UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
SANTIAGO-CHILE

"ESTUDIO DE LA OPERACIÓN DE INVERNADERO EN PROCESO DE BIOSECADO DE LODOS PARA MITIGACIÓN DE OLORES"

AUTOR
MARÍA DE LOS ÁNGELES FUENTES CORNEJO

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA: DRA. ANDREA CARVAJAL.
PROFESOR CORREFERENTE: ALFREDO FANTA I.

"Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución"

NOVIEMBRE 2016

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. AGRADECIMIENTOS……..…... 8

2. RESUMEN 9

3. INTRODUCCIÓN 11

3.1. Antecedentes 11

3.2. Problemática 14

3.3. Introducción teórica 15
3.3.1. Conceptos previos 16
3.3.2. Curva de velocidad de secado 16
3.3.3. Clasificación del proceso de secado 19
3.3.4. Equipos para secado 20
3.3.5. Actividad microbiana 23

4. OBJETIVOS 24

4.1. Objetivo principal 24

4.2. Objetivos secundarios 24

5. METODOLOGÍA 25

5.1. Armado y volteo de las pilas 25

5.2. Criterios de volteo y retiro pilas 25

5.3. Invernadero 26

5.4. Registro mediciones 31

5.5. Equipos para control y muestreo 32

5.6. Registro y medición de emisiones de gases 35

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 38

6.1. Temperatura y sólidos totales 38

6.2. Tiempo de secado 41

6.3. Concentración de gases en galpón 42
6.3.1. Compuestos orgánicos volátiles COV´s: 43
6.3.2. Ácido sulfhídrico 46
6.3.3. Amoníaco 49

6.4. Condiciones interior galpón 53
6.4.1. Humedad invernadero 53
6.4.2. Temperatura invernadero 57

6.5. Problemas operacionales 61

6.6. Tasa de emisión de amoníaco 62

6.7. Transferencia de calor 64

6.8. Remoción de agua 66

7. CONCLUSIONES 67

8. RECOMENDACIONES 68

9. REFERENCIAS 69

10. ANEXOS 72

10.1. Diferencia humedad invernadero y externa 72

10.2. Diferencia temperatura invernadero y externa 75

10.3. Temperatura estación meteorológica 78

10.4. Humedad estación meteorológica 80

10.5. Cálculo transferencia de calor 82

10.6. Producto Biostreme 84

10.7. Termocupla 84

10.8. Sensores móviles 85

10.9. Termobalanza 85

10.10. pH-metro 86

10.11. Balanza digital 87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación CGIB 12
Figura 2: Línea de acción desde la llegada de los biosólidos desde las PTAS hasta su disposición final 13
Figura 3: Curva de velocidad de secado en función de la humedad libre 16
Figura 4: Transferencia de calor y materia de un sólido al ambiente 18
Figura 5: Esquema secado en bandejas 20
Figura 6: Esquema secado indirecto al vacío con anaqueles 21
Figura 7: Esquema secado rotatorio 21
Figura 8: Esquema secado de tambor 22
Figura 9: Esquema proceso de secado por aspersión 22
Figura 10: Máquina volteadora de los biosólidos 26
Figura 11: Vista frontal galpón 26
Figura 12: Viste superior galpón 26
Figura 13: Vista interior del invernadero 27
Figura 14: Sensores de gases interior invernadero 28
Figura 15: Ubicación sensores dentro de invernadero 28
Figura 16: Vista interna del invernadero con biosólido 28
Figura 17: Vista exterior invernadero 29
Figura 18: Sensores ubicados en tubería luego del lavador de gases. 29
Figura 19: Vista general del invernadero y la conexión a extractores, lavador y chimenea. 30
Figura 20: Muestreo realizado en pila ubicada en invernadero 31
Figura 21: Barreno para tomar muestra de biosólido 32
Figura 22: Equipo para medición de sólidos totales. 33
Figura 23: Muestras de biosólidos luego de medir sólidos totales. 33
Figura 24: pH-metro para medir concentración de iones hidrógeno del biosólido 33
Figura 25: Balanza analítica para preparar muestras 34
Figura 26: Muestras de biosólido en estufa. 34
Figura 27: Estufa para medición de humedad. 34
Figura 28: HMI de funcionamiento del invernadero. 36
Figura 29: Esquema del proceso con sus sensores registrando el valor actual. 37
Figura 30: Temperatura pila uno invernadero y exterior 39
Figura 31: Sólidos totales pila uno invernadero y exterior 39
Figura 32: Sólidos totales pila dos invernadero y exterior 39
Figura 33: Sólidos totales pila tres invernadero y exterior 39
Figura 34: pH de las pilas del galpón 42

