiento de lixiviado identificado por Bakhshoodeh *et al.* (2020), quienes obtuvieron una eficiencia promedio de remoción de STS de 55.5% (\pm 20%).

Los efluentes del piloto tuvieron unos STS promedio de 59.13 mg/l, la eficiencia de remoción promedio de STS fue de 94.10%. En comparación con los LMP de PTAR, los afluentes al piloto y los efluentes de los humedales tuvieron STS por debajo de los límites de dicha normativa.

El lixiviado diluido afluente al piloto tuvo coliformes fecales promedio de 4.32×10^3 NMP/100 ml, valores similares a los reportados por Espinosa *et al.* (2010) de 2.61×10^4 NMP/100ml en un relleno sanitario en la Ciudad de la Habana-Cuba, cuyas mediciones se realizaron en época de lluvia. Los efluentes del piloto tuvieron coliformes fecales promedio de 7.54×10^1 NMP/100 ml, por lo que la eficiencia de remoción promedio es de 98.25%. Como se muestra en la Figura 42, tanto el afluente y el efluente del piloto se encuentran por debajo de los LMP para PTAR.

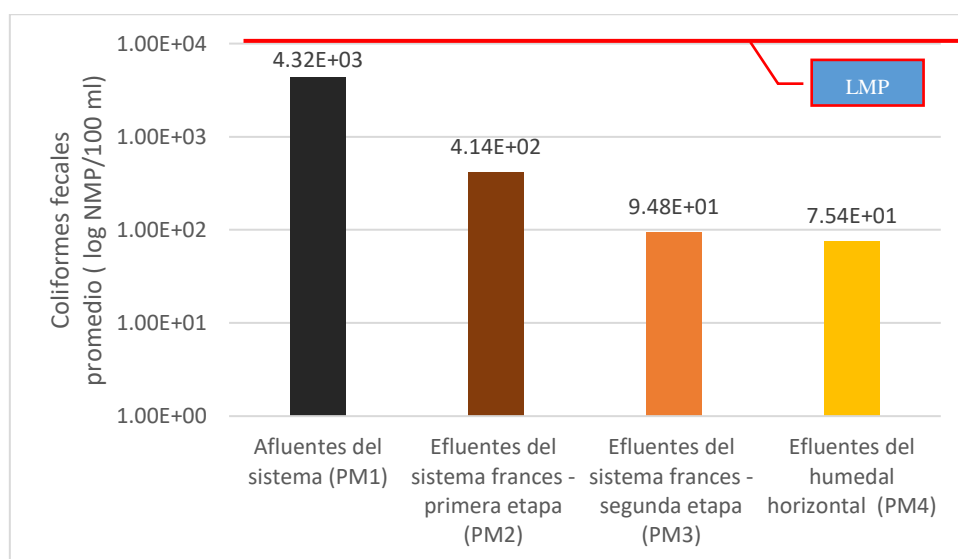


Figura 42: Coliformes fecales promedios en puntos de muestreo

Como se muestra en la Figura 43 el lixiviado diluido afluente al piloto tuvo una CE promedio de 6097 uS/cm y los efluentes tuvieron una CE promedio de 1276.9 uS/cm. La eficiencia de remoción promedio de CE del piloto fue de 79.06%.

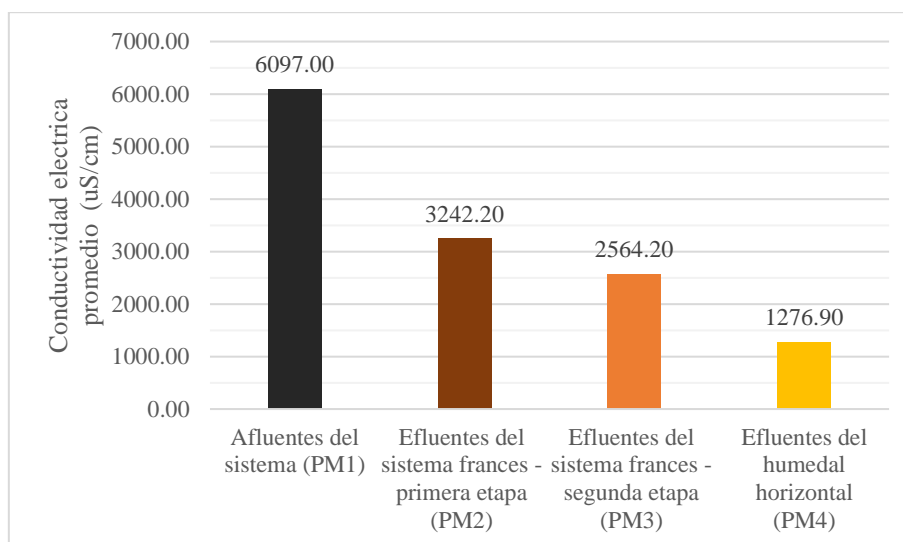


Figura 43: CE promedio en puntos de muestreo

El lixiviado diluido afluente al Sistema Francés tuvo un pH promedio de 8.3, dicho valor podría deberse a la utilización de aguas grises para la dilución. En el análisis de lixiviados de Roy *et al.* (2018) encuentran una alta variabilidad de pH con un rango desde 4.2 hasta 7.4 para lixiviado de fracción orgánica mezclada con residuos sólidos municipales y pH de entre 3.4 a 8.8 para lixiviados de compostaje solo de restos orgánicos. Los efluentes del piloto tuvieron un pH promedio de 7.15, valor que se encuentra dentro del rango aceptado por los LMP para PTAR.

Existe evidencia estadística con un nivel de confianza del 95% para afirmar que existen diferencias significativas entre las medias de los parámetros DBO₅, DQO, STS, CE y coliformes fecales, como resultado del tratamiento en el piloto de humedales construidos, medidos desde los afluentes al Sistema Francés hasta los efluentes del humedal horizontal.

Con respecto a la evaluación del Sistema Francés, se evidencia diferencias significativas, a un nivel de confianza del 95%, entre las medias de los parámetros DBO₅, DQO, CE y

4.9.2. Componentes de la propuesta

Para el tratamiento de los lixiviados se propuso un sistema de humedales construidos (Figura 45) basado en la configuración del piloto de humedales y las eficiencias de remoción de contaminantes obtenidas.

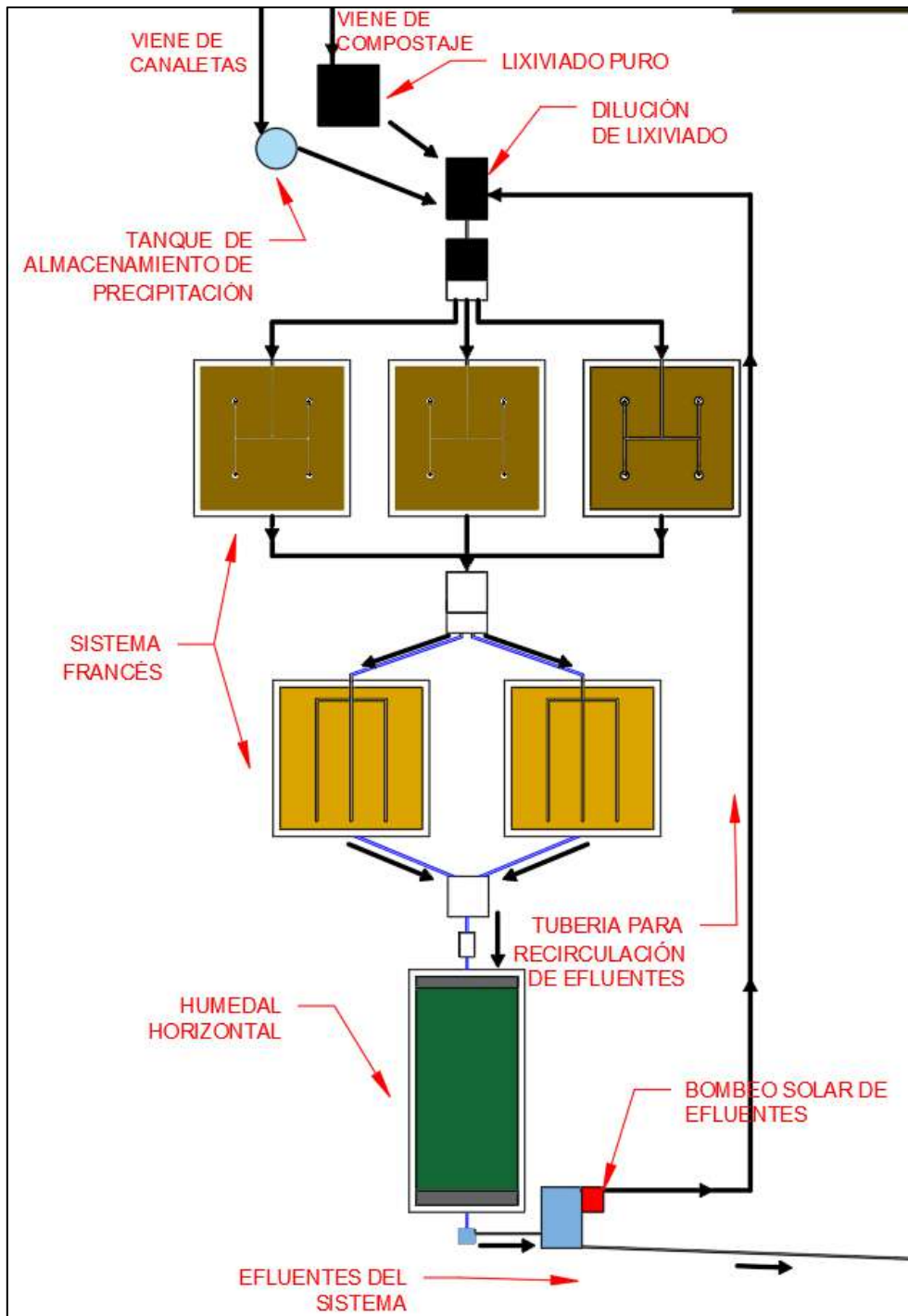


Figura 45: Distribución de componentes de sistema de tratamiento propuesto

a. Dilución de lixiviado

La dilución se realizará en un tanque de concreto, conectado a las siguientes fuentes de agua para la dilución:

- Aguas grises de lavaderos de servicios higiénicos del relleno sanitario: Estimado de 400 l/d.
- Recolección de precipitación de la zona de segregación y zona administrativa: Estimado de 1000 l/d.
- Recirculación de efluentes del sistema de tratamiento: Estimado de 1500 l/d.

Para la recirculación de efluentes del sistema de tratamiento se proyectó la instalación de un sistema de bombeo al final del tratamiento, el que será alimentado con energía fotovoltaica, lo que permitirá minimizar los costos de operación del sistema.

b. Sistema Francés

Se propuso un Sistema Francés de dos etapas dispuestas en serie, con tres sub unidades en la primera etapa y dos sub unidades la segunda. El dimensionamiento se realizó en función de los resultados obtenidos en el piloto de tratamiento (Anexo 6). Se obtuvo un área de 49.0 m² para cada sub unidad. Para el proceso constructivo, al igual que el piloto se utilizará la misma vegetación y sustratos similares (con una menor granulometría en la 2da etapa). Se proyectó que las sub unidades estén impermeabilizadas con geomembrana HDPE de 1.5 mm.

En base a experiencias como la de Kato *et al.* (2006), de sifones utilizados en el vertimiento para aguas residuales en humedales construidos, se proyectó dos sifones para el vertimiento de los afluentes del Sistema Francés. Esta opción tecnológica no requiere de energía eléctrica para su funcionamiento. Los sifones estarán diseñados y construidos de forma que el vertimiento de afluentes sea tres veces al día. Como se muestra en la Figura 46, el funcionamiento los sifones está dividido en tres procesos:

1. Ingreso de los afluentes, al tener tubería corrugada flexible HDPE y un flotador, el sifón empieza elevarse sin que los afluentes ingresen a la tubería.
2. El sifón se eleva hasta un punto máximo, el lixiviado empieza a ingresar a las tuberías.
3. El sifón se sumerge en el lixiviado, evacuando la totalidad del lixiviado acumulado y regresa a su posición inicial.

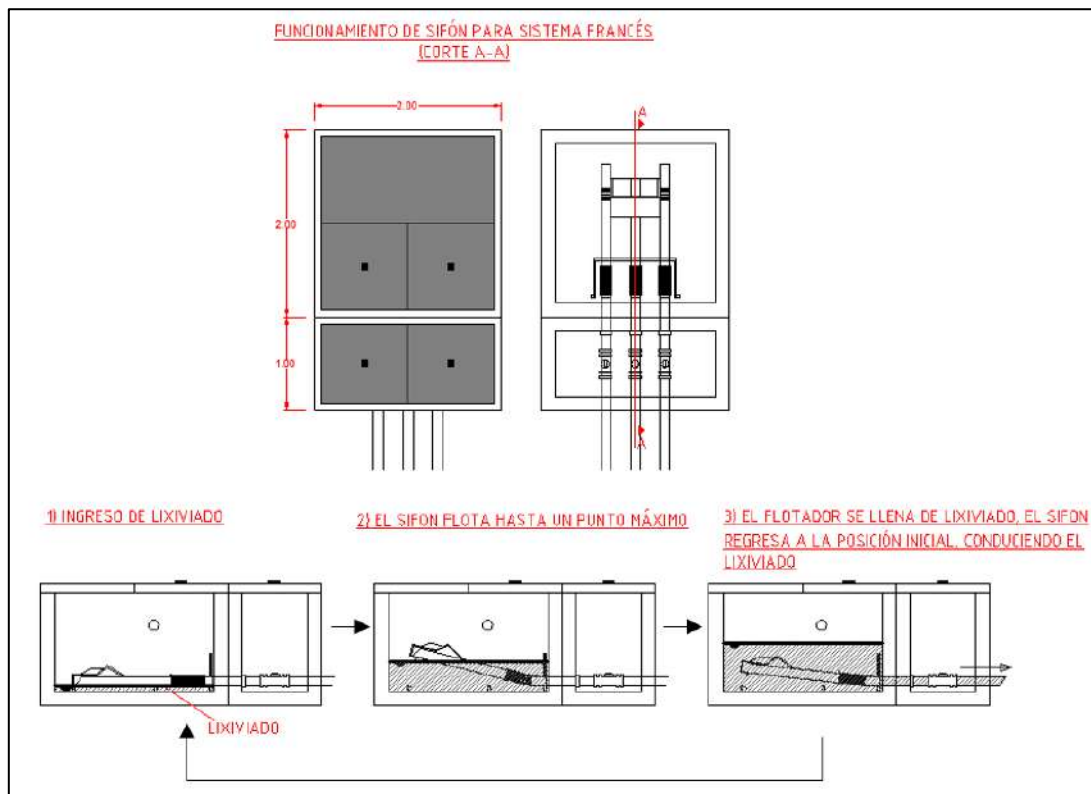


Figura 46: Funcionamiento del sifón para el vertimiento de afluentes en Sistema Francés

Para distribuir de manera homogénea los afluentes en las sub unidades del Sistema Francés, se proyectó que el ingreso de afluentes sea en cuatro puntos dentro del humedal como se muestra en la Figura 47. Los efluentes de esta etapa serán colectados en el segundo sifón, desde el cual se conducirán a la segunda etapa como (Figura 48). Para promover la formación de la capa de sólidos característica de este tipo de tecnología, se colocarán ramas y hojas en la superficie de las sub unidades, en los puntos donde ingresan los afluentes.

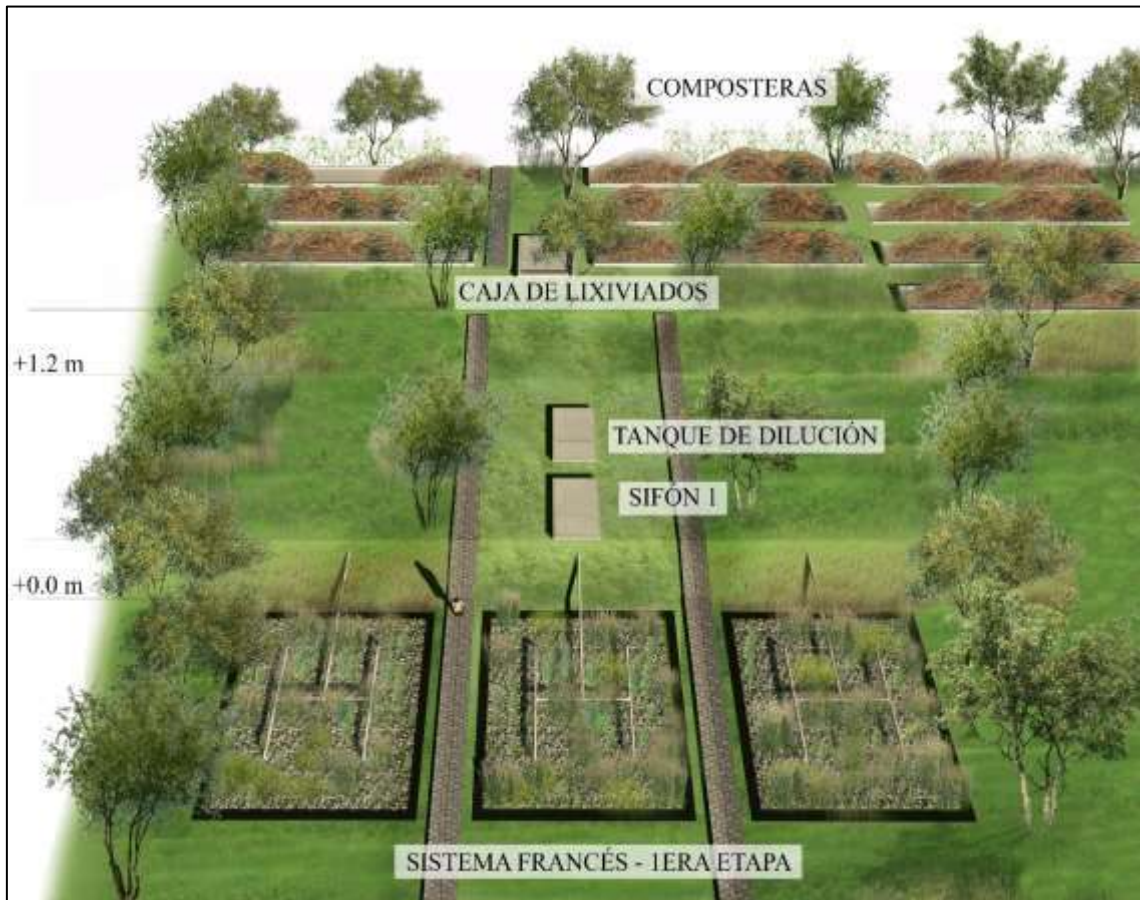


Figura 47: Vista de composteras y primera etapa de Sistema Francés proyectado

c. Humedal horizontal

Se proyectó un humedal horizontal que reciba por gravedad y de forma constante los efluentes de la segunda etapa del Sistema Francés. El área superficial proyectada del humedal horizontal es de 72.0 m². De la misma forma que el piloto de humedales, estará construido con impermeabilización de geomembrana HDPE de 1.5 mm. A diferencia del humedal horizontal del piloto de la presente investigación, se proyectó la utilización de arena gruesa lavada como sustrato para el tratamiento de afluentes, esto con el objetivo de mejorar las eficiencias de tratamiento de esta unidad. En la Figura 48 se presenta una vista del humedal horizontal proyectado.



Figura 48: Vista de segunda etapa de Sistema Francés y humedal horizontal

d. Reúso de lixiviados tratados

Se plantaron diferentes alternativas para el uso de los efluentes del sistema de humedales:

- 1. Recirculación de efluentes para la dilución de lixiviado de compostaje:** De no tener suficiente agua disponible para la dilución de los lixiviados de compostaje, se ha considerado la recirculación de los efluentes del humedal horizontal, para lo cual, se instalaría un sistema de bombeo solar, lo cual minimizará los costos de operación.
- 2. Reúso de los efluentes para el riego de especies ornamentales y forestales:** El reúso de estos efluentes en el riego de especies forestales y ornamentales del relleno sanitario se daría en un espacio con acceso restringido. Adicionalmente,

se deberá realizar controles del nivel de coliformes y huevos de helmintos a salida del efluente y compararlos con las directrices de la OMS. De esta forma se podrá garantizar la viabilidad del riego forestal y ornamental.

- 3. Riego de cultivos:** Debido a la presencia de áreas de cultivo en las zonas aledañas al relleno sanitario de Anta y la creciente demanda de recursos hídricos, podría evaluarse la reutilización de los efluentes del sistema para el riego de cultivos de tallo alto. Para lo cual se deberá contar con autorización de la Autoridad Nacional del Agua y el cumplimiento de los valores y guías de la Organización Mundial de la Salud para minimizar los riesgos asociados al reúso de estos efluentes.
- 4. Infiltración en el terreno:** En caso de que no se requiera reutilizar los efluentes de la propuesta o que la calidad de estos no sea la adecuada para el riego de cultivos, estos podrán ser infiltrados en el terreno de forma segura. Esto debido a que, en los resultados obtenidos en el piloto de humedales, se identificó que al tomar como referencia los LMP para PTAR se cumplía con los valores de dicha normativa. Esta infiltración se podría llevar a cabo a través de zanjas de infiltración ubicadas a continuación del humedal horizontal.
- 5. Uso para la dilución del lixiviado de las trincheras del relleno sanitario:** De ser implementado un sistema de humedales construidos para el tratamiento de los lixiviados de las trincheras del relleno sanitario de Anta, se esperaría que estos sean diluidos previo al tratamiento con humedales. Es así que, los efluentes del tratamiento de lixiviado de compostaje podrían servir para la dilución de los lixiviados de las trincheras. El desnivel existente entre la zona de compostaje y la caja de lixiviado de trinchera haría posible conducir los efluentes por gravedad.

Se propone que se instale un sistema de bombeo solar con el cual se recircule los efluentes sólo en caso de que no exista suficiente agua para la dilución. Solo si los resultados microbiológicos los permiten, los efluentes del sistema deberán ser conducido por gravedad a una zona acondicionada para el riego de especies ornamentales y forestales como se presenta en la Figura 49, este espacio tendrá un área de 352.0 m² y cuya demanda hídrica podrá ser cubierta por los efluentes del sistema.

4.9.3. Ubicación y área necesaria

Como se muestra en la Figura 49, se estableció la ubicación de la propuesta dentro de las instalaciones del relleno sanitario a continuación de la zona de compostaje. Dicho espacio no tiene destinado ningún uso y su pendiente permite reducir al mínimo las necesidades de corte y relleno del terreno para la construcción de los humedales. El área total proyectada del sistema es de 1495.5 m², con lo cual se tendría un El detalle de la propuesta es presentado en el Anexo 8.