Figura 35: pH de las pilas del exterior 42
Figura 36: Registro COV´s Pila Uno Inv Semana Uno 43
Figura 37: Registro COV´s Pila Uno Inv Semana Dos 43
Figura 38: Registro COV´s Pila Uno Inv Semana Tres 43
Figura 39: Registro COV´s Pila Uno Inv Semana Cuatro 43
Figura 40: Registro COV´s Pila Dos Inv Semana Uno 44
Figura 41: Registro COV´s Pila Dos Inv Semana Dos 44
Figura 42: Registro COV´s Pila Dos Inv Semana Tres 44
Figura 43: Registro COV´s Pila Tres Inv Semana Uno 45
Figura 44: Registro COV´s Pila Tres Inv Semana Dos 45
Figura 45: Registro COV´s Pila Tres Inv Semana Tres 45
Figura 46: Registro COV´s Pila Tres Inv Semana Cuatro 45
Figura 47: Registro H2S Pila Uno Inv Semana Uno 46
Figura 48: Registro H2S Pila Uno Inv Semana Dos 46
Figura 49: Registro H2S Pila Uno Inv Semana Tres 46
Figura 50: Registro H2S Pila Uno Inv Semana Cuatro 46
Figura 51: Registro H2S Pila Dos Inv Semana Uno 47
Figura 52: Registro H2S Pila Dos Inv Semana Dos 47
Figura 53: Registro H2S Pila Dos Inv Semana Tres 48
Figura 54: Registro H2S Pila Tres Inv Semana Uno 48
Figura 55: Registro H2S Pila Tres Inv Semana Dos 48
Figura 56: Registro H2S Pila Tres Inv Semana Tres 48
Figura 57: Registro H2S Pila Tres Inv Semana Cuatro 48
Figura 58: Registro NH3 Pila Uno Inv Semana Uno 49
Figura 59: Registro NH3 Pila Uno Inv Semana Dos 49
Figura 60: Registro NH3 Pila Uno Inv Semana Tres 49
Figura 61: Registro NH3 Pila Tres Inv Semana Uno 50
Figura 62: Registro NH3 Pila Tres Inv Semana Dos 50
Figura 63: Registro NH3 Pila Tres Inv Semana Tres 50
Figura 64: Registro humedad Pila Uno Inv Semana Uno 53
Figura 65: Registro humedad Pila Uno Inv Semana Dos 53
Figura 66: Registro humedad Pila Uno Inv Semana Tres 53
Figura 67: Registro humedad Pila Uno Inv Semana Cuatro 53
Figura 68: Registro humedad Pila Dos Inv Semana Uno 54
Figura 69: Registro humedad Pila Dos Inv Semana Dos 54
Figura 70: Registro humedad Pila Dos Inv Semana Tres 54
Figura 71: Registro humedad Pila Tres Inv Semana Uno 55
Figura 72: Registro humedad Pila Tres Inv Semana Dos 55
Figura 73: Registro humedad Pila Tres Inv Semana Tres 55
Figura 74: Registro humedad Pila Tres Inv Semana Cuatro 55
Figura 75: Registro humedad estación meteorológica 56

Figura 76: Registro humedad estación meteorológica 56
Figura 77: Registro humedad estación meteorológica 56
Figura 78: Registro temperatura Pila Uno Inv Semana Uno 57
Figura 79: Registro temperatura Pila Uno Inv Semana Dos 57
Figura 80: Registro temperatura Pila Uno Inv Semana Tres 57
Figura 81: Registro temperatura Pila Uno Inv Semana Cuatro 57
Figura 82: Registro temperatura Pila Dos Inv Semana Uno 58
Figura 83: Registro temperatura Pila Dos Inv Semana Dos 58
Figura 84: Registro temperatura Pila Dos Inv Semana Tres 58
Figura 85: Registro temperatura Pila Tres Inv Semana Uno