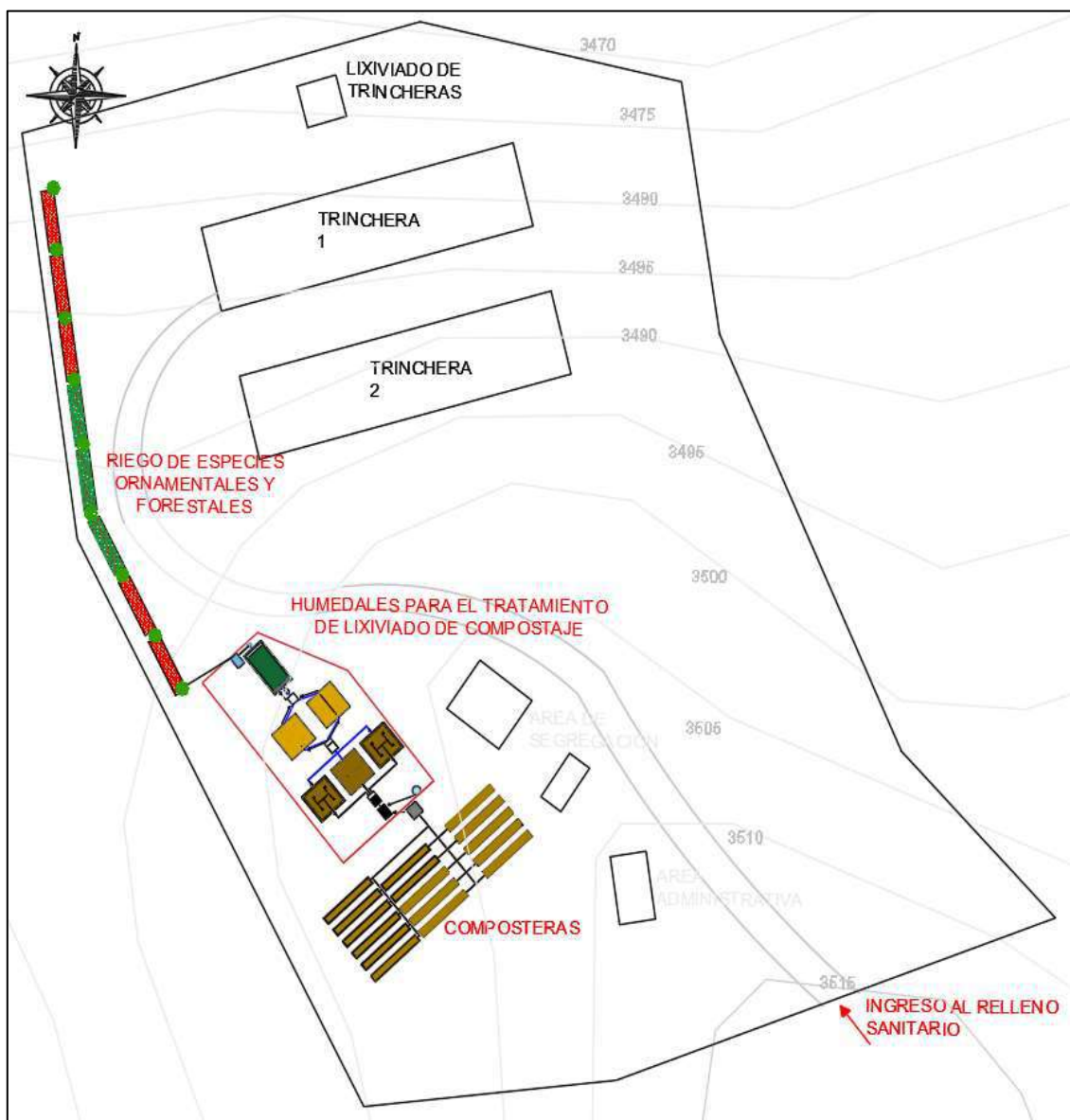


Figura 49: Ubicación de propuesta de humedales en el relleno sanitario de Anta

4.9.4. Necesidades operación, mantenimiento y monitoreo

En base a Lombard y Molle (2017) y Wong (2004) se establecieron las actividades para la operación, mantenimiento y monitoreo del sistema de humedales. Se consideró que un operador del relleno sanitario sea capacitado y este a cargo de las actividades presentadas en la Tabla 27. En total se requiere de 214 horas al año de un personal para la operación, mantenimiento y monitoreo del afluente y efluente del sistema de tratamiento de lixiviado.

Tabla 27: Actividades de operación y mantenimiento

Tipo de actividad	Lista de operaciones	Frecuencia	Tiempo de actividad (horas)	Tiempo al año (horas)
Operación	Cerrado y apertura de válvulas (salida de sifones)	dos veces/semana	0.5	52
	Control de tanque de mezcla	dos veces/semana	0.5	52
	Control de caudales	dos veces/semana	0.2	20.8
	Registro de información de operación	una vez/semana	0.1	5.2
	Verificación de niveles de agua en humedal horizontal	una vez /semana	0.25	13
Mantenimiento	Limpieza de rejas de desbaste (ubicadas en tanque de mezcla)	una vez /semana	0.25	13
	Inspección y limpieza de sifones	una vez/mes	1	12
	Mantenimiento y poda de macrófitas	una vez/año	8	8
	Manejo de hierbas en humedal	una vez /semana	0.5	26
Monitoreo	Muestreo de afluentes y efluentes	dos veces/año	6	12
Total				214

4.9.5. Estimación de costos de operación, mantenimiento, monitoreo y construcción

a. Operación, mantenimiento y monitoreo

En base a la Tabla 27 y considerando que un operador del relleno sanitario de Anta se encargara de la operación, mantenimiento y monitoreo del sistema de humedales, se estimó un costo anual de S/.892.80 como se detalla en la Tabla 28.

Tabla 28: Actividades de operación y mantenimiento

Ítem	Componente	Consideraciones	Costo anual estimado S/.
01	Operación y mantenimiento	Reparación de tuberías, accesorios y reposición de equipos de poda y mantenimiento.	250.00
02	Monitoreo	Pago a laboratorio por análisis de parámetros: DBO, DQO, STS, y coliformes fecales. Dos veces al año.	542.80
		Transporte Relleno Sanitario – Ciudad de Cusco. Dos veces al año	100.00
Total anual estimado			S/. 892.80

b. Construcción e implementación

Considerando que la propuesta podría ser implementada por la Municipalidad Provincial de Anta, la que asumiría los gastos indirectos de la construcción de la propuesta. Se estimó que el costo directo de construcción tiene un total estimado de S/. 44,836.29 soles, el que se detalla en la Tabla 29.

Tabla 29: Estimación de costos directos de construcción de sistema de humedales

Ítem	Componente	Consideraciones	Costo estimado S/.
01	Dilución de lixiviados	Caja de concreto semienterrada, con tarrajeo con impermeabilizante e instalaciones sanitarias.	2,436.00
02	Sifón - 1era etapa	Sifón construido en fierro galvanizado y caja de concreto para protección.	2,651.68
03	Sistema francés - 1era etapa (3 sub unidades)	Construido en el terreno con impermeabilización de geomembrana HDPE 1.5 mm. Tres tipos de sustrato.	17,038.53
04	Sifón - 2da etapa	Sifón construido en fierro galvanizado y caja de concreto para protección.	2,251.56
05	Sistema francés - 2da etapa (2 sub unidades)	Construido en el terreno con impermeabilización de geomembrana HDPE 1.5 mm. Tres tipos de sustrato.	10,709.02
06	Humedal horizontal	Construido en el terreno con impermeabilización de geomembrana HDPE de 1.5 mm. Dos tipos de sustrato.	5,607.16
07	Reúso de efluentes y recirculación	Incluye una bomba de agua, paneles solares, controladores y software.	3,502.34
08	Otros	Gastos relacionados a implementación de sistema	640.00
Total estimado			S/. 44,836.29

El costo total estimado de la propuesta supone aproximadamente el 1.9% del presupuesto total que tuvo el proyecto de construcción del relleno sanitario de Chacán, según los costos publicados en Municipalidad Provincial de Anta (2015). Por lo que para futuros proyectos de construcción de rellenos sanitarios con condiciones similares a las de Anta, la incorporación de un sistema de humedales para el tratamiento de lixiviados no generaría un aumento significativo del presupuesto.

4.9.6. Beneficios de la propuesta

La aplicación de la propuesta permitirá el control de los lixiviados producidos en el área de compostaje del relleno sanitario de Anta, evitando problemas de contaminación que repercutan en el medio ambiente y la salud humana, en especial de los operadores del relleno sanitario y de las poblaciones cercanas. Adicionalmente la propuesta tiene los siguientes beneficios:

- Al haber proyectado un Sistema Francés se evita la necesidad de construir una tecnología de tratamiento primario previo a los humedales, simplificando el proceso y reduciendo los costos de construcción, operación, mantenimiento.
- Contribuir con el uso eficiente del agua, en la medida que se reutilizarán los lixiviados tratados para la dilución del lixiviado puro. Eventualmente podrán ser reutilizados para el riego de especies ornamentales y forestales del relleno sanitario. De ser necesario también pueden ser aplicados para el riego de las pilas de compost previo a la fase termófila, en época de bajas precipitaciones.
- A diferencia de las soluciones grises tradicionales, el sistema de humedales se articulará armoniosamente con el paisaje, mejorando su estética y favoreciendo la biodiversidad, al ser el hábitat para diversos vertebrados como pájaros e invertebrados como arácnidos e insectos.
- Un correcto manejo de los lixiviados permitirá aumentar la capacidad de compostaje, sin que esto suponga un aumento de la contaminación. Al reducir la

cantidad de fracción orgánica que llega las trincheras del relleno sanitario de Anta se aumentará la vida útil del relleno sanitario y se reducirán las emisiones asociadas a la fracción orgánica.

- Al funcionar a través de energía fotovoltaica y sin la necesidad de químicos, la implementación del sistema de humedales no requerirá un incremento significativo del costo de operación y mantenimiento del relleno sanitario. Así mismo, no se requiere de operadores altamente capacitados para el funcionamiento de esta propuesta.
- En el caso de detectar la presencia de metales pesados en los lixiviados del compostaje del relleno sanitario de Anta, como lo indica American Society of Civil Engineers (2008) los humedales construidos tienen mecanismos que permiten tratarlos, por lo que, como alternativa tecnológica los humedales suponen una opción adaptable a posibles cambios en la calidad de los afluentes.
- La aplicación de la propuesta evitará los costos de posibles sanciones por la contaminación causada por la producción descontrolada de lixiviado de la zona de compostaje del relleno sanitario de Anta.

V. CONCLUSIONES

1. Actualmente la Municipalidad Provincial de Anta cuenta con 14 composteras para el procesamiento de parte de la fracción orgánica que ingresa a sus instalaciones. Las pilas de compost, al estar expuestas a factores climáticos (especialmente en época de lluvia) producen lixiviado con una alta carga orgánica, los cuales tuvieron una DBO₅ promedio de 3359.62 mg/l entre mayo y septiembre de 2018. Al no contar con tratamiento, los lixiviados se rebosan e infiltran en el terreno, lo que podría generar un problema de contaminación y afectación de la salud humana. En los primeros meses de 2019 se identificó deficiencias en el manejo del compostaje, como la falta de volteo en las pilas y control de parámetros como la temperatura y humedad; estas deficiencias afectarían la calidad del material producido, al no poder garantizar los procesos de higienización.
2. Se diseñó, construyó e implementó un sistema piloto de humedales compuesto por un Sistema Francés y un humedal subsuperficial horizontal, tras su evaluación se determinó que el tratamiento de lixiviados de compostaje con esta composición es técnicamente viable. El piloto redujo la carga de contaminantes a niveles que cumplen con los parámetros establecidos en los LMP para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (esta normativa fue tomada como referencia ante la ausencia de una normativa específica para lixiviados).
3. Existe evidencia estadística con un nivel del 95% de confianza, para afirmar que hay diferencias significativas entre las medias de los parámetros DBO₅, DQO, STS, coliformes fecales y CE, entre los afluentes al Sistema Francés y los efluentes del humedal horizontal. El piloto de humedales tuvo una eficiencia de remoción promedio de 86.46% de DBO₅, 88.90% de DQO, 94.10% de STS, 98.25% de CF, 79.06% de CE en el periodo de evaluación de tres meses.

4. El Sistema Francés del piloto ha respondido positivamente al tratamiento de lixiviados, permitiendo simplificar los procesos de tratamiento y reduciendo significativamente la carga orgánica de los lixiviados. La eficiencia de remoción promedio de DBO₅ y DQO fueron de 72.42% y 69.30% respectivamente, para una carga superficial de 22.69 g/m².d de DBO₅ y 48.03 g/m².d de DQO. Sin embargo, las eficiencias de remoción de DBO₅ y DQO, así como la carga superficial orgánica removida son menores a las reportadas de esta tecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales domésticas.

5. Se ha identificado que las *Schoenoplectus americanus* evaluadas no sobrevivieron a un riego con lixiviado puro, sin embargo, han respondido positivamente al riego con lixiviados diluidos en una proporción 1:5 de lixiviado a aguas grises. La vegetación en todas las unidades de tratamiento tuvo un desarrollo constante en los tres meses de evaluación, sin embargo, no se llegó a alcanzar una cobertura vegetal óptima en los humedales, por lo que, se deberá aumentar la densidad de plantación a más de 5 tallos/m².

6. Los resultados permitieron diseñar una propuesta de humedales a escala real para el tratamiento de los lixiviados de compostaje en el relleno sanitario de Anta. Se estimó un costo directo de S/. 44,836.29 soles para la construcción de los humedales, lo que representa el 1.9% del presupuesto que tuvo el proyecto del relleno sanitario de Anta. Las necesidades y costos de operación y mantenimiento de la propuesta son mínimos y no se requiere de personal altamente calificado. El área necesaria para la construir la propuesta es un 3.5% del área total del relleno sanitario, existiendo actualmente espacios sin uso proyectado, donde podría ser construida la propuesta.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que la administración del relleno sanitario de Anta tome medidas correctivas a las faltas identificadas en el proceso de compostaje. Para lo cual se deben incluir mediciones semanales de temperatura, pH y humedad. Así mismo, dependiendo de las condiciones de las pilas, se sugiere realizar volteos semanales en las primeras 3 o 4.
2. Para reducir los caudales producidos de lixiviado de compostaje en el relleno sanitario de Anta se recomienda colocar una cobertura encima de las pilas, en especial en época de lluvias. Así mismo, se recomienda la construcción de zanjas de coronación en la zona de compostaje para reducir la cantidad de agua que llega a las pilas de compostaje.
3. Se recomienda la elaboración de una guía metodológica para municipalidades distritales y provinciales, en el manejo de los lixiviados del proceso de compostaje y de las trincheras de los rellenos sanitarios, con el objetivo de evitar una inadecuada disposición y su repercusión en la contaminación ambiental y la afectación de la salud humana. Así mismo, se recomienda la creación de una normativa que establezca los límites máximos permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de lixiviados.
4. Se recomienda la incorporación de sistemas de tratamiento de lixiviados como un requisito para la aprobación de proyectos de rellenos sanitarios en el Perú. Como se ha concluido en la presente investigación, alternativas tecnológicas como los humedales construidos son viables y no suponen un incremento significativo de los presupuestos de construcción, operación y mantenimiento de un relleno sanitario. Tampoco se requiere un incremento significativo del área para su construcción.

5. En la aplicación del Sistema Francés para el tratamiento de lixiviados, se recomienda la implementación de una capa de sólidos (con restos orgánicos como hojas o tallos), en la superficie de las sub unidades de la primera etapa, en el punto donde son vertidos los afluentes. Esto debido durante el funcionamiento del piloto evaluado, no se identificó la capa de sólidos mencionada se forme naturalmente. Dicha capa es importante para el correcto funcionamiento de esta tecnología.

6. Se recomienda que la propuesta de aplicación a escala real de los humedales construidos para el tratamiento de lixiviados del compostaje en el relleno sanitario de Anta sea evaluada y tomada en cuenta como referencia por las autoridades de la Municipalidad Provincial de Anta, para la elaboración un expediente técnico y su posterior implementación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akratos, C; Pavlou, S; Sultana, MY; Vayenas, D. 2015. Constructed wetlands in the treatment of agro-industrial wastewater: A review. *Hemijaska industrija* (2)69: 127-142.
- Alvarez, D. 2014. Análisis de la gestión de los residuos municipales generados en un entorno metropolitano utilizando un enfoque multicriterio. Tesis Ph.D. Barcelona, España. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ambia, E; Farfan, M. 2012. Optimización por diseños experimentales del proceso de degradación aerobia de los lixiviados de Haquira. Tesis Lic. Cusco, Perú. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- American Society of Civil Engineers. 2008. Removal of Metals in Constructed Wetlands: Review. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management* (2)12: 96-101.
- Bakhshoodeh, R; Alavi, N; Monireh, M; Pooya, P. 2017. Compost leachate treatment by a pilot-scale subsurface horizontal flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 105: 7-14.
- Bakhshoodeh, R; Alavi, N; Oldham, C; Santos, R; Babaei, A; Vymazal, J; Paydary Pooya. 2020. Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146.
- Bertolino, R; Chidiak, M; Cinquangelis, S; Forgione, M; Fogwill, E. 2008. Participación ciudadana y gestión integral de residuos. *Ecoclubes*.
- Bohórquez, W. 2019. El proceso de compostaje. Universidad de La Salle. Ediciones Unisalle.

- Bulc, T. 2006. Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering* 26: 365-374.
- Campuzano, R; Gonzáles-Martínez, S. 2016. Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Management* 54: 3-12.
- Council of the European Union. 1999. Landfill Directive 1999/31/EC. Official Journal of the European Communities Legislation L182.
- Defensoría del Pueblo. 2019. Informe Defensorial N° 181. ¿Dónde va nuestra basura?: Recomendaciones para mejorar la gestión de los residuos sólidos.
- Delgadillo, O; Camacho, A; Pérez, L; Andrade, M. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua.
- Dotro, G; Langergraber, G; Molle, P; Nivala, J; Puigagut, J; Stein, O; Von Sperling, M. 2017. *Biological Wastewater Treatment Series: Volume Seven - Treatment Wetlands*. IWA Publishing.
- Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM. Diario El Peruano. Perú. 21 dic. 2017.
- Espinosa, M; López, M; Pellón, A; Robert, M; Diaz, S; Rodríguez, N; Fernández, A. 2010. Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de Residuos Sólidos Municipales de la ciudad de la Habana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 26(4).
- European Statistical Office - Eurostat. 2015. Each person in the EU generated 481 kg of municipal waste in 2013. Boletín 54/2015. Consultado 10 de ene. 2021. Disponible en <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-euro-indicators/-/8-26032015-ap>
- Government of British Columbia. 2016. *Guidance Documents & Guidelines: Summary of General Composting Best Management Practices*.

- Graziani, P. 2018. Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina. Caracas: CAF.
- Hoffman, H; Platzer, C; Winker, M. 2011. Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Agencia de Cooperación Internacional de Alemania – GIZ.
- Huamán, S; Jordán, J. 2013. Tratamiento de lixiviados de Jaquira con coagulantes naturales. Tesis Lic. Cusco, Perú. Universidad San Antonio Abad del Cusco.
- Huerta, O; López, M; Soliva, M; Zaloña, M. 2008. Compostaje de Residuos Municipales: Control del proceso, rendimiento y calidad del producto. Agència de Residus de Catalunya.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. 2020. Perú Anuario de Estadísticas Ambientales 2020. Consultado en 20 ene. 2021. Disponible en https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaes/Est/Lib1760/libro.pdf
- Jinadasa, K; Meetiayagoda, T; Jern Ng, W. 2018. Solid Waste (SW) Leachate Treatment using Constructed Wetland Systems. *In* Stefanakis, A (ed). Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment. John Wiley & Sons.
- Kadlec, R; Knight, R; Vymazal, J; Brix, H; Cooper, P; Haberl, R. 2000. Constructed Wetlands for Pollution Control. IWA Publishing.
- Kato, K; Koba, T; Ietsugu, H; Saigusa, T; Nozoe, T; Kobayashi, S; Yanagiya, S. 2006. Early performance of hybrid reed bed system to treat milking parlour wastewater in cold climate in Japan. 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control 2: 1111-1118.
- Lafrance, C; Lessard, P; Gerardo, B. 1996. Évaluation de la filtration sur tourbe et compost pour le traitement de l'effluent d'une usine de compostage de résidus verts. Canadian Journal of Civil Engineering 23.
- Laitinen, N; Luonsi, A; Vilen, J. 2006. Landfill leachate treatment with sequencing batch reactor and membrane bioreactor. Desalination (191): 86-91.

- Lastra, T. 2013. Caracterización experimental de la fracción orgánica triturada de los RSU para valorar su incorporación al agua residual y tratamiento de una EDAR. Tesis Mg. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia, España. Universitat Politècnica de València.
- Lombard, R; Molle, P. 2017. Constructed wetlands for domestic wastewater treatment under tropical climate. Guideline to design tropicalized systems. Agence française pour la biodiversité.
- Losada, J. 2009. Caracterización de los lixiviados generados en el proceso de compostaje provenientes de residuos orgánicos de plaza de mercado y su uso como complemento nutricional para cultivos hidropónicos. Tesis. Ing. Bogota, Colombia. Universidad de la Salle.
- Ministerio del Ambiente – MINAM. 2019. Reporte: Cusco: estadísticas ambientales, diciembre 2019. Sistema Nacional de Información Ambiental – SINIA.
- Ministerio del Ambiente – MINAM. 2021. Listado de rellenos sanitarios: Archivo 7 de julio de 2021 (en línea, sitio web). Consultado 2 de agosto de 2021. Disponible en <https://www.gob.pe/es/i/279709>.
- Mokhtarani, N; Bayatfard, A; Mokhtarani, B. 2012. Full scale performance of compost's leachate treatment by biological anaerobic reactors. *Waste Management & Research* (30)5: 524-529.
- Mohammadipour, Z; Enayatizamir, N; Ghezelbash, G; Moezzi, A. 2020. Bacterial Diversity and Chemical Properties of Wheat Straw-Based Compost Leachate and Screening of Cellulase Producing Bacteria. *Waste Biomass Valor* 12: 1293–1302.
- Molle, P; Liénard, A; Boutin, C; Merlin, G; Iewma, A. 2005. How to treat raw sewage with constructed wetlands: An overview of the French systems. *Water Science & Technology* (9)51:11-21.
- Mojiri, A; Ziyang, L; Tajuddin, R; Farraji, H; Alifar, N. 2016. Co-treatment of landfill leachate and municipal wastewater using the ZELIAC/zeolite constructed wetland system. *Journal of Environmental Management* 166: 124 – 130.

- Municipalidad Provincial de Anta. 2009. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto: Mejoramiento del Manejo Integral de los Residuos Sólidos del Distrito de Anta.
- Municipalidad Provincial de Anta. 2013. Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos – PIGARS ANTA. Cusco.
- Municipalidad Provincial de Anta. 2015. Expediente técnico: “Mejoramiento del sistema integral del manejo de residuos sólidos del distrito de Anta, provincia de Anta – Cusco”. Municipalidad Provincial de Anta.
- ONU Medio Ambiente. 2018. Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Ciudad de Panamá, Panamá.
- Pérez, C; Herrero, M. 2015. De residuo a recurso el camino hacia la sostenibilidad II 3 Procesos de biotransformación de la materia orgánica: Ingeniería y aspectos técnicos de la estabilización aeróbica. Mundi-Prensa.
- Pichtel, J. 2014. Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial. Taylor & Francis Group.
- Román, P; Martínez, M; Pantoja, A. 2013. Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Rocca, J. 2018. Evaluación ambiental del botadero de Haqira, distrito de Santiago-Cusco, mediante la metodología EVIAVE. Tesis bach. Universidad Nacional Federico Villareal.
- Roy, D; Azaïs, A; Benkaraache, S; Drogui, P; Tyagi, RD. 2018. Composting leachate: characterization, treatment, and future perspectives. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 17: 323 – 349.
- Stefanakis, A; Akrotos, C; Tsihrintzis, V. 2014. Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier.

- Vázquez, M.A; Varga, R; Plana, R; Soto, M. 2013. Vertical flow constructed wetland treating high strength wastewater from swine slurry composting. *Ecological Engineering* 50: 37-43.
- Wojciechowska, E. 2017. Potential and limits of landfill leachate treatment in a multi-stage subsurface flow constructed wetland – Evaluation of organics and nitrogen removal. *Bioresource Technology* 236: 146-154.
- Wong, M. (ed.). 2004. *Wetlands Ecosystems in Asia: Function and management. Developments in Ecosystems*. Elsevier Science. ISBN 9780444516916.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Galería fotográfica



Anexo 1.1. Trincheras del relleno sanitario de Anta



Anexo 1.2. Colección de *Schoenoplectus americanus* de humedal construido en la I.E. 50106 Haparquilla, para ser trasplantados al piloto de tratamiento



Anexo 1.3. Tanques de mezcla y tanque de bombeo de lixiviado diluido



Anexo 1.4. Controlador de carga, controlador de bombas, batería e inversor del sistema fotovoltaico del piloto



Anexo 1.5. Interfaz del software de bombeo del piloto de humedales



Anexo 1.6. Prueba de medición de caudal método volumétrico



Anexo 1.7. Medición de pH al ingreso del piloto (izquierda) y del efluente de humedal horizontal (derecha)



Anexo 1.8. Macrófitas en el mes de abril en la primera etapa del Sistema Francés (izquierda) y segunda etapa (derecha)

Anexo 2: Dimensionamiento del sistema piloto de humedales para el tratamiento de lixiviado de compostaje

Anexo 2.1. Caudal (Q) y relación lixiviado – agua gris

Se determinó que una relación de dilución de 1:5 para el lixiviado afluente al piloto. El caudal seleccionado inicialmente fue de 60 litros/día, por lo que por cada 10 litros de lixiviado se utilizó 50 de agua residual gris (proveniente del lavadero de los operadores del relleno sanitario).

Anexo 2.2. DBO₅ afluente esperado

El promedio de DBO₅ muestreado previo al dimensionamiento del sistema piloto fue de 3359.62 mg/l, considerando una dilución 1:5, se esperaría un promedio de 671.92 mg/l. Por lo que la carga orgánica esperada fue de 40.32 g/día.

Anexo 2.2.1. Caudal, DBO₅ y carga esperada

Parámetro	Unidad	Valor
Relación de lixiviado de compostaje a agua gris	-	1:5
Caudal de lixiviado de compostaje diluido (Q _i)	m ³ /d	0.06
DBO ₅ de lixiviado de compostaje diluido esperado	mg/l	671.92
Carga de DBO ₅ esperada (C)	g/día	40.32

Anexo 2.3. Dimensionamiento de la primera etapa del sistema francés

Anexo 2.3.1. Área requerida según carga hidráulica (A_{h1})

Dotro *et al.* (2017) establece que se debe cumplir con un área mínima, calculada a partir de la carga hidráulica mínima para este tipo de humedal. El cálculo del área se realiza dividiendo el caudal (Q_i) entre la carga hidráulica teórica (q) de 0.37 m³/m².d.

$$A_{h1} = \left(\frac{Q_i}{q} \right) = \left(\frac{0.06 \frac{m^3}{d}}{0.37 \frac{m^3}{m^2 * d}} \right) = 0.16 m^2$$

Anexo 2.3.2. Área requerida en función de la DBO₅ (A')

Al no contar con una carga superficial teórica del Sistema Francés aplicado a lixiviados, se tomó como referencia las siguientes experiencias:

- Hoffman (2011): Carga superficial de 30 a 35 g/m².d de DBO₅, para humedales verticales en el tratamiento de aguas residuales para climas cálidos.
- Bulc (2006): Carga superficial de 22.6 g/m².d de DBO₅, para un sistema compuesto de dos humedales verticales y uno horizontal para el tratamiento de lixiviado de relleno sanitario
- Wojciechowska (2017): Carga superficial de 48 g/m².d de DQO, para un sistema compuesto de dos humedales verticales y uno horizontal para el tratamiento de lixiviado de relleno sanitario

Se asumió una carga orgánica superficial en la primera etapa (c1) de 35gDBO/m².d. El cálculo del área requerida en función de la DBO₅ se realizó dividiendo la carga orgánica del afluente (C) entre la carga c1:

$$A' = \left(\frac{C}{c1} \right) = \left(\frac{40.32 \frac{g}{d}}{35 \frac{g}{m^2 * d}} \right) = 1.152 m^2$$

Para facilitar la construcción de las sub unidades se escogió utilizar Tanques IBC, los cuales tienen un área (A) de 1.20 m², largo (l) de 1.20 m, ancho (a) de 1.00 m y una altura (h) de 1.12 m. Considerando que la primera etapa estará compuesta por dos unidades (n), el área total de las tres unidades (At) de la primera etapa será de 3.60 m².

Anexo 2.3.3. Diseño de vertimientos en la primera etapa

Para facilitar los procesos construcción y operación del piloto se estableció realizar tres vertimientos diarios, por lo que el caudal por cada vertimiento (Vc) será:

$$Vc = \left(\frac{Qi}{Nv} \right) = \left(\frac{60 \frac{l}{d}}{3} \right) = 20 l/vertimiento$$

Se ha considerado la utilización de bombas con caudal (Q_b) fijo de 21 litros/min. Por lo que la duración de cada vertimiento (D_v) será determinada de la siguiente manera:

$$D_v = \left(\frac{V_c}{Q_b} \right) = \left(\frac{20 \frac{l}{carga}}{21 \frac{l}{min}} \right) = 57.12 \text{ segundos} \approx 1 \text{ minuto}$$

Para facilitar el manejo de las bombas durante la operación del sistema se redondeó la duración de cada vertimiento a un minuto.

Anexo 2.3.4. Carga aplicada y remoción de DBO₅ esperada

La carga superficial teoría a ser aplicada en la primera etapa del sistema francés es:

$$C_s = \left(\frac{DBO * Q}{A} \right) = \left(\frac{671.92 \frac{mg}{l} * 60 \frac{l}{d}}{1.20 \text{ m}^2} \right) = 33.59 \frac{g}{\text{m}^2 * d}$$

Se consideró las eficiencias de remoción de DBO₅ de lixiviados tratados con una configuración de dos humedales verticales y uno horizontal:

- Bulc (2006): Eficiencia de 59% para DBO₅.
- Wojciechoswska (2017): Eficiencia de entre 88% a 95% para DBO₅.

Se asumió una eficiencia global de 75%, por lo que se consideró un 50% de remoción en la primera etapa (Ef1) y 50% en la segunda etapa (Ef2). Se determinó la carga superficial a ser aplicada:

$$\begin{aligned} DBO(1era) &= (DBO * (100\% - Ef1)) = \left(671.92 \frac{mg}{l} * (100\% - 50\%) \right) \\ &= 335.962 \frac{mg}{l} \end{aligned}$$

La segunda etapa del sistema francés recibirá la carga orgánica:

$$C_s = (DBO * Q) = \left(335.96 \frac{mg}{l} * 60 \frac{l}{d} \right) = 20.16 \frac{g}{d}$$

Anexo 2.4. Dimensionamiento de la segunda etapa del Sistema Francés

Anexo 2.4.1. Área requerida en función de la DBO₅ (A')

Al no contar con una carga superficial típica para lixiviado de compostaje, se ha estimado una carga superficial en la primera (c2) etapa de 20 gDBO/m².d. El cálculo del área requerida en función de la DBO₅ (A') se realiza dividiendo la carga orgánica esperada (C_i) entre c2:

$$A' = \left(\frac{C}{c1} \right) = \left(\frac{20.16 \frac{g}{d}}{20 \frac{g}{m^2 * d}} \right) = 1.01 m^2$$

Para la construcción de las sub unidades se escogió utilizar Tanques IBC, los cuales tienen un largo (l) de 1.20 m, ancho (a) de 1.00 m y un área (A) de 1.20 m², por lo que se tiene un área extra de 0.19 m². Considerando que la primera etapa estará compuesta por dos unidades (n), el área total de las dos unidades (A_t) de la segunda etapa será de 2.40 m².

Anexo 2.4.2. Diseño de vertimientos en la segunda etapa

Para facilitar los procesos construcción y operación del piloto se estableció realizar tres vertimientos diarios, por lo que el caudal por cada vertimiento (V_c) será:

$$V_c = \left(\frac{Q_i}{N_v} \right) = \left(\frac{60 \frac{l}{d}}{3} \right) = 20 l/vertimiento$$

Se ha considerado la utilización de bombas con caudal (Q_b) fijo de 21 litros/min. Por lo que la duración de cada vertimiento (D_v) será determinada de la siguiente manera:

$$D_v = \left(\frac{V_c}{Q_b} \right) = \left(\frac{20 \frac{l}{carga}}{21 \frac{l}{min}} \right) = 0.952 minutos \approx 1 minuto$$

Para facilitar el manejo de las bombas durante la operación del sistema se redondeó la duración de cada vertimiento a un minuto.

Anexo 2.4.3. Remoción de DBO₅ esperada

Se consideró una eficiencia de 50% de remoción de DBO para esta etapa, por lo que el efluente tendrá una DBO₅:

$$DBO(2da) = (DBO(1era) * Ef2) = \left(335.96 \frac{mg}{l} * 50\% \right) = 167.98 \frac{mg}{l}$$

Por lo tanto, la carga de DBO₅ del efluente por área diaria (Cs1) será:

$$C2 = (DBO(2da) * Q) = \left(167.98 \frac{mg}{l} * 60 \frac{l}{d} \right) = 10.07 \frac{g}{d}$$

Anexo 2.5. Dimensionamiento del humedal horizontal

Se dimensionó con los métodos “Flujo pistón k-C*” y “P-k-C*”, de los resultados se escogió la mayor área requerida. Adicionalmente se verificó que la sección transversal no sobrepasara las cargas de sección transversal recomendadas para este tipo de humedal.

Anexo 2.5.1. Datos base para dimensionamiento

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal (Q)	m ³ /año	21.9
Concentración afluente	mg/l	167.98
K _A ⁽¹⁾	m/año	25
C _o ⁽²⁾	mg/l	35
C* ⁽³⁾	mg/l	10
Altura de sustrato	m	0.6
p ⁽⁴⁾	-	3

⁽¹⁾ En base a Kadlec y Wallace citados por Dotro *et al.* (2017) se utilizó un K_a (de percentil 50) para afluentes con concentraciones de entre 100 y 200 mg/l.

⁽²⁾ Debido a la alta carga orgánica se estableció como objetivo de tratamiento un efluente con DBO₅ de 35 mg/l

⁽³⁾ ⁽⁴⁾ En base a Kadlec y Wallace citados por Dotro *et al.* (2017) se utilizó una concentración de fondo y número de tanques en serie característico de los humedales horizontales.

Anexo 2.5.2. Método flujo pistón k-C*

Se utilizó la fórmula:

$$Area = -\frac{Q}{K_A} \ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_i - C^*}\right) = -\frac{21.9 \frac{m^3}{año}}{25 \frac{m}{año}} \ln\left(\frac{35 \frac{mg}{l} - 10 \frac{mg}{l}}{167.98 \frac{mg}{l} - 10 \frac{mg}{l}}\right) = 1.61 m^2$$

Anexo 2.5.3. Método flujo pistón P-k-C*

Se utilizó la fórmula:

$$Area = \frac{PQ}{K_A} \left(\left(\frac{C_o - C^*}{C_i - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right) = \frac{3 * 21.9 \frac{m^3}{año}}{25 \frac{m}{año}} \left(\left(\frac{167.98 \frac{mg}{l} - 10 \frac{mg}{l}}{35 \frac{mg}{l} - 10 \frac{mg}{l}} \right)^{1/3} - 1 \right) = 2.23 m^2$$

Anexo 2.5.4. Método flujo pistón P-k-C*

Se escogió el área 2.23 m² por lo que las dimensiones escogidas fueron:

Anexo 2.5.5. Datos base para dimensionamiento

Parámetro	Unidad	Valor
Largo	m	1.72
Ancho	m	1.30
Área	m ²	2.23

Anexo 2.5.6. Verificación de carga superficial de sección transversal

En función de las recomendaciones de Wallace y Knight citados por Dotro *et al.* (2017) se corroboró que la sección transversal no reciba una carga superficial que supere los 250 gDBO/m².d.



$$Sección transversal (St) = (Largo * Alto) = (1.30 * 0.60) = 0.78 m^2$$

$$Carga transversal = \left(\frac{C2}{St} \right) = \left(\frac{10.07 g/d}{0.78 m^2} \right) = 12.91 \frac{g}{m^2 * d}$$

El valor de carga transversal es adecuado, por lo tanto, se aceptan las dimensiones del Anexo 2.5.5.

Anexo 3: Resultados de muestreo de lixiviado y efluentes del sistema piloto de tratamiento

Anexo 3.1. Análisis de metales pesados en lixiviado previos al diseño

   				
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL-DA CON REGISTRO N° LE-072				
INFORME DE ENSAYO				
Nº de Referencia: A-16/52057 Descripción: CHACAN ANTA RELLENO SANITARIO	Tipo Muestra: Agua de Lixiviación Fecha Fin: 27/10/2016			
RESULTADOS ANALITICOS				
Parámetro	Resultado	Incert	Unidades	CMA
Formas Nitrogenadas/Fosforadas				
* Fosfatos	18,3	-	mg/L PO4-P	
Aniones -				
3 Nitratos	63,9	± 3 %	mg/L	
Metales Totales				
2 Aluminio Total	11,2	± 11 %	mg/L	
2 Antimonio Total	< 0,00002	± 10 %	mg/L	
2 Arsénico Total	0,18325	± 9 %	mg/L	
2 Bario Total	0,6335	± 7 %	mg/L	
2 Berilio Total	< 0,00001	± 15 %	mg/L	
2 Bismuto Total	< 0,00001	± 18 %	mg/L	
2 Boro Total	0,697	± 20 %	mg/L	
2 Cadmio Total	0,00109	-	mg/L	
2 Calcio Total	229	± 14 %	mg/L	
2 Cerio Total	0,02416	± 8 %	mg/L	
2 Cobalto Total	0,04303	± 8 %	mg/L	
2 Cobre Total	0,0823	± 7 %	mg/L	
2 Cromo Total	0,068	± 7 %	mg/L	
2 Estaño Total	< 0,0001	± 10 %	mg/L	
2 Estroncio Total	1,36598	± 17 %	mg/L	
2 Fósforo Total	22,1	± 17 %	mg/L	
2 Hierro Total	23,7	± 9 %	mg/L	
2 Litio Total	0,0313	± 11 %	mg/L	
2 Magnesio Total	135	± 11 %	mg/L	
2 Manganeso Total	2,23014	± 10 %	mg/L	
2 Mercurio Total	< 0,00007	± 19 %	mg/L	
2 Molibdeno Total	0,01715	± 5 %	mg/L	
2 Níquel Total	0,0953	± 7 %	mg/L	
2 Plata Total	< 0,00006	± 15 %	mg/L	
2 Plomo Total	0,02202	± 17 %	mg/L	
2 Potasio Total	> 2 000	± 13 %	mg/L	
2 Selenio Total	0,00991	± 9 %	mg/L	
2 Sodio Total	1 325	± 15 %	mg/L	
2 Talio Total	< 0,00001	± 16 %	mg/L	
2 Titanio Total	0,2310	± 8 %	mg/L	
2 Torio Total	< 0,00001	± 18 %	mg/L	
2 Uranio Total	< 0,00001	± 17 %	mg/L	
2 Vanadio Total	0,235	± 9 %	mg/L	
2 Wolframio Total	< 0,00002	± 12 %	mg/L	
2 Zinc Total	0,453	± 19 %	mg/L	
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como un certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.				
AGQ PERU, S.A.C. Av. Santa Rosa 511 La Perla - Callao Lima, Lima, PERU T: (511) 710 27 00 F: (511) 718 30 94 operacionesperu@agq.com.pe www.agqlabs.com				

Anexo 3.2. Análisis de afluentes y efluentes del piloto de tratamiento: 13/02/2019

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe



INFORME DE ENSAYO
 LLP-0376-2019
 SO-0108-2019

Pág 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/02/13
 Fecha de Ensayo: 2019/02/13

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/02/13
 Hora de toma de muestra: 11:30
 Procedencia de la Muestra: Tanque de Almacenamiento de Lixiviado diluido de Compost.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/02/20

Referencia: Nro. De Colación: 25A-02

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	4,5x10 ²

RESULTADOS QUÍMICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Sólidos totales en suspensión	mg/L	65,67
Conductividad	µS/cm	6175,0

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (NMP)
 Sólidos Totales en Suspensión
 Conductividad

ISO 15705:2001
 ISO 15705:2001
 2017 Standard Methods for the examination of Water and Wastewater 22nd EDITION, Conductivity Part 2519
 © Laboratory Method Page 254

Rosa Patricia Miranda Pacheco
 COORDINADORA TÉCNICA
 DIRECTORA TÉCNICA

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe



INFORME DE ENSAYO
 LLP-0377-2019
 SO-0108-2019

Pág 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/02/13
 Fecha de Ensayo: 2019/02/13

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/02/13
 Hora de toma de muestra: 11:40
 Procedencia de la Muestra: Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Francés - Primera Etapa.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/02/20

Referencia: Nro. De Colación: 25A-02

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	130

RESULTADOS QUÍMICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	264,89
DCO	mg/L	345,60
Sólidos totales en suspensión	mg/L	41,75
Conductividad	µS/cm	3675,0

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (NMP)
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)
 Demanda Química de Oxígeno (DCO)
 Sólidos Totales en Suspensión

ISO 15705:2001
 ISO 15705:2001
 2017 Standard Methods for the examination of Water and Wastewater 22nd EDITION, Conductivity Part 2519
 © Laboratory Method Page 254

Rosa Patricia Miranda Pacheco
 COORDINADORA TÉCNICA
 DIRECTORA TÉCNICA

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Urb. Velasco Astete D-18-B
 Wanchag - Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500 - 974787151
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe



INFORME DE ENSAYO
 LLP-0378-2019
 SO-0108-2019

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/02/13
 Fecha de Ensayo: 2019/02/13

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/02/13
 Hora de toma de muestra: 12:10
 Procedencia de la Muestra: Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Francés - Segunda Etapa.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 500ml, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/02/20

Referencia: Nro. De Colación: 25A-02

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	33

RESULTADOS QUÍMICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Sólidos totales en suspensión	mg/L	50,75
Conductividad	µS/cm	4622,0

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (NMP)
 Sólidos Totales en Suspensión
 Conductividad

ISO 15705:2001
 ISO 15705:2001
 2017 Standard Methods for the examination of Water and Wastewater 22nd EDITION, Conductivity Part 2519
 © Laboratory Method Page 254

Rosa Patricia Miranda Pacheco
 COORDINADORA TÉCNICA
 DIRECTORA TÉCNICA

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe



INFORME DE ENSAYO
 LLP-0379-2019
 SO-0108-2019

Pág 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/02/13
 Fecha de Ensayo: 2019/02/13

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/02/13
 Hora de toma de muestra: 12:24
 Procedencia de la Muestra: Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Humedal Horizontal.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/02/20

Referencia: Nro. De Colación: 25A-02

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	230

RESULTADOS QUÍMICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Sólidos totales en suspensión	mg/L	14,50
Conductividad	µS/cm	1186,0

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (NMP)
 Sólidos Totales en Suspensión
 Conductividad

ISO 15705:2001
 ISO 15705:2001
 2017 Standard Methods for the examination of Water and Wastewater 22nd EDITION, Conductivity Part 2519
 © Laboratory Method Page 254

Rosa Patricia Miranda Pacheco
 COORDINADORA TÉCNICA
 DIRECTORA TÉCNICA

Anexo 3.3. Análisis de afluentes y efluentes del piloto de tratamiento: 27/02/2019

laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 v. Tullumayo 768
 usco - Perú
 Teléfax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratoriolouispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO7
 LLP-0689-2019
 SO-0155-2019



Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/02/27
 Fecha de Ensayo: 2019/02/27

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS

Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/02/27
 Hora de toma de muestra: 13:35
 Procedencia de la Muestra: Tanque de Almacenamiento de lixiviado de Compost.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml estéril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/03/04
 Referencia: No. De Colección: 26A-02

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	3,3x10 ²

RESULTADOS QUÍMICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	506,27
DQO	mg/L	867,47
Sólidos totales en suspensión	mg/L	107,00
Conductividad	us/cm	8356

Métodos de Referencia:

Coliformes Fecales (NMP) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 9211-E-1, 23rd (2017)
 Método de Espectroscopía de Difracción (DQO) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 5210-B, 23rd Ed. (2017)
 Método Químico de Difracción (DQO) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 5210-C, 23rd Ed. (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 2540-G, 23rd Ed. (2017)

Rodríguez
 Dra. Rosa Luz Pacheco Romero
 C.B.P. N° 15

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.

Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Teléfax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratoriolouispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO7
 LLP-0688-2019
 SO-0155-2019



Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/02/27
 Fecha de Ensayo: 2019/02/27

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS

Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/02/27
 Hora de toma de muestra: 13:15
 Procedencia de la Muestra: Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Francés 1era Etapa.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml estéril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/03/04
 Referencia: No. De Colección: 26A-02

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	680

RESULTADOS QUÍMICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	239,89
DQO	mg/L	461,93
Sólidos totales en suspensión	mg/L	76,50
Conductividad	us/cm	4246

Métodos de Referencia:

Coliformes Fecales (NMP) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 9211-E-1, 23rd (2017)
 Método de Espectroscopía de Difracción (DQO) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 5210-B, 23rd Ed. (2017)
 Método Químico de Difracción (DQO) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 5210-C, 23rd Ed. (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 2540-G, 23rd Ed. (2017)

Rodríguez
 Dra. Rosa Luz Pacheco Romero
 C.B.P. N° 15

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.

Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Teléfax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratoriolouispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO7
 LLP-0687-2019
 SO-0155-2019



Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/02/27
 Fecha de Ensayo: 2019/02/27

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS

Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/02/27
 Hora de toma de muestra: 12:55
 Procedencia de la Muestra: Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Francés 2da Etapa.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml estéril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/03/04
 Referencia: No. De Colección: 26A-02

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	93

RESULTADOS QUÍMICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	110,28
DQO	mg/L	240,96
Sólidos totales en suspensión	mg/L	31,00
Conductividad	us/cm	3176

Métodos de Referencia:

Coliformes Fecales (NMP) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 9211-E-1, 23rd (2017)
 Método de Espectroscopía de Difracción (DQO) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 5210-B, 23rd Ed. (2017)
 Método Químico de Difracción (DQO) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 5210-C, 23rd Ed. (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 2540-G, 23rd Ed. (2017)

Rodríguez
 Dra. Rosa Luz Pacheco Romero
 C.B.P. N° 15

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.

Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Teléfax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratoriolouispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO7
 LLP-0686-2019
 SO-0155-2019



Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/02/27
 Fecha de Ensayo: 2019/02/27

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS

Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/02/27
 Hora de toma de muestra: 12:45
 Procedencia de la Muestra: Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Humedal Horizontal
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml estéril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/03/04
 Referencia: No. De Colección: 26A-02

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	2,0

RESULTADOS QUÍMICOS

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	56,62
DQO	mg/L	160,64
Sólidos totales en suspensión	mg/L	5,50
Conductividad	us/cm	2667

Métodos de Referencia:

Coliformes Fecales (NMP) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 9211-E-1, 23rd (2017)
 Método de Espectroscopía de Difracción (DQO) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 5210-B, 23rd Ed. (2017)
 Método Químico de Difracción (DQO) SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 5210-C, 23rd Ed. (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión SNEV09-APHA-AWWA-WEF Part 2540-G, 23rd Ed. (2017)

Rodríguez
 Dra. Rosa Luz Pacheco Romero
 C.B.P. N° 15

Anexo 3.4. Análisis de afluentes y efluentes del piloto de tratamiento: 15/03/2019

Laboratorio Luis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@luispasteur@yahoo.es
 www.lablouispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO7
 LLP-0823-2019
 SO-0204-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suro Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lavado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/03/15
 Fecha de Ensayo: 2019/03/15

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suro Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/03/15
 Hora de toma de muestra: 11:40
 Procedencia de la Muestra: PM1 - Tanque de Almacenamiento de liviado de compost diluido
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/03/22
 Referencia: No. De Colección: 43-02

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	1,1x10 ⁴

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	278,16
DQO	mg/L	774,19
Sólidos totales en suspensión	mg/L	106,26
Conductividad	us/cm	6138

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (CFU) NMP/100ml: NMP/100ml (ISO 9248:2013)
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)
 Sólidos Totales en Suspensión (ST) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)

Dr. Rosa Lina Pacheco Venero
 C.O.P. N° 19

Laboratorio Luis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@luispasteur@yahoo.es
 www.lablouispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO7
 LLP-0824-2019
 SO-0204-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suro Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lavado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/03/15
 Fecha de Ensayo: 2019/03/15

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suro Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/03/15
 Hora de toma de muestra: 11:56
 Procedencia de la Muestra: PM2 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Francés 1era Etapa
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/03/22
 Referencia: No. De Colección: 43-03

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	490

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	128,80
DQO	mg/L	358,06
Sólidos totales en suspensión	mg/L	58,75
Conductividad	us/cm	2380

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (CFU) NMP/100ml: NMP/100ml (ISO 9248:2013)
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)
 Sólidos Totales en Suspensión (ST) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)

Dr. Rosa Lina Pacheco Venero
 C.O.P. N° 19

Laboratorio Luis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@luispasteur@yahoo.es
 www.lablouispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO7
 LLP-0823-2019
 SO-0204-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suro Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lavado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/03/15
 Fecha de Ensayo: 2019/03/15

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suro Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/03/15
 Hora de toma de muestra: 11:55
 Procedencia de la Muestra: PM3 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Francés 2da Etapa
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/03/22
 Referencia: No. De Colección: 43-03

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	140

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	54,95
DQO	mg/L	193,87
Sólidos totales en suspensión	mg/L	44,00
Conductividad	us/cm	1316

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (CFU) NMP/100ml: NMP/100ml (ISO 9248:2013)
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)
 Sólidos Totales en Suspensión (ST) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)

Dr. Rosa Lina Pacheco Venero
 C.O.P. N° 19

Laboratorio Luis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@luispasteur@yahoo.es
 www.lablouispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO7
 LLP-0822-2019
 SO-0204-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suro Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lavado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/03/15
 Fecha de Ensayo: 2019/03/15

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suro Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/03/15
 Hora de toma de muestra: 11:40
 Procedencia de la Muestra: PM4 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Humedal Horizontal
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/03/22
 Referencia: No. De Colección: 43-03

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	79

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	42,38
DQO	mg/L	61,28
Sólidos totales en suspensión	mg/L	9,50
Conductividad	us/cm	985,9

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (CFU) NMP/100ml: NMP/100ml (ISO 9248:2013)
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)
 Sólidos Totales en Suspensión (ST) SPM/100ml: SPM/100ml (ISO 15705:2015)

Dr. Rosa Lina Pacheco Venero
 C.O.P. N° 19

Anexo 3.5. Análisis de afluentes y efluentes del piloto de tratamiento: 27/03/2019

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO 7
 LLP-0978-2019
 SO-0248-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/03/27
 Fecha de Ensayo: 2019/03/27


INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/03/27
 Hora de toma de muestra: 12:50
 Procedencia de la Muestra: PM1 - Tanque de Almacenamiento de Lixiviado diluido de Compost.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/04/02
 Referencia: No. De Certificación: 82-03

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	490

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	301.97
DQO	mg/L	734.69
Sólidos totales en suspensión	mg/L	170.50
Conductividad	us/cm	5201

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (MMP) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1221 E.1. 294 (2017)
 Determinación de Oxígeno Disuelto (DQO) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1210 B. 294 E.1 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión (STO) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1222 C. 294 E.1 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1240 D. 294 E.1 (2017)

Dra. Rosa Luz Pacheco Venero
 CBR N° 15



Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO 7
 LLP-0977-2019
 SO-0248-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/03/27
 Fecha de Ensayo: 2019/03/27

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/03/27
 Hora de toma de muestra: 12:55
 Procedencia de la Muestra: PM2 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Frances 1era Etapa.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/04/02
 Referencia: No. De Certificación: 82-03

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	230

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	193.37
DQO	mg/L	359.18
Sólidos totales en suspensión	mg/L	128.99
Conductividad	us/cm	2090

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (MMP) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1221 E.1. 294 (2017)
 Determinación de Oxígeno Disuelto (DQO) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1210 B. 294 E.1 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión (STO) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1222 C. 294 E.1 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1240 D. 294 E.1 (2017)

Dra. Rosa Luz Pacheco Venero
 CBR N° 15



Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO 7
 LLP-0976-2019
 SO-0248-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/03/27
 Fecha de Ensayo: 2019/03/27

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/03/27
 Hora de toma de muestra: 12:15
 Procedencia de la Muestra: PM3 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Frances 2da Etapa.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/04/02
 Referencia: No. De Certificación: 82-03

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	78

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	125.82
DQO	mg/L	212.24
Sólidos totales en suspensión	mg/L	105.42
Conductividad	us/cm	1154

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (MMP) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1221 E.1. 294 (2017)
 Determinación de Oxígeno Disuelto (DQO) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1210 B. 294 E.1 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión (STO) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1222 C. 294 E.1 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1240 D. 294 E.1 (2017)

Dra. Rosa Luz Pacheco Venero
 CBR N° 15



Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO 7
 LLP-0975-2019
 SO-0248-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/03/27
 Fecha de Ensayo: 2019/03/27

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/03/27
 Hora de toma de muestra: 12:00
 Procedencia de la Muestra: PM4 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Humedal Horizontal.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/04/02
 Referencia: No. De Certificación: 82-03

RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	43

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	32.12
DQO	mg/L	48.98
Sólidos totales en suspensión	mg/L	5.50
Conductividad	us/cm	628.9

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (MMP) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1221 E.1. 294 (2017)
 Determinación de Oxígeno Disuelto (DQO) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1210 B. 294 E.1 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión (STO) S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1222 C. 294 E.1 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión S02/001 AFPA-AWAWA/057 Par 1240 D. 294 E.1 (2017)

Dra. Rosa Luz Pacheco Venero
 CBR N° 15



Anexo 3.6. Análisis de afluentes y efluentes del piloto de tratamiento: 10/04/2019

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO 7
 LLP-1116-2019
 SO-0307-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/04/10
 Fecha de Ensayo: 2019/04/10

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/04/10
 Hora de toma de muestra: 12:05
 Procedencia de la Muestra: PM1 - Tanque de Almacenamiento de lixiviado de compost cluido
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/04/17
 Referencia: No. De Cotización: 43-03

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	2,3x10 ³

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	397,66
DQO	mg/L	926,83
Sólidos totales en suspensión	mg/L	286,50
Conductividad	µs/cm	5615

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (NMP): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 9221 E.1, 23rd (2017)
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 5212 C. 204 E.4 (2017)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 5212 C. 234 E.6 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión: SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 2540 D. 234 E.6 (2017)

Dra. Rosa Luz Pacheco Venier
 C.B.P. N° 15

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO 7
 LLP-1115-2019
 SO-0307-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/04/10
 Fecha de Ensayo: 2019/04/10

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/04/10
 Hora de toma de muestra: 12:05
 Procedencia de la Muestra: PM2 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Francos ters Elipa
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/04/17
 Referencia: No. De Cotización: 43-03

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	540

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	207,61
DQO	mg/L	575,61
Sólidos totales en suspensión	mg/L	137,75
Conductividad	µs/cm	3920

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (NMP): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 9221 E.1, 23rd (2017)
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 5212 C. 204 E.4 (2017)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 5212 C. 234 E.6 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión: SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 2540 D. 234 E.6 (2017)

Dra. Rosa Luz Pacheco Venier
 C.B.P. N° 15

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO 7
 LLP-1114-2019
 SO-0307-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/04/10
 Fecha de Ensayo: 2019/04/10

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/04/10
 Hora de toma de muestra: 12:05
 Procedencia de la Muestra: PM3 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Francos 2da Elipa
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/04/17
 Referencia: No. De Cotización: 43-03

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	130

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	101,32
DQO	mg/L	263,41
Sólidos totales en suspensión	mg/L	64,50
Conductividad	µs/cm	2351

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (NMP): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 9221 E.1, 23rd (2017)
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 5212 C. 204 E.4 (2017)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 5212 C. 234 E.6 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión: SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 2540 D. 234 E.6 (2017)

Dra. Rosa Luz Pacheco Venier
 C.B.P. N° 15

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tullumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO 7
 LLP-1113-2019
 SO-0307-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/04/10
 Fecha de Ensayo: 2019/04/10

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/04/10
 Hora de toma de muestra: 12:05
 Procedencia de la Muestra: PM4 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Humedal Horizontal.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml esteril, Frasco de polietileno de 250ml, 500ml, 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/04/17
 Referencia: No. De Cotización: 43-03

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
Coliformes Fecales	NMP/100ml	23

Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	88,41
DQO	mg/L	107,32
Sólidos totales en suspensión	mg/L	8,50
Conductividad	µs/cm	866,7

Métodos de Referencia:
 Coliformes Fecales (NMP): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 9221 E.1, 23rd (2017)
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 5212 C. 204 E.4 (2017)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO): SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 5212 C. 234 E.6 (2017)
 Sólidos Totales en Suspensión: SNE/WH-APHA-AJWA-WEF Part 2540 D. 234 E.6 (2017)

Dra. Rosa Luz Pacheco Venier
 C.B.P. N° 15

Anexo 3.7. Análisis de afluentes y efluentes del piloto de tratamiento: 30/04/2019

Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO
 LLP-1411-2019
 SO-0410-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/04/30
 Fecha de Ensayo: 2019/04/30


INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/04/30
 Hora de toma de muestra: 09:00
 Procedencia de la Muestra: PM1 - Tanque de Almacenamiento de lixiviado de compost diluido
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml y 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/05/07
 Referencia: No. De Cotización: 131-04

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	541,04
DQO	mg/L	979,92

Métodos de Referencia:
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

SMEVIA-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 22nd Ed. (2017)
 SMEVIA-APHA-AWWA-WEF Part 5205 C, 23rd Ed. (2017)

R. Pacheco
 Dra. Rosa Luz Pacheco Venet
 CBP N° 15



Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO
 LLP-1412-2019
 SO-0410-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/04/30
 Fecha de Ensayo: 2019/04/30

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/04/30
 Hora de toma de muestra: 08:35
 Procedencia de la Muestra: PM2 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Frances 1era Etapa.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml y 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/05/07
 Referencia: No. De Cotización: 131-04

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	297,34
DQO	mg/L	658,63

Métodos de Referencia:
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

SMEVIA-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 22nd Ed. (2017)
 SMEVIA-APHA-AWWA-WEF Part 5205 C, 23rd Ed. (2017)

R. Pacheco
 Dra. Rosa Luz Pacheco Venet
 CBP N° 15



Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO
 LLP-1413-2019
 SO-0410-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/04/30
 Fecha de Ensayo: 2019/04/30

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/04/30
 Hora de toma de muestra: 08:15
 Procedencia de la Muestra: PM3 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Sistema Frances 2da Etapa.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml y 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/05/07
 Referencia: No. De Cotización: 131-04

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	165,56
DQO	mg/L	414,46

Métodos de Referencia:
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

SMEVIA-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 22nd Ed. (2017)
 SMEVIA-APHA-AWWA-WEF Part 5205 C, 23rd Ed. (2017)

R. Pacheco
 Dra. Rosa Luz Pacheco Venet
 CBP N° 15



Laboratorio Louis Pasteur S.R.Ltda.
 Av. Tulumayo 768
 Cusco - Perú
 Telefax: 084-234727
 Celular: 975 713500
 RPC: 974787 151
 RPM: # 713522
 laboratorio@louispasteur@yahoo.es
 www.louispasteur.pe

INFORME DE ENSAYO
 LLP-1414-2019
 SO-0410-2019

LABORATORIO LOUIS PASTEUR

Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
 Solicitante: Diego Enrique Suero Sanchez
 Dirección Legal: Jr. Loreto 104 - Dpto. 302 - Santa Patricia - La Molina - Lima.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
 Nombre del Producto: Lixiviado
 Fecha de Ingreso de Muestra: 2019/04/30
 Fecha de Ensayo: 2019/04/30


INFORMACIÓN DE LA MUESTRA Y REPORTE DE RESULTADOS
 Toma de muestra realizada por: Sr. Diego Enrique Suero Sanchez
 Fecha de Toma de Muestra: 2019/04/30
 Hora de toma de muestra: 08:00
 Procedencia de la Muestra: PM4 - Tanque de Almacenamiento de Efluentes de Humedal Horizontal.
 Cantidad y Descripción de la Muestra: Frasco de polietileno de 250ml y 1L, transportados en cadena de frío.
 Fecha de Emisión de Informe de Ensayo: 2019/05/07
 Referencia: No. De Cotización: 131-04

RESULTADOS QUÍMICOS		
Ensayo(s)	Unidad	Resultado(s)
DBO ₅	mg/L	54,30
DQO	mg/L	96,39

Métodos de Referencia:
 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)
 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

SMEVIA-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 22nd Ed. (2017)
 SMEVIA-APHA-AWWA-WEF Part 5205 C, 23rd Ed. (2017)

R. Pacheco
 Dra. Rosa Luz Pacheco Venet
 CBP N° 15



Anexo 4: Desarrollo vegetativo en sistema piloto de tratamiento

Anexo 4.1. Sistema Francés – Número de hojas y tallos

Unidad	Código	Número de hojas										Número de tallos									
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
CF 1-1	A	1	1	1	2	4	4	5	6	6	6	2	3	2	3	6	8	9	10	10	10
	B	1	1	1	2	3	3	3	3	4	5	2	2	2	3	4	5	5	5	6	6
	C	1	2	2	1	2	3	3	3	4	5	2	3	2	2	4	7	6	6	7	8
	D	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	3	2	3	4	4	4	4	4	4	6
CF 1-2	A	1	2	2	4	5	5	4	4	5	5	1	3	4	5	8	9	8	8	9	9
	B	1	2	2	3	4	3	3	3	4	4	1	4	4	5	4	5	5	5	6	6
	C	2	2	2	3	3	4	4	4	5	6	4	4	4	5	6	8	8	8	9	10
	D	1	1	1	3	4	5	5	6	6	6	1	1	3	6	8	10	11	11	12	12
CF 1-3	A	1	2	3	2	2	2	2	1	2	3	1	2	3	2	2	2	1	1	2	4
	B	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	5	5	5	4	3	3	4	4
	C	1	2	2	3	5	6	5	5	6	6	2	2	3	6	8	9	9	9	10	10
	D	2	2	3	5	8	9	9	9	9	9	2	2	6	8	12	15	15	16	16	15
CF 2-1	A	1	1	2	3	4	5	5	5	6	6	2	2	3	3	7	8	7	7	8	8
	B	1	1	1	3	4	5	6	7	7	8	2	1	2	5	7	8	10	11	11	12
	C	1	1	3	4	4	4	5	5	6	6	1	1	5	6	8	8	9	9	10	10
	D	1	1	3	4	6	6	6	6	7	8	2	1	5	7	11	11	11	11	12	13
CF 2-2	A	2	2	3	4	4	4	5	5	5	6	2	3	4	5	7	7	7	7	8	8
	B	2	2	3	4	4	5	5	5	6	6	3	3	4	5	7	8	7	7	8	8
	C	1	1	1	3	1	2	3	4	5	5	1	2	1	2	2	3	5	6	8	8
	D	1	4	5	5	5	5	5	4	5	7	2	5	6	7	7	7	8	8	8	9

S=Semana

Anexo 4.2. Sistema Francés - Crecimiento semanal

Unidad	Código	Cambio en el tamaño de tallo y hoja (cm)									
		S1 a S2	S2 a S3	S3 a S4	S4 a S5	S5 a S6	S6 a S7	S7 a S8	S8 a S9	S9 a S10	
CF 1-1	A	3.0	1.0	1.5	1.9	3.7	2.6	2.8	2.0	2.2	
	B	0.0	1.0	1.0	3.6	0.4	5.1	4.6	1.8	2.6	
	C	1.0	1.0	1.5	3.9	0.9	0.0	1.9	1.1	2.4	
	D	3.0	3.0	1.5	4.0	1.0	0.6	1.1	1.9	1.9	
CF 1-2	A	4.0	5.5	6.0	7.0	5.1	3.3	3.9	4.8	4.1	
	B	5.5	3.5	0.6	1.0	1.3	0.0	1.2	2.7	0.8	
	C	3.5	2.0	2.8	2.2	2.2	0.0	2.8	2.3	3.8	
	D	1.0	2.0	1.5	5.2	4.0	1.0	2.0	2.2	1.7	
CF 1-3	A	2.0	1.0	0.3	2.3	0.5	0.0	1.0	1.5	1.5	
	B	5.5	4.0	5.9	4.1	4.7	0.0	0.5	4.2	4.4	
	C	6.0	7.0	0.4	4.6	3.3	2.5	2.2	5.5	5.5	
	D	3.3	2.0	1.7	2.7	6.4	3.5	3.7	3.4	3.1	
CF 2-1	A	5.0	6.0	3.4	3.4	0.7	0.0	1.4	3.4	2.3	
	B	6.0	2.0	0.9	1.6	2.5	1.2	0.8	1.8	1.9	
	C	6.0	4.3	1.7	6.8	3.6	1.6	1.9	4.0	2.7	
	D	3.5	5.0	5.8	5.2	4.7	1.5	1.8	3.5	4.0	
CF 2-2	A	6.0	4.0	1.7	4.3	4.5	1.8	2.2	3.1	3.4	
	B	1.5	3.1	3.0	2.0	1.4	3.4	3.6	1.7	2.5	
	C	3.0	1.5	2.2	1.8	0.5	2.6	1.9	1.9	2.5	
	D	5.0	2.5	1.6	2.4	3.0	1.1	0.0	3.3	2.5	

Anexo 4.3. Humedal Horizontal - Número de tallos

Nº	Código	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10
1	E	1	2	3	4	4	5	5	6	7	8
2	F	1	2	2	3	3	4	4	3	4	5
3	G	1	2	3	4	5	5	5	5	6	6
4	H	2	4	6	7	7	7	6	6	6	7
5	I	3	3	3	4	5	6	7	9	10	11
6	J	2	3	4	5	4	4	4	4	4	5
7	K	2	2	3	4	3	4	3	3	3	4
8	L	1	1	3	3	3	4	4	5	5	6
9	M	1	1	1	2	2	3	3	4	4	4

Anexo 4.4. Humedal horizontal - Número de hojas

Nº	Código	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10
1	E	1	3	5	6	6	7	8	10	11	12
2	F	1	2	2	4	5	6	5	5	6	7
3	G	1	3	4	5	6	7	6	6	7	7
4	H	2	7	10	11	11	13	11	9	9	10
5	I	3	3	3	5	8	11	13	15	16	17
6	J	2	4	6	7	7	7	6	6	6	7
7	K	2	2	3	5	4	4	4	4	4	5
8	L	1	2	6	7	8	8	9	9	9	10
9	M	1	1	2	3	3	4	5	6	6	6

Anexo 4.5. Humedal horizontal - Crecimiento semanal

Nº	Código	Cambio en el tamaño de tallo y hoja (cm)								
		Semana 1 a 2	Semana 2 a 3	Semana 3 a 4	Semana 4 a 5	Semana 5 a 6	Semana 6 a 7	Semana 7 a 8	Semana 8 a 9	Semana 9 a 10
1	E	2	2	0.6	0.4	3	5.2	1.8	2.1	3
2	F	2.7	4.5	3.9	2.1	2.8	2.2	1.6	2.7	2.2
3	G	0.5	6	3	6.5	3.5	2.2	1.8	3.4	2.6
4	H	0.9	4.5	0.6	1.5	1.8	3.2	3.4	2.2	2.7
5	I	3.5	3	5	1.8	2.7	0.9	0.6	2.6	1.5
6	J	2.5	1.9	0.6	3.1	5	1.9	2.5	2.4	3
7	K	1.5	3.8	3.2	1	1.7	2.15	2.15	2.2	2
8	L	1.1	0.9	2.2	1.1	2.7	2.4	2.6	1.9	2.6
9	M	0.7	1.6	1.8	0.6	0.6	0.6	0.5	1	0.5

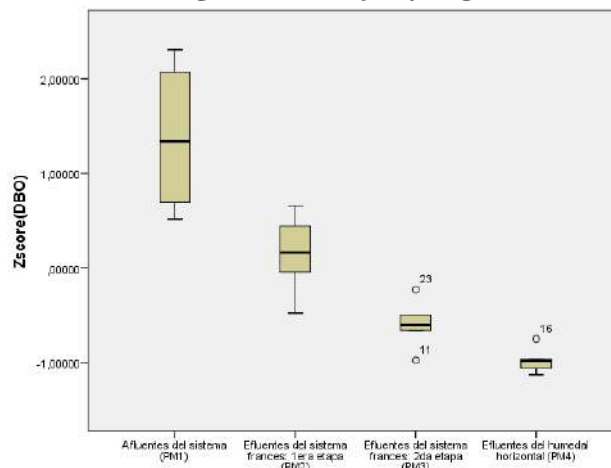
Anexo 5: Análisis estadístico de resultado de muestreos del sistema piloto de tratamiento

Anexo 5.1. Análisis de DBO₅

Anexo 5.1.1. Estadística descriptiva de DBO₅

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo	Varianza entre-componente
					Límite inferior	Límite superior			
Afluentes del sistema (PM1)	5	404,8190	110,35661	52,93068	257,6509	551,5771	276,15	541,04	
Efluentes del sistema frances: 1era etapa (PM2)	6	221,9833	59,24307	24,18588	159,8115	284,1551	128,80	297,34	
Efluentes del sistema frances: 2da etapa (PM3)	5	111,5840	40,09193	17,92966	61,8033	161,3647	54,96	165,56	
Efluentes del humedal horizontal (PM4)	5	54,7660	21,22397	9,49165	29,4130	81,1190	32,12	88,41	
Total	21	199,3686	148,08756	32,31535	131,9599	266,7772	32,12	541,04	
Modelo									
Efectos fijos			69,37245	15,13831	167,4295	231,3076			
Efectos aleatorios			75,58216	75,58216	-41,1675	439,9047			21785,76694

Anexo 5.1.2. Diagrama de cajas y bigotes de DBO₅



Anexo 5.1.3. Análisis de Varianza (ANOVA) para DBO₅

Hipótesis H₀: PM1 = PM2 = PM3 = PM4 Pr(>F) > 0.05

Hipótesis H₁: al menos uno es diferente Pr(>F) ≤ 0.05

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	(Combinado)	356785,378	3	118928,459	24,712	,000
	Término lineal					
	No ponderados	339200,767	1	339200,767	70,483	,000
	Ponderados	335804,283	1	335804,283	69,777	,000
	Desviación	20981,094	2	10490,547	2,180	,144
Dentro de grupos		81813,131	17	4812,537		
Total		438598,508	20			

Prueba de homogeneidad de varianzas

DBO

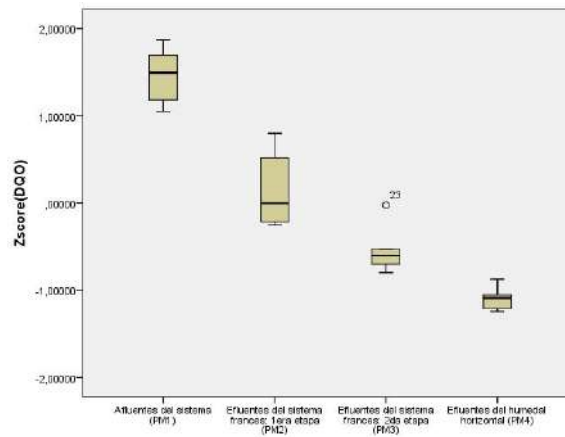
Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
5,534	3	17	,008

Anexo 5.2. Análisis de DQO

Anexo 5.2.1. Estadística descriptiva de DQO

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo	Varianza entre-componentes
					Límite inferior	Límite superior			
Afluentes del sistema (PM1)	5	856,6200	102,36172	45,77755	729,5211	983,7189	734,69	979,92	
Efluentes del sistema frances: 1era etapa (PM2)	6	463,3350	132,11797	53,93694	324,6857	601,9843	345,60	659,63	
Efluentes del sistema frances: 2da etapa (PM3)	5	262,9880	89,81118	40,16478	151,4727	374,5033	183,87	414,46	
Efluentes del humedal horizontal (PM4)	5	95,1240	43,66180	19,52615	40,9107	149,3373	49,98	160,64	
Total	21	421,6033	298,70233	65,18219	285,6357	667,5710	49,98	979,92	
Modelo									
Efectos fijos			99,72819		375,6885	467,5181			
Efectos aleatorios				160,84098	-90,2644	933,4711			100898,4744

Anexo 5.2.2. Diagrama de cajas y bigotes de DQO



Anexo 5.2.3. Análisis de Varianza (ANOVA) para DQO

Hipótesis H₀: PM1 = PM2 = PM3 = PM4 Pr(>F) > 0.05

Hipótesis H₁: al menos uno es diferente Pr(>F) ≤ 0.05

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	(Combinado)	1615384,589	3	538461,530	54,140	,000
	Término lineal					
	No ponderados	1556572,683	1	1556572,683	156,507	,000
	Ponderados	1539328,023	1	1539328,023	154,773	,000
	Desviación	76056,565	2	38028,283	3,824	,043
Dentro de grupos		169077,090	17	9945,711		
Total		1784461,678	20			

Prueba de homogeneidad de varianzas

DQO

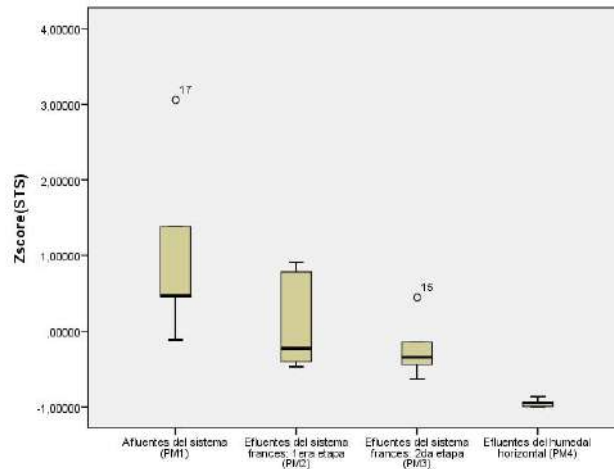
Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
2,427	3	17	,101

Anexo 5.3. Análisis de STS

Anexo 5.3.1. Estadística descriptiva de STS

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo	Varianza entre-componente
					Límite inferior	Límite superior			
Afluentes del sistema (PM1)	5	147,3840	86,20504	38,55206	40,3463	254,4217	66,67	286,50	
Efluentes del sistema frances: 1era etapa (PM2)	5	82,7480	46,72847	20,89761	24,7269	140,7691	41,75	137,75	
Efluentes del sistema frances: 2da etapa (PM3)	5	59,1340	38,55713	12,77114	23,6756	94,5924	31,00	105,42	
Efluentes del humedal horizontal (PM4)	5	8,7000	3,70136	1,55529	4,1042	13,2958	5,50	14,50	
Total	20	74,4915	69,39800	15,51787	42,0122	108,9708	5,50	286,50	
Modelo									
Efectos fijos			61,09811	11,42589	50,2697	98,7133			
Efectos aleatorios				28,79026	-17,1288	166,1118			2793,08346

Anexo 5.3.2. Diagrama de cajas y bigotes de STS



Anexo 5.3.3. Análisis de Varianza (ANOVA) para STS

Hipótesis H₀: PM1 = PM2 = PM3 = PM4 Pr(>F) > 0.05

Hipótesis H₁: al menos uno es diferente Pr(>F) ≤ 0.05

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	(Combinado)	49729,303	3	16576,434	6,349	,005
	Término lineal	48326,548	1	48326,548	18,509	,001
	Desviación	1402,755	2	701,378	,269	,768
Dentro de grupos		41776,273	16	2611,017		
Total		91505,576	19			

Prueba de homogeneidad de varianzas

STS

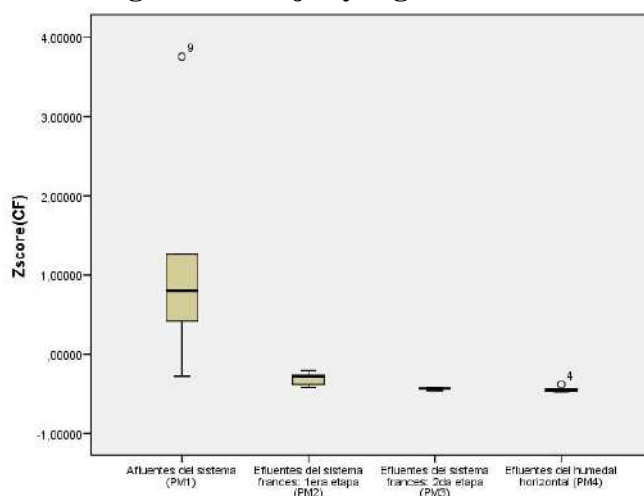
Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
5,525	3	16	,008

Anexo 5.4. Análisis de coliformes fecales

Anexo 5.4.1. Estadística descriptiva de coliformes fecales

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo	Varianza entre-componente
					Límite inferior	Límite superior			
Afuente del sistema (PM1)	5	4316,0000	4013,66597	1795,05543	-865,8729	9301,8729	490,00	11000,00	
Efuente del sistema frances: 1era etapa (PM2)	5	414,0000	227,44230	101,71529	131,5931	696,4069	130,00	680,00	
Efuente del sistema frances: 2da etapa (PM3)	5	94,8000	42,97325	19,21822	41,4417	148,1583	33,00	140,00	
Efuente del humedal horizontal (PM4)	5	73,4000	92,50027	41,36738	-41,4543	168,2543	2,00	230,00	
Total	20	1225,0500	2603,96999	582,26539	6,3545	2443,7455	2,00	11000,00	
Modelo									
Efectos fijos			2010,79916	449,62836	271,8805	2178,2195			
Efectos aleatorios				1033,92072	-2065,3472	4515,4472			3467305,547

Anexo 5.4.2. Diagrama de cajas y bigotes de coliformes fecales



Anexo 5.4.3. Análisis de Varianza (ANOVA) para coliformes fecales

Hipótesis H_0 : $PM1 = PM2 = PM3 = PM4$ $Pr(>F) > 0,05$

Hipótesis H_1 : al menos uno es diferente $Pr(>F) \leq 0,05$

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	(Combinado)	64139522,95	3	21379840,98	5,288	,010
	Término lineal	42595202,25	1	42595202,25	10,535	,005
	Desviación	21544320,70	2	10772160,35	2,664	,100
Dentro de grupos		64693012,00	16	4043313,250		
Total		128832534,9	19			

Prueba de homogeneidad de varianzas

CF

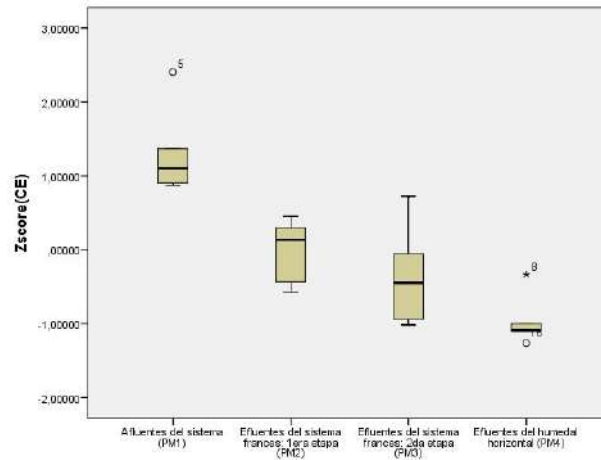
Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
5,257	3	16	,010

Anexo 5.5. Análisis de conductividad eléctrica

Anexo 5.5.1. Estadística descriptiva de conductividad eléctrica

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo	Varianza entre-componente
					Límite inferior	Límite superior			
Afluentes del sistema (PM1)	5	6097,0000	1326,90901	594,30573	4446,9428	7747,0572	5139,00	8356,00	
Efluentes del sistema frances: 1era etapa (PM2)	5	3242,2000	956,08336	427,12626	2056,3074	4428,0926	2090,00	4249,00	
Efluentes del sistema frances: 2da etapa (PM3)	5	2564,2000	1504,91634	673,01905	695,5995	4432,8004	1154,00	4822,00	
Efluentes del humedal horizontal (PM4)	5	1276,9000	759,55939	339,68529	333,7825	2220,0175	629,90	2587,00	
Total	20	3295,0750	2107,42394	471,23432	2308,7702	4281,3798	629,90	8356,00	
Modelo									
Efectos fijos			1174,72171	262,67576	2738,2273	3851,9227			
Efectos aleatorios				1019,01865	52,1029	6538,0471			3877601,804

Anexo 5.5.2. Diagrama de cajas y bigotes de conductividad eléctrica



Anexo 5.5.3. Análisis de Varianza (ANOVA) para conductividad eléctrica

Hipótesis H_0 : $PM1 = PM2 = PM3 = PM4$ $Pr(>F) > 0.05$

Hipótesis H_1 : al menos uno es diferente $Pr(>F) \leq 0.05$

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	(Combinado)	62303940,34	3	20767980,11	15,050	,000
	Término lineal	57292031,72	1	57292031,72	41,517	,000
	Desviación	5011908,615	2	2505954,308	1,816	,195
Dentro de grupos		22079537,46	16	1379971,091		
Total		84383477,80	19			

Prueba de homogeneidad de varianzas

CE

Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
,837	3	16	,493

Anexo 6: Dimensionamiento de propuesta para el relleno sanitario de Anta

El caudal para el diseño fue de 2000 litros por día, de los cuales 330.0 litros/día son de lixiviado y 1670.0 litros/día de dilución. La concentración de DBO₅ utilizada fue de 514.04 mg/l, este valor fue el mayor obtenido durante los muestreos de lixiviado diluido.

Anexo 6.1. Dimensionamiento del Sistema Francés primera etapa

Anexo 6.1.1. Área requerida según carga hidráulica (Ah₁)

El cálculo del área se realizó dividiendo el caudal (Qi) entre la carga hidráulica teórica (q).

$$Ah_1 = \left(\frac{Qi}{q} \right) = \left(\frac{2.0 \frac{m^3}{d}}{0.37 \frac{m^3}{m^2 * d}} \right) = 5.41 m^2$$

Anexo 6.1.2. Área requerida en función de la DBO₅ (A')

El cálculo del área requerida en función de la DBO₅ se realizó dividiendo la carga orgánica esperada (C) entre la carga orgánica aplicada en el piloto (c1) como se muestra en la siguiente formula:

$$A' = \left(\frac{C}{c1} \right) = \left(\frac{1082.08 \frac{g}{d}}{22.69 \frac{g}{m^2 * d}} \right) = 47.69 m^2$$

Considerando un largo y ancho con las mismas dimensiones:

$$\text{Largo (l)} = \text{ancho (a)} = \sqrt{47.69} = 6.91 \approx 7.0 \text{ m}$$

Por lo tanto, la nueva área por sub unidad de tratamiento será:

$$\text{Área (A)} = 7.0 \times 7.0 = 49 m^2$$

Anexo 6.1.3. Diseño de vertimientos en la primera etapa

Para facilitar los procesos construcción y operación del piloto se estableció realizar tres vertimientos diarios, por lo que el caudal por cada vertimiento (V_c) será:

$$V_c = \left(\frac{Q_i}{N_v} \right) = \left(\frac{2000 \frac{l}{d}}{3} \right) = 666.667 \text{ l/vertimiento}$$

Considerando que según Dotro *et al.* (2017) se requiere de una carga de $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ en este tipo de unidades. El caudal en cada vertimiento será:

$$\begin{aligned} \text{Caudal de vertimiento} = (V_c) &= \left(49 \text{ m}^2 * 0.5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * \text{h}} \right) = 24.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \\ &\approx 408.333 \text{ l/min} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la duración de cada vertimiento será:

$$D_v = \left(\frac{V_c}{Q_b} \right) = \left(\frac{666.667 \frac{l}{\text{vertimiento}}}{408.333 \frac{l}{\text{min}}} \right) = 1.63 \text{ minutos} \approx 98 \text{ segundos}$$

Anexo 6.1.4. Eficiencias de remoción esperada

Se utilizó las eficiencias de remoción de DBO_5 encontradas en el piloto de tratamiento de 45.14% para la primera etapa y de 49.73% para la segunda. Las que fueron aplicadas a la carga superficial aplicada, obtenido una Carga superficial efluente y DBO efluente:

- Remoción en primera etapa ($\text{gDBO}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) = $22.69 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d} * 45.14\% = 10.24 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$
- DBO_5 efluente por área diaria ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) = $22.69 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d} - 10.24 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d} = 12.448 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$
- Carga de DBO_5 efluente de primera etapa (g/d) = $12.448 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d} * 49 \text{ m}^2 = 609.952 \text{ g}/\text{d}$
- Concentración de DBO_5 en efluente (mg/l) = $610.05 \text{ gDBO}/\text{d} / 2 \text{ m}^3/\text{d} = 304.976 \text{ mg}/\text{l}$

Anexo 6.2. Dimensionamiento del Sistema Francés segunda etapa

Anexo 6.2.1. Área requerida en función de la DBO₅ (A')

El cálculo del área requerida en función de la DBO₅ se realizó dividiendo la carga orgánica esperada (C) entre la carga orgánica aplicada en el piloto (c) como se muestra en la siguiente formula:

$$A' = \left(\frac{C}{c1} \right) = \left(\frac{609.952 \frac{g}{d}}{12.45 \frac{g}{m^2 * d}} \right) = 48.99 m^2$$

Considerando un largo y ancho con las mismas dimensiones:

$$\text{Largo (l)} = \text{ancho (a)} = \sqrt{47.69} = 6.99 \approx 7.0 \text{ m}$$

Por lo tanto, la nueva área por sub unidad de tratamiento será:

$$\text{Área (A)} = 7.0 \times 7.0 = 49 m^2$$

Anexo 6.2.2. Eficiencias de remoción esperada

Considerando la eficiencia de remoción encontrada en el piloto se calculó la carga y DBO₅ efluente de la segunda etapa:

- Remoción en segunda etapa (gDBO/m²*d) = 12.45 g/m²*d * 49.73% = 6.19 g/m²*d
- DBO₅ efluente por área diaria (g/m²*d) = 12.45 g/m²*d – 6.19 g/m²*d = 6.26 g/m²*d
- Carga de DBO₅ efluente de segunda etapa (g/d) = 6.26 g/m²*d * 49 m² = 306.64 g/d
- Concentración de DBO₅ en efluente (mg/l) = 306.74 gDBO/d / 2 m³/d = 153.3 mg/l

Anexo 6.3. Dimensionamiento del humedal horizontal

Debido a que se proyecta mejorar las eficiencias obtenidas en el piloto se reducirá el tamaño de partícula del sustrato. Se dimensionó con los métodos “Flujo pistón k-C*” y “P-k-C*”, de los resultados se escogió la mayor área requerida. Adicionalmente se verificó que la sección transversal no sobrepasara las cargas de sección transversal recomendadas para este tipo de humedal.

Anexo 6.3.1. Datos base para dimensionamiento

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal (Q)	m ³ /año	730
Concentración afluente	mg/l	153.32
K _A ⁽¹⁾	m/año	25
C _o ⁽²⁾	mg/l	35
C* ⁽³⁾	mg/l	10
Altura de sustrato	m	0.6
p ⁽⁴⁾	-	3

⁽¹⁾ En base a Kadlec y Wallace citados por Dotro *et al.* (2017) se utilizó un K_a (de percentil 50) para afluentes con concentraciones de entre 100 y 200 mg/l.

⁽²⁾ Debido a la alta carga orgánica se estableció como objetivo de tratamiento un efluente con DBO₅ de 35 mg/l

⁽³⁾ ⁽⁴⁾ En base a Kadlec y Wallace citados por Dotro *et al.* (2017) se utilizó una concentración de fondo característica y número de tanques en serie característico de los humedales horizontales.

Anexo 6.3.2. Método flujo pistón k-C*

Se utilizó la fórmula:

$$Area = -\frac{Q}{K_A} \ln \left(\frac{C_o - C^*}{C_i - C^*} \right) = -\frac{730 \frac{m^3}{año}}{25 \frac{m}{año}} \ln \left(\frac{35 \frac{mg}{l} - 10 \frac{mg}{l}}{153.32 \frac{mg}{l} - 10 \frac{mg}{l}} \right) = 50.99 m^2$$

Anexo 6.3.3. Método flujo pistón P-k-C*

Se utilizó la fórmula:

$$Area = \frac{PQ}{K_A} \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right) = \frac{3 * 730 \frac{m^3}{año}}{25 \frac{m}{año}} \left(\left(\frac{153.32 \frac{mg}{l} - 10 \frac{mg}{l}}{35 \frac{mg}{l} - 10 \frac{mg}{l}} \right)^{1/3} - 1 \right) = 69.18 m^2$$

Se escogió el área 69.18 m² por lo que las dimensiones escogidas fueron:

Anexo 6.3.4. Datos base para dimensionamiento

Parámetro	Unidad	Valor
Ancho	m	6.00
Largo	m	12.00
Área redondeada	m ²	72

Anexo 6.3.5. Verificación de carga superficial de sección transversal

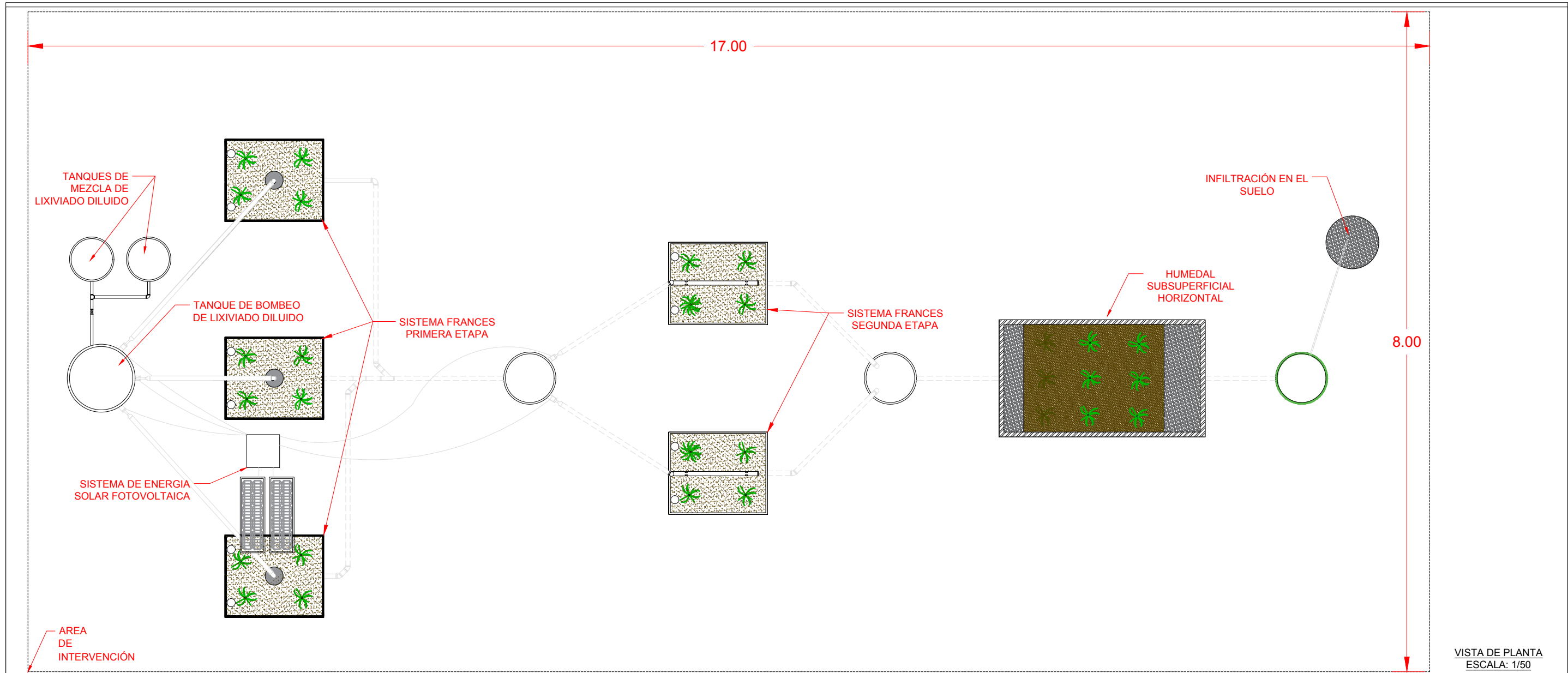
En función de las recomendaciones de Wallace y Knight citados por Dotro *et al.* (2017) se corroboró que la sección transversal no reciba una carga superficial que supere los 250 gDBO/m².d.

$$Sección transversal (St) = (Largo * Alto) = (6.00 * 0.60) = 3.6 m^2$$

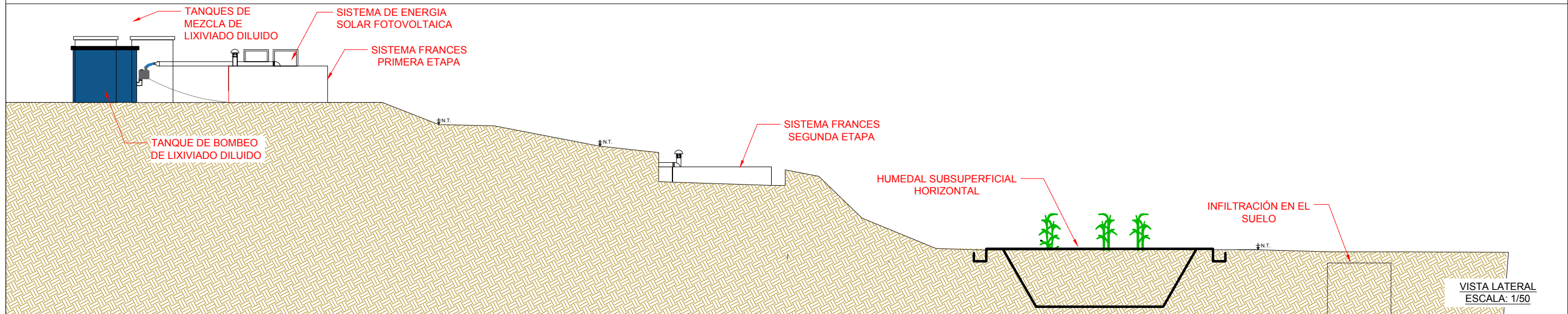
$$Carga transversal = \left(\frac{C2}{St}\right) = \left(\frac{306.64 g/d}{3.6 m^2}\right) = 85.17 \frac{g}{m^2 * d}$$

Se acepta el valor de carga transversal por lo tanto se aceptan las dimensiones del Anexo 6.3.4.

Anexo 7: Planos de piloto de humedales para el tratamiento de lixiviados



VISTA DE PLANTA
ESCALA: 1/50



VISTA LATERAL
ESCALA: 1/50

Componentes del sistema		
Nivel de tratamiento	Tecnología	Número de sub unidades
Tratamiento primario	Sistema Francés	Primera etapa: 3
		Segunda etapa: 2
Tratamiento secundario	Humedal construido horizontal	1

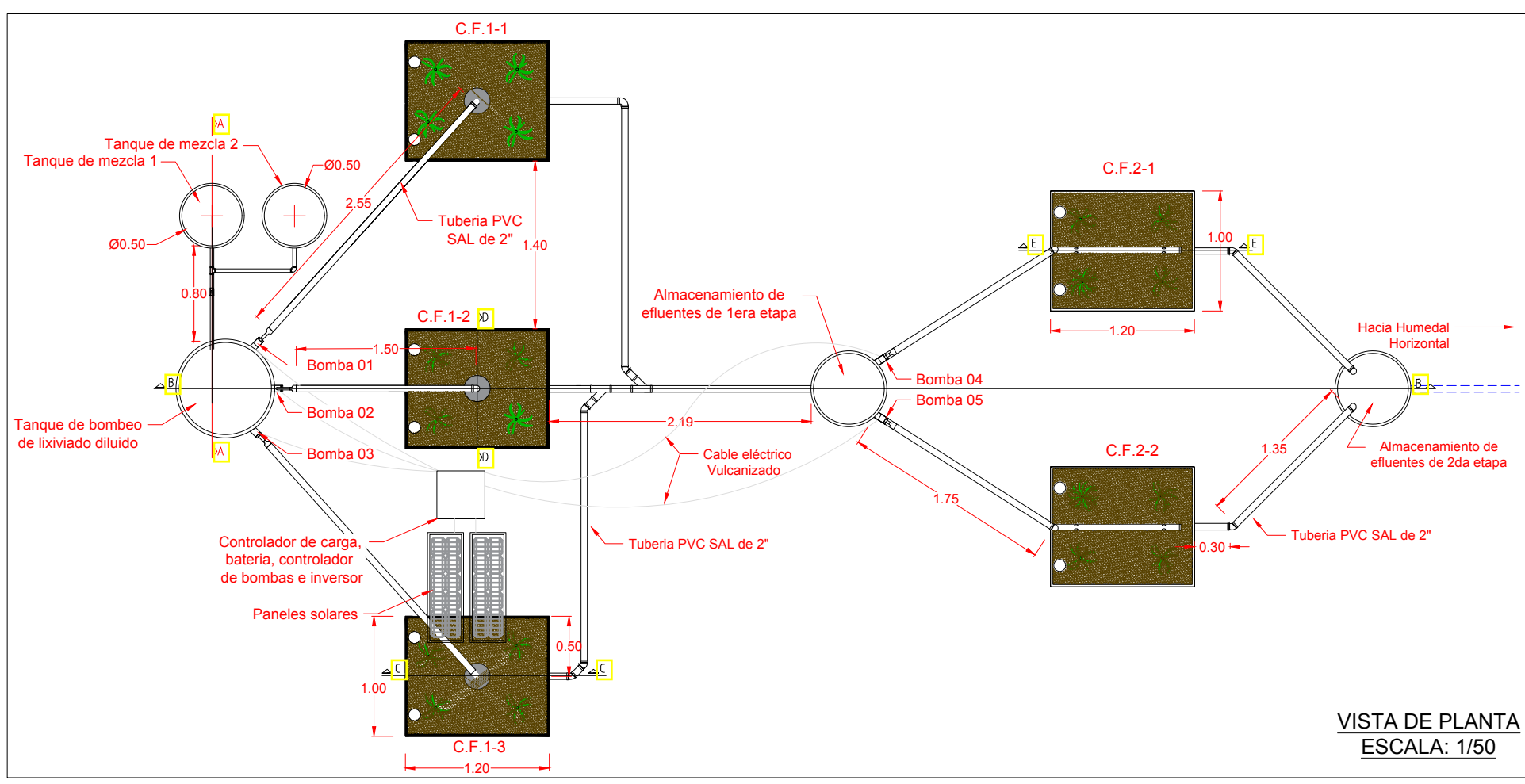
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

EPG
Escuela de Posgrado

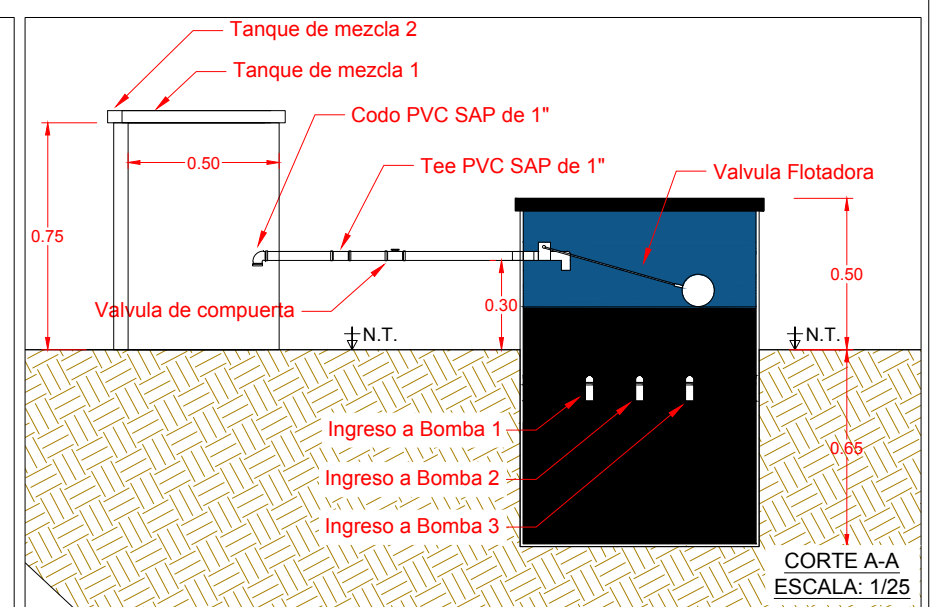
SISTEMA PILOTO DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE COMPOSTAJE
DISTRIBUCIÓN UNIDADES DE TRATAMIENTO DEL PILOTO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Localidad: Comunidad campesina de Chacán	Distrito: Anta	Departamento: Cusco
Fecha: Marzo, 2018	Escala: Indicada	Elaboración: Diego Suero Sánchez

01



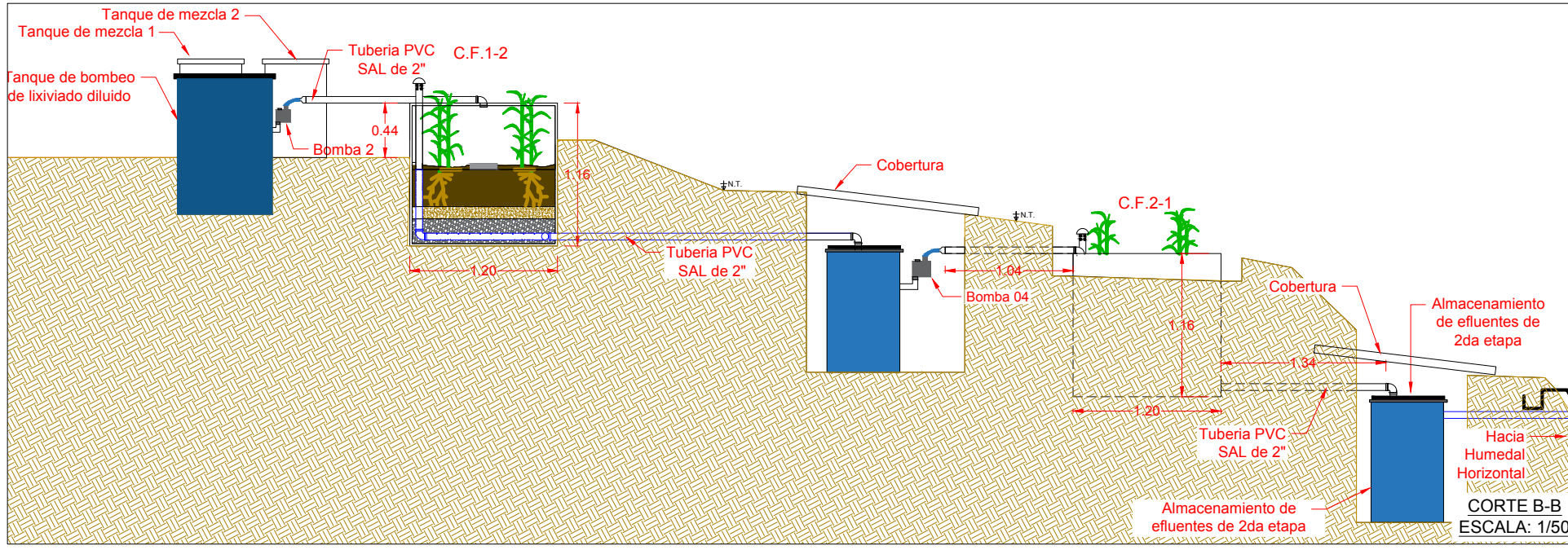
VISTA DE PLANTA
ESCALA: 1/50



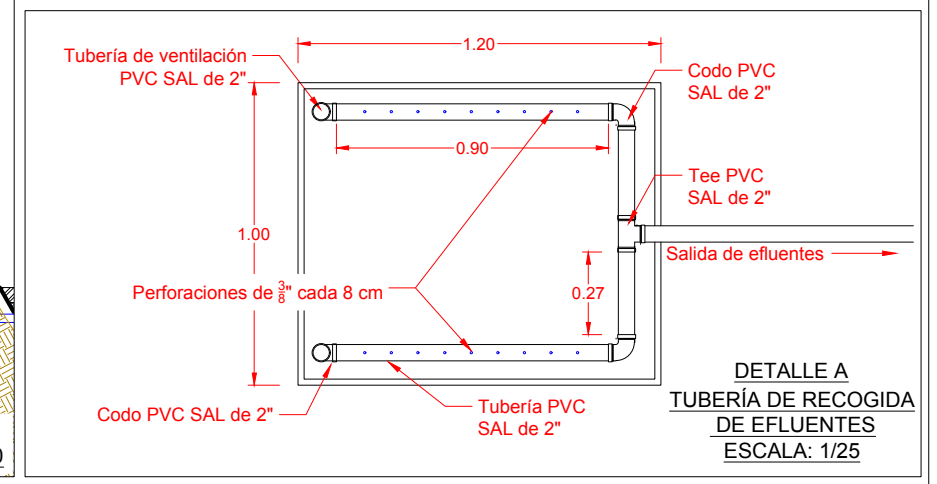
CORTE A-A
ESCALA: 1/25

TABLA: PROGRAMACIÓN DE BOMBEO DEL SISTEMA FRANCÉS

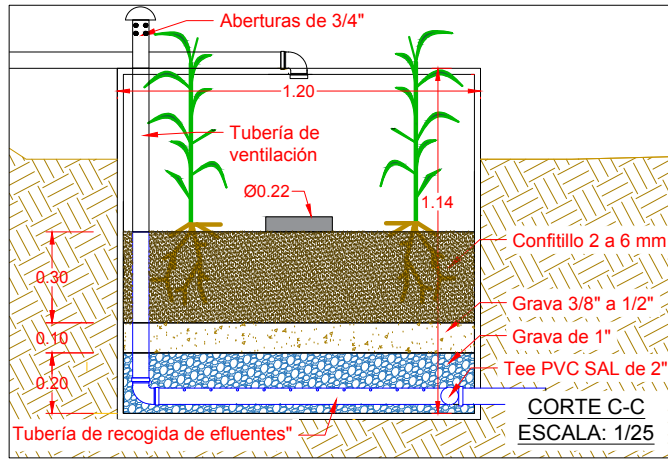
Programa	Día	Bomba	Unidad de tratamiento	Inicio	Fin	Programa	Día	Bomba	Unidad de tratamiento	Inicio	Fin
P1	1	1	C.F. 1-1	07:00:00	07:01:00	P22	1	4	C.F. 2-1	07:00:00	07:01:00
P2	1	1	C.F. 1-1	15:00:00	15:01:00	P23	1	4	C.F. 2-1	15:00:00	15:01:00
P3	1	1	C.F. 1-1	23:00:00	23:01:00	P24	1	4	C.F. 2-1	23:00:00	23:01:00
P4	2	1	C.F. 1-1	07:00:00	07:01:00	P25	2	4	C.F. 2-1	07:00:00	07:01:00
P5	2	1	C.F. 1-1	15:00:00	15:01:00	P26	2	4	C.F. 2-1	15:00:00	15:01:00
P6	2	1	C.F. 1-1	23:00:00	23:01:00	P27	2	4	C.F. 2-1	23:00:00	23:01:00
P7	3	2	C.F. 1-2	07:00:00	07:01:00	P28	3	4	C.F. 2-1	07:00:00	07:01:00
P8	3	2	C.F. 1-2	15:00:00	15:01:00	P29	3	4	C.F. 2-1	15:00:00	15:01:00
P9	3	2	C.F. 1-2	23:00:00	23:01:00	P30	3	4	C.F. 2-1	23:00:00	23:01:00
P10	4	2	C.F. 1-2	07:00:00	07:01:00	P31	4	5	C.F. 2-2	07:00:00	07:01:00
P11	4	2	C.F. 1-2	15:00:00	15:01:00	P32	4	5	C.F. 2-2	15:00:00	15:01:00
P12	4	2	C.F. 1-2	23:00:00	23:01:00	P33	4	5	C.F. 2-2	23:00:00	23:01:00
P13	5	3	C.F. 1-3	07:00:00	07:01:00	P34	5	5	C.F. 2-2	07:00:00	07:01:00
P14	5	3	C.F. 1-3	15:00:00	15:01:00	P35	5	5	C.F. 2-2	15:00:00	15:01:00
P15	5	3	C.F. 1-3	23:00:00	23:01:00	P36	5	5	C.F. 2-2	23:00:00	23:01:00
P16	6	3	C.F. 1-3	07:00:00	07:01:00	P37	6	5	C.F. 2-2	07:00:00	07:01:00
P17	6	3	C.F. 1-3	15:00:00	15:01:00	P38	6	5	C.F. 2-2	15:00:00	15:01:00
P18	6	3	C.F. 1-3	23:00:00	23:01:00	P39	6	5	C.F. 2-2	23:00:00	23:01:00
P19	7	3	C.F. 1-3	07:00:00	07:01:00	P40	7	5	C.F. 2-2	07:00:00	07:01:00
P20	7	3	C.F. 1-3	15:00:00	15:01:00	P41	7	5	C.F. 2-2	15:00:00	15:01:00
P21	7	3	C.F. 1-3	23:00:00	23:01:00	P42	7	5	C.F. 2-2	23:00:00	23:01:00



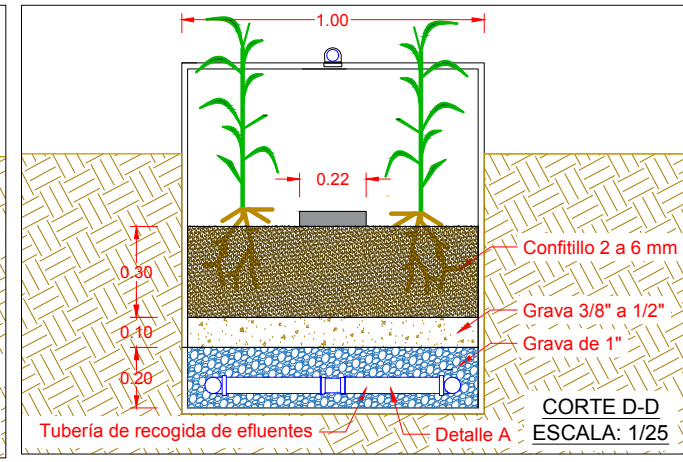
CORTE B-B
ESCALA: 1/50



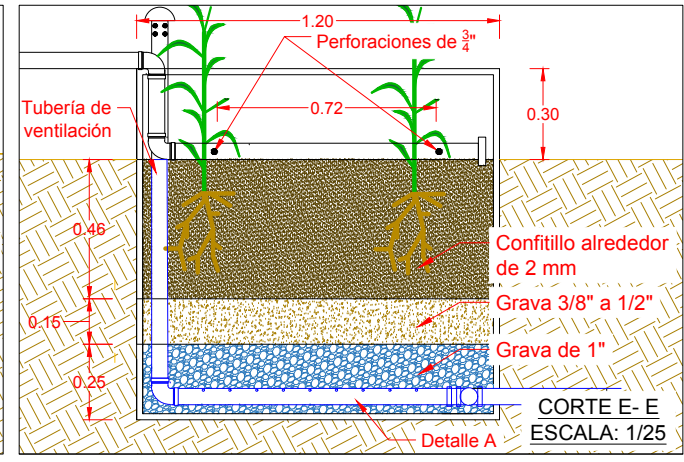
DETALLE A
TUBERÍA DE RECOGIDA DE EFLUENTES
ESCALA: 1/25



CORTE C-C
ESCALA: 1/25



CORTE D-D
ESCALA: 1/25



CORTE E-E
ESCALA: 1/25

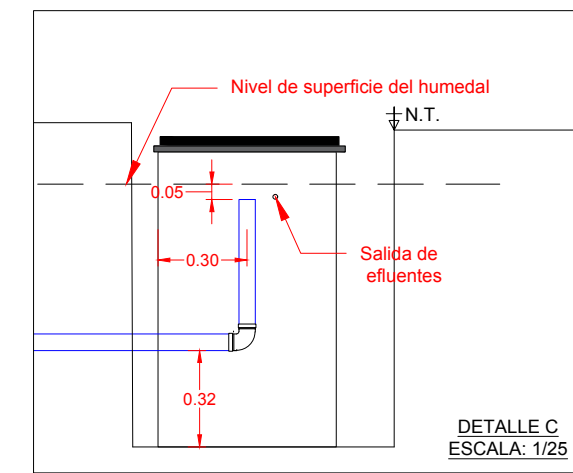
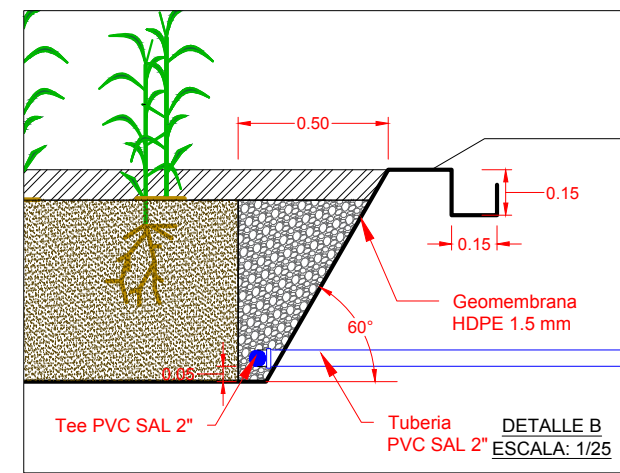
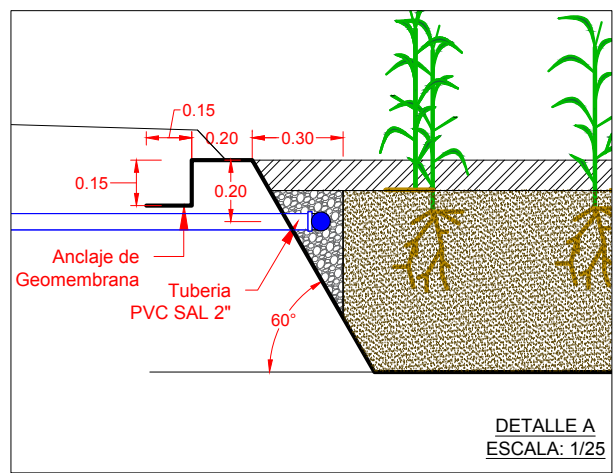
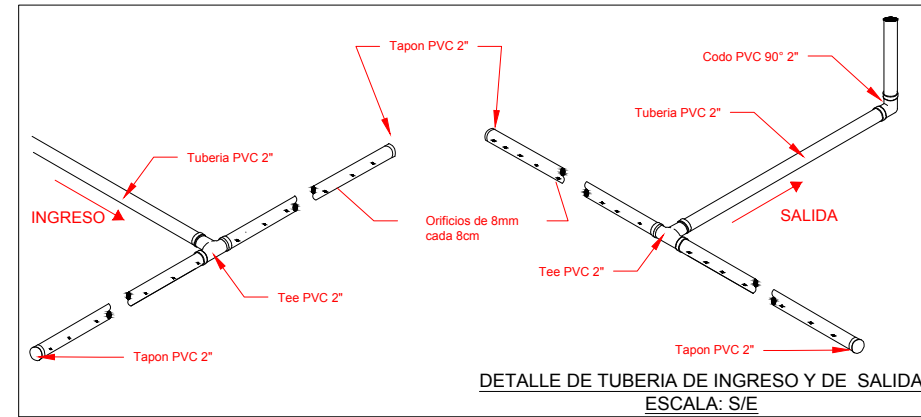
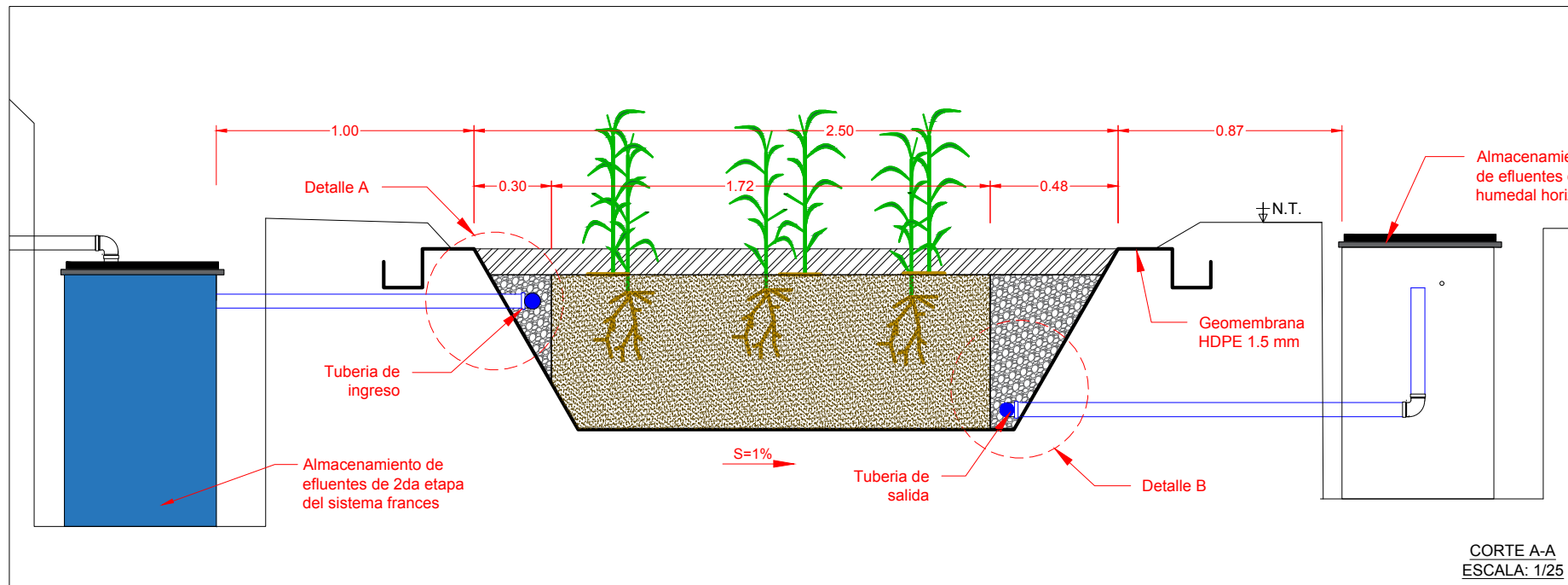
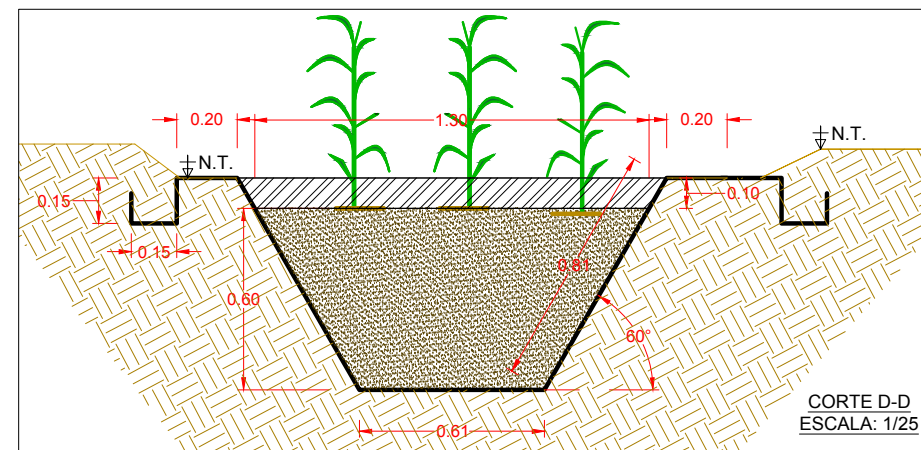
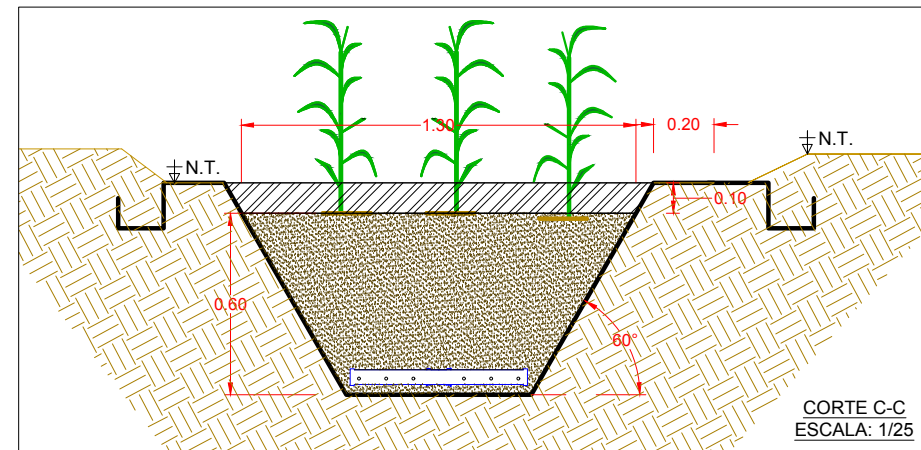
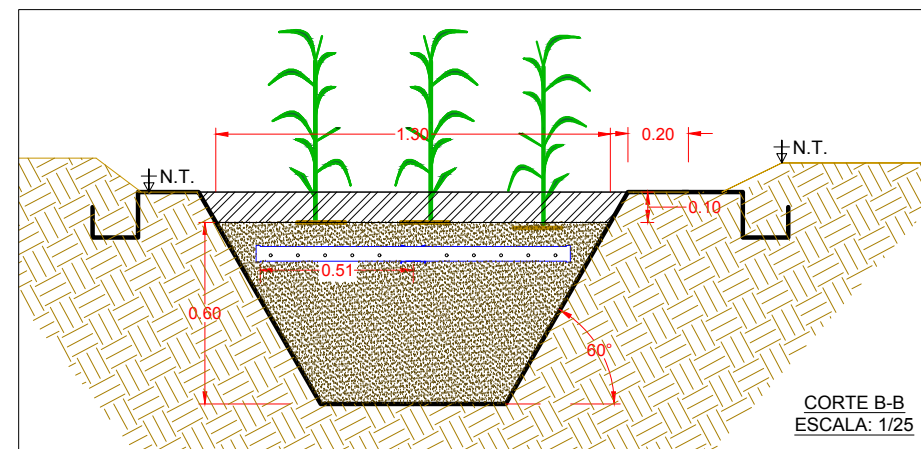
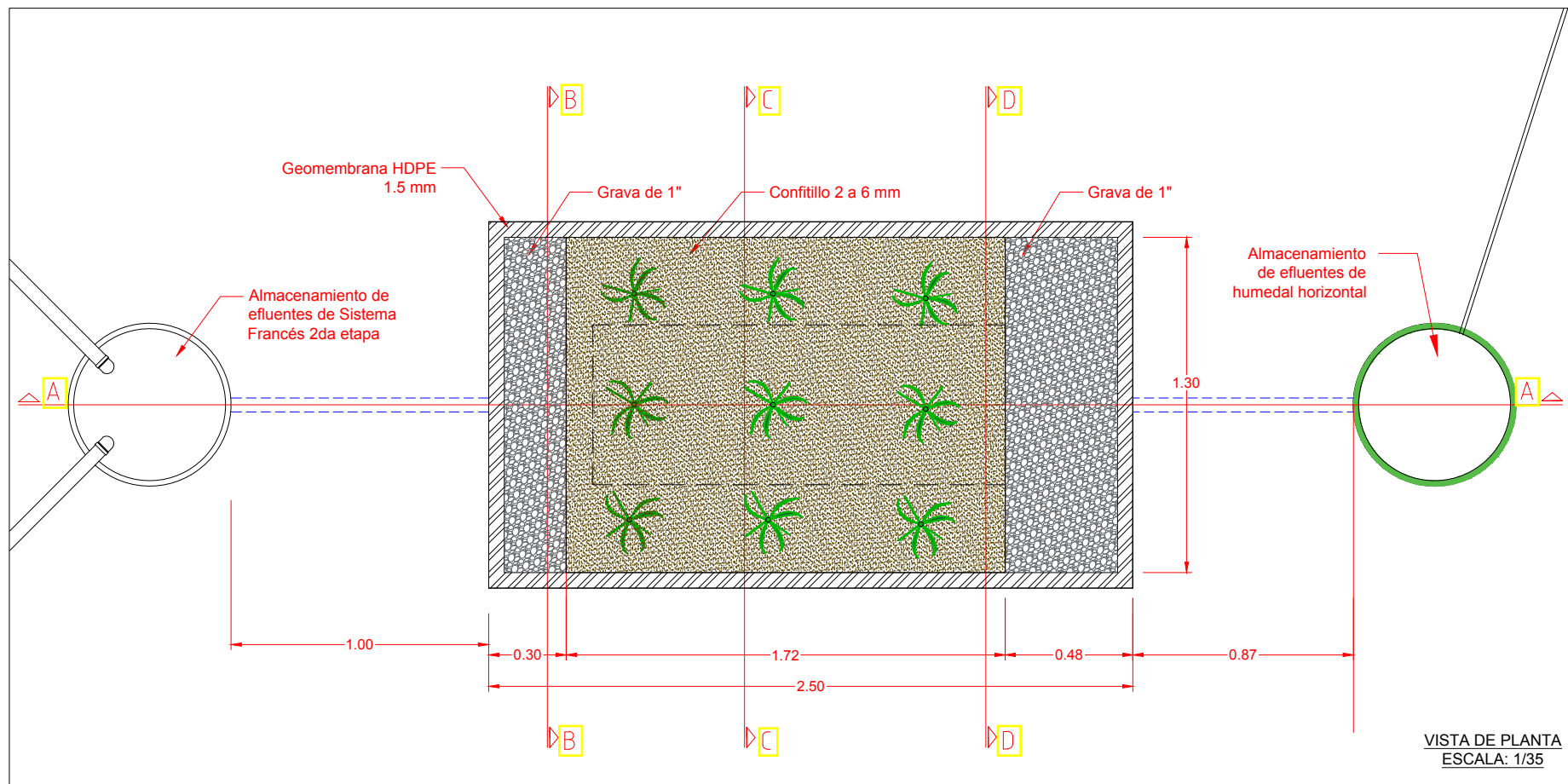
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

SISTEMA PILOTO DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE COMPOSTAJE

SISTEMA FRANCÉS DE HUMEDALES CONSTRUÍDOS

Localidad: Comunidad campesina de Chacón	Distrito: Anta	Departamento: Cusco
Fecha: Marzo, 2018	Escala: Indicada	Elaboración: Diego Suero Sánchez

02



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

EPG
Escuela de Posgrado

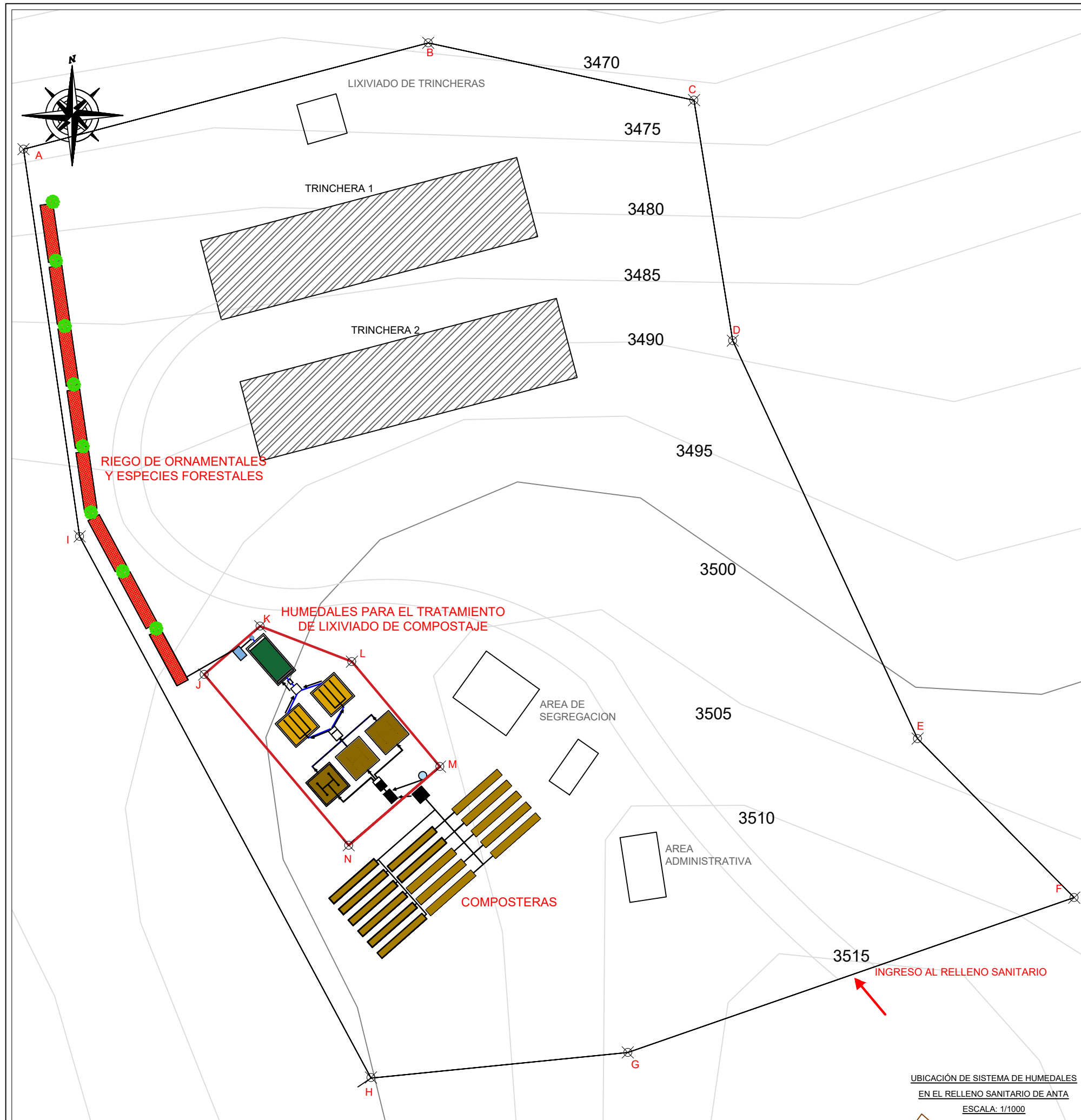
SISTEMA PILOTO DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE COMPOSTAJE

HUMEDAL CONSTRUIDO HORIZONTAL

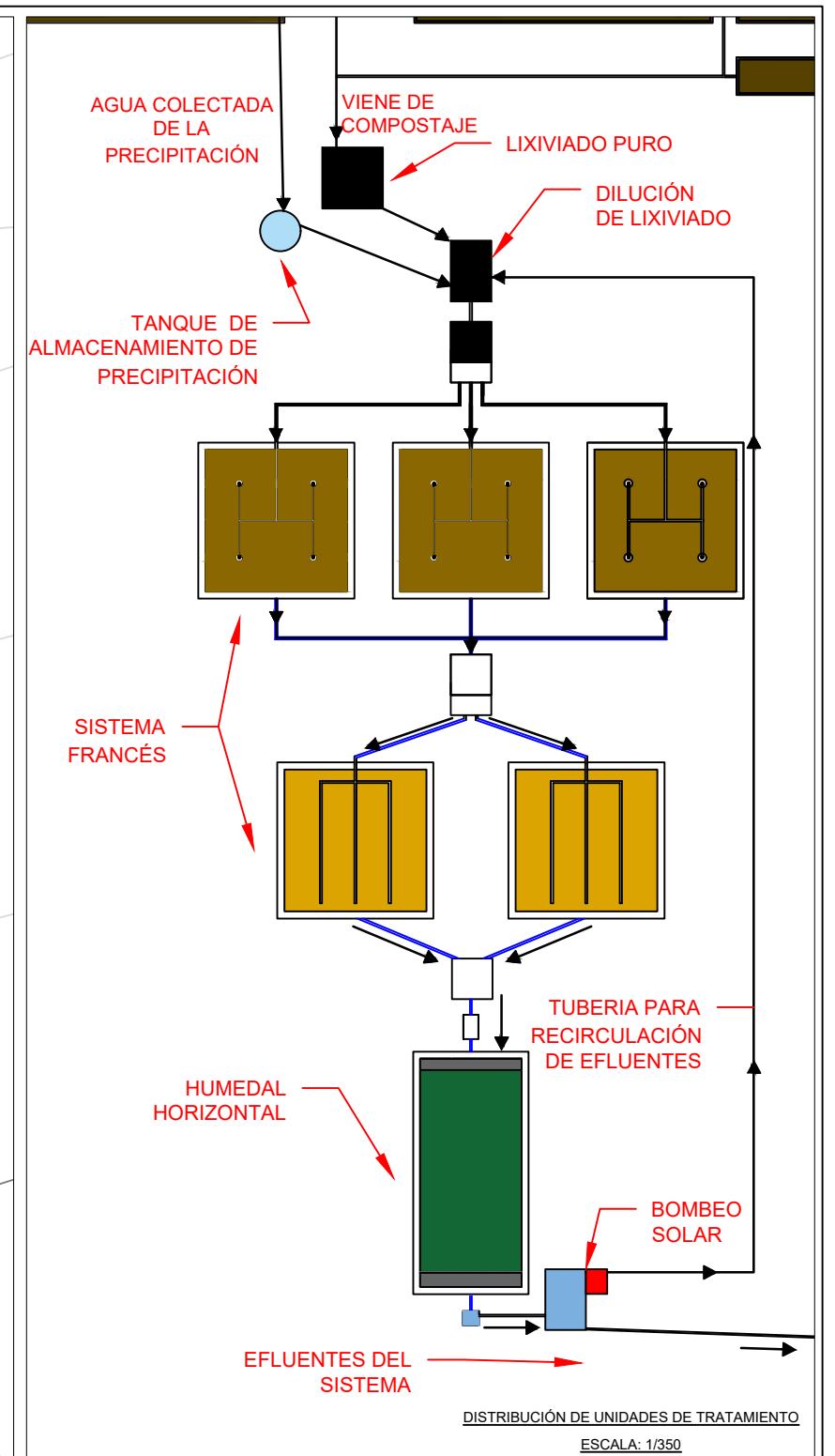
Localidad: Comunidad campesina de Chacón	Distrito: Anta	Departamento: Cusco
Fecha: Marzo, 2018	Escala: Indicada	Elaboración: Diego Suero Sánchez

03

Anexo 8: Planos propuesta de tratamiento para el relleno sanitario de Anta



UBICACIÓN DE SISTEMA DE HUMEDALES EN EL RELLENO SANITARIO DE ANTA
ESCALA: 1/1000



DISTRIBUCIÓN DE UNIDADES DE TRATAMIENTO
ESCALA: 1/350

RELLENO SANITARIO		
PUNTO	ESE	NORTE
A	808581.00	8512886.00
B	808680.00	8512912.00
C	808715.00	8512898.00
D	808754.48	8512839.19
E	808799.71	8512741.48
F	808838.00	8512703.00
G	808728.80	8512665.14
H	808666.00	8512659.00
I	808594.73	8512791.53

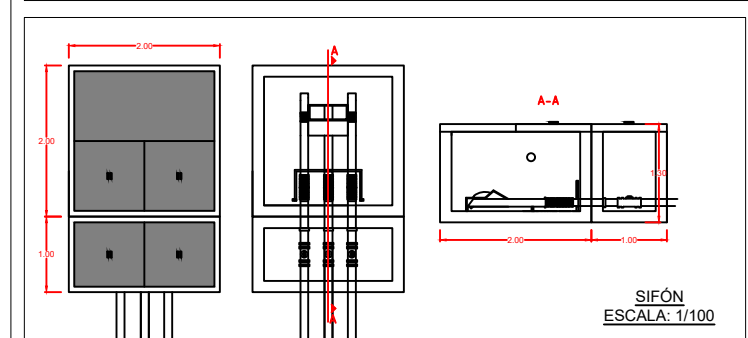
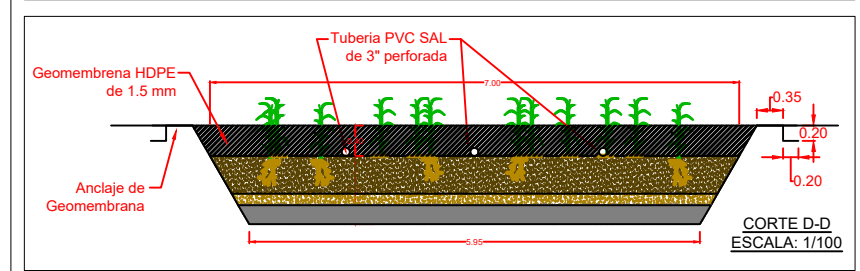
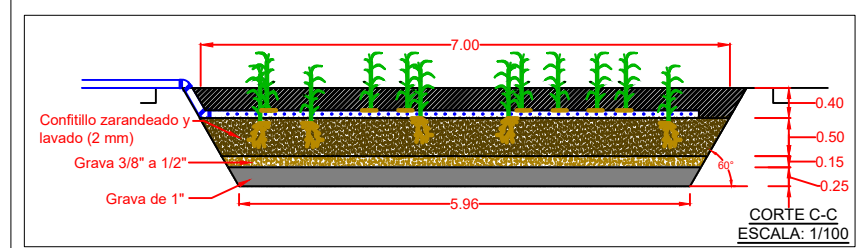
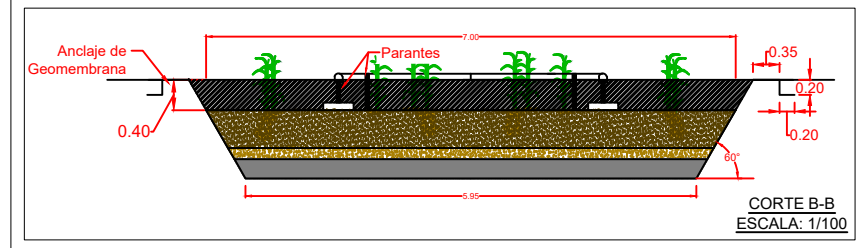
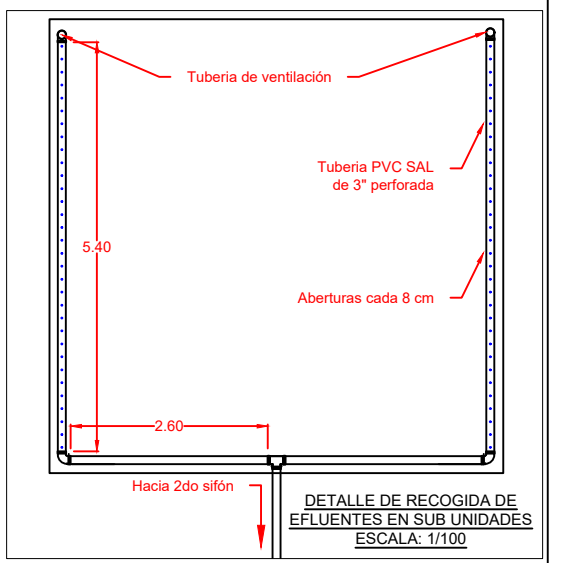
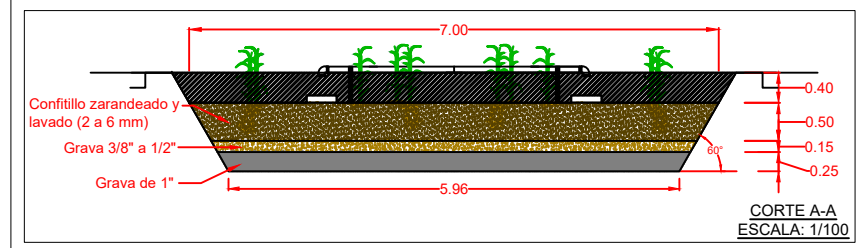
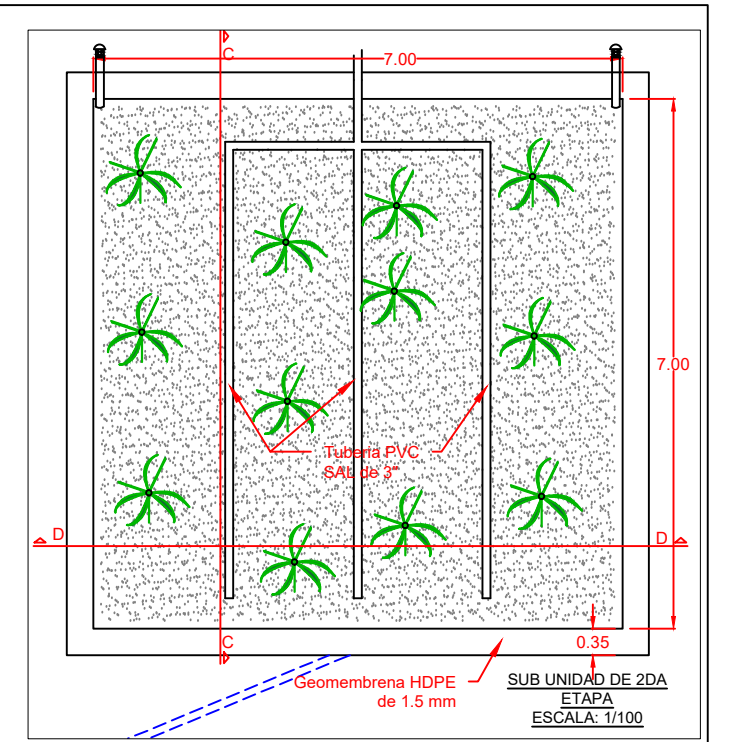
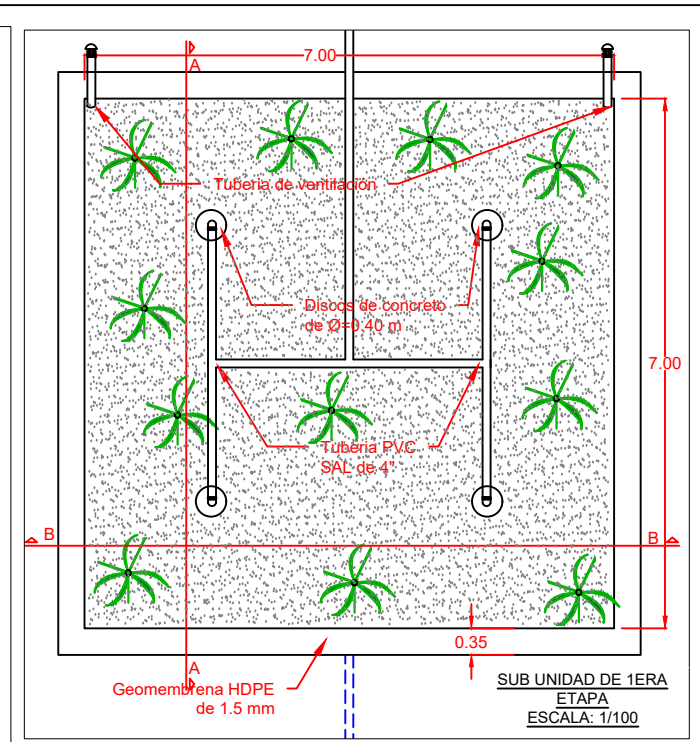
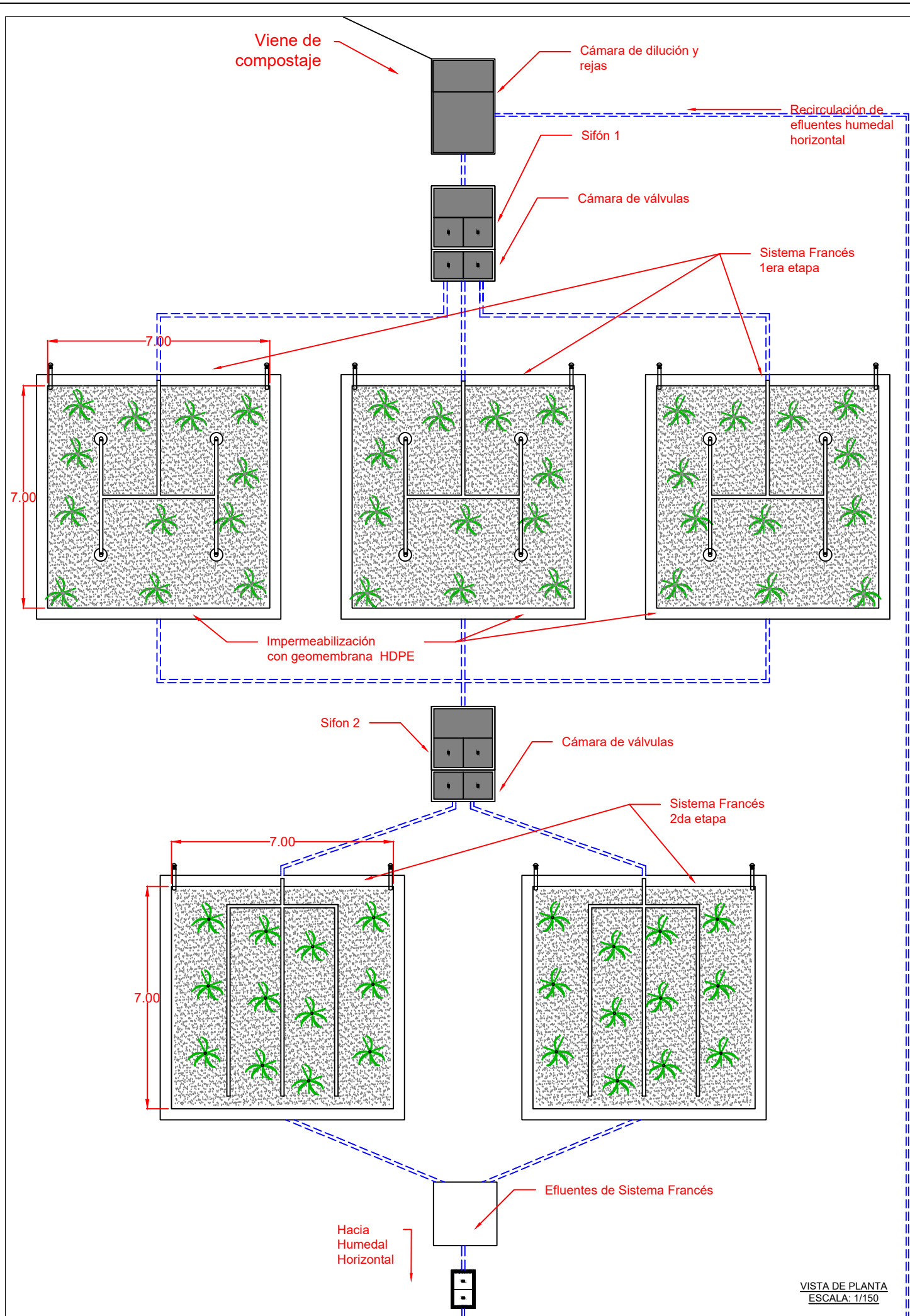
SISTEMA DE HUMEDALES		
PUNTO	ESE	NORTE
J	808625.82	8512757.83
K	808639.59	8512769.55
L	808664.97	8512760.73
M	808683.36	8512734.94
N	808660.91	8512715.83
	UNIDAD	VALOR
AREA	M2	1495.5
PERIMETRO	M	189.5

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
MAestría EN CIENCIAS AMBIENTALES

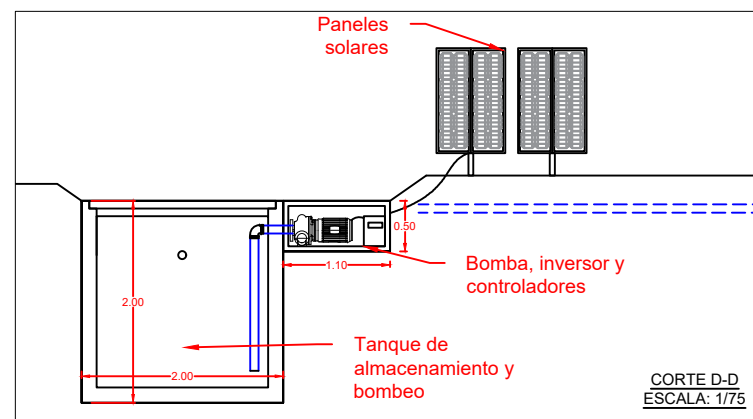
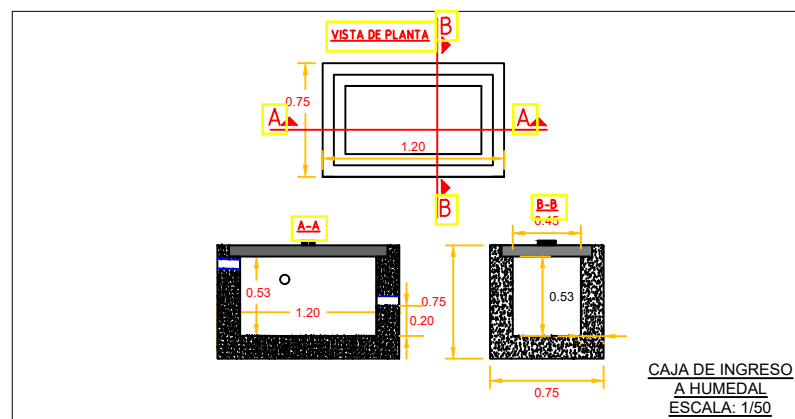
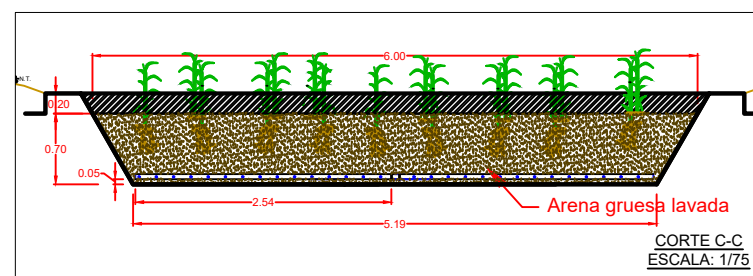
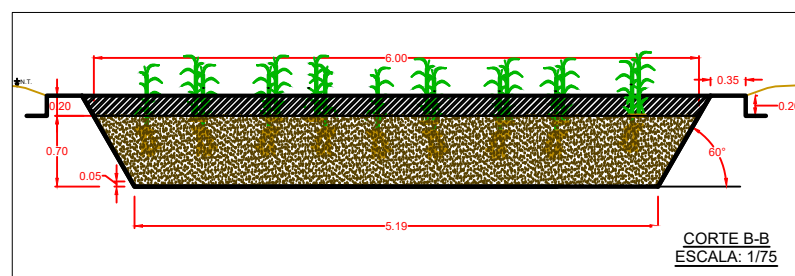
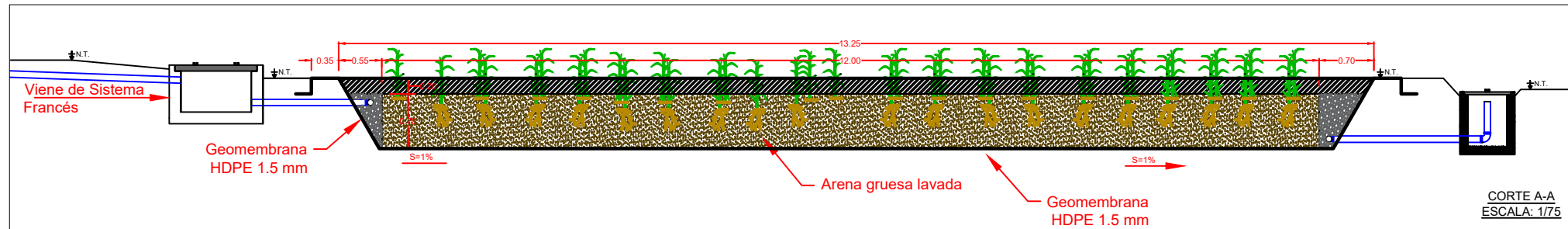
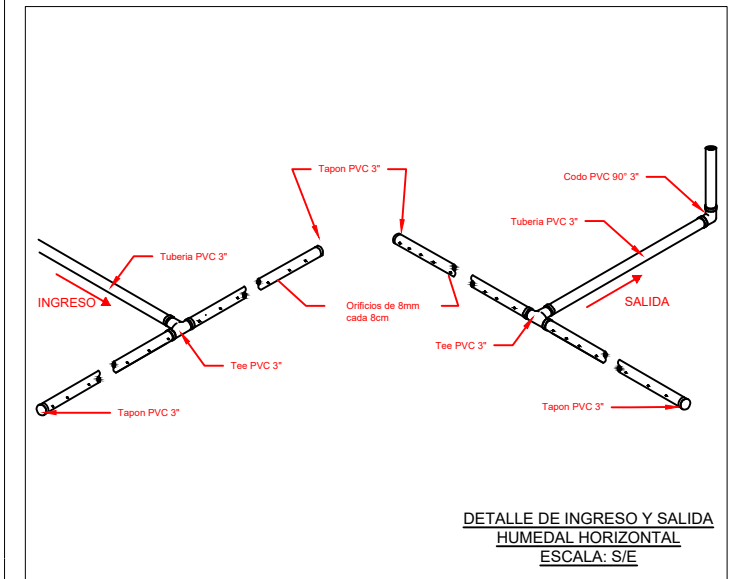
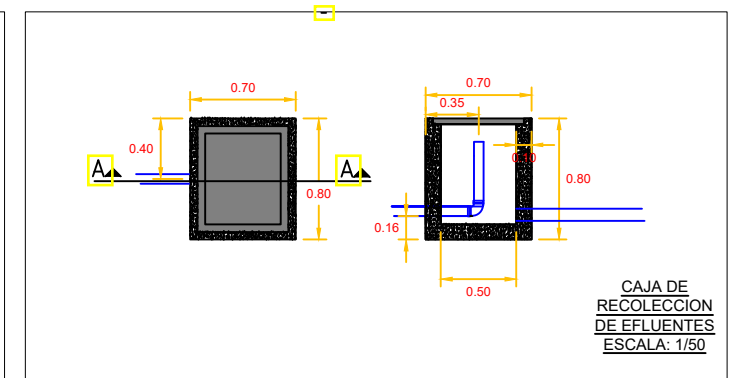
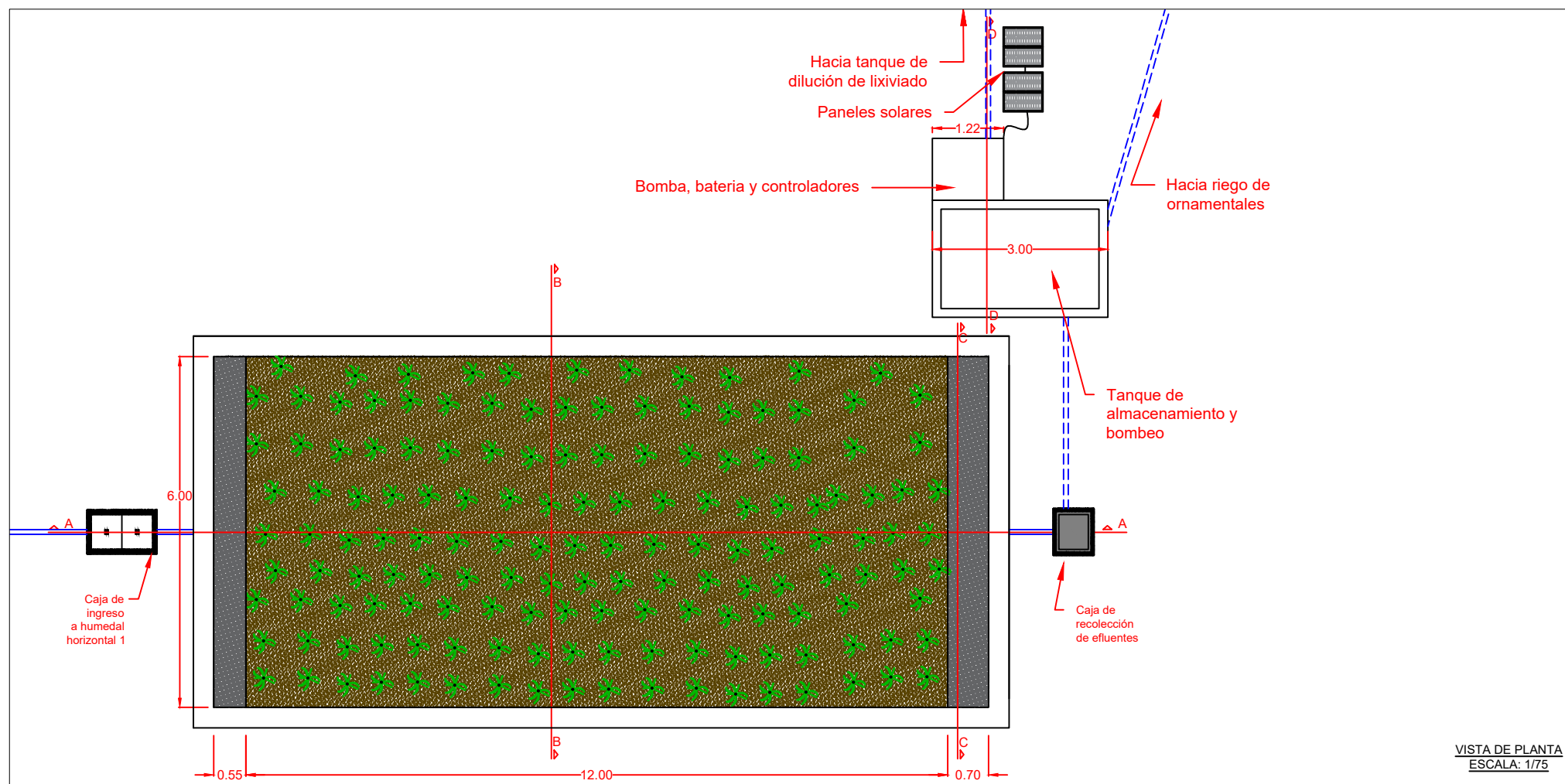
SISTEMA DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE COMPOSTAJE DEL RELLENO SANITARIO DE ANTA

UBICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE HUMEDALES

Localidad: Comunidad campesina de Chacán	Distrito: Anta	Departamento: Cusco	01
Fecha: Noviembre, 2020	Escala: Indicada	Elaboración: Diego Suero Sánchez	



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES EPG		
SISTEMA DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE COMPOSTAJE DEL RELLENO SANITARIO DE ANTA		
SISTEMA FRANCÉS		
Localidad: Comunidad campesina de Chacán	Distrito: Anta	Departamento: Cusco
Fecha: Noviembre, 2020	Escala: Indicada	Elaboración: Diego Suero Sánchez
		02



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ESCUELA DE POSGRADO MAestrÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES			
SISTEMA DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE COMPOSTAJE DEL RELLENO SANITARIO DE ANTA			
HUMEDAL HORIZONTAL			
Localidad: Comunidad campesina de Chacón	Distrito: Anta	Departamento: Cusco	<div style="font-size: 2em; font-weight: bold; text-align: center;">03</div>
Fecha: Noviembre, 2020	Escala: Indicada	Elaboración: Diego Suero Sánchez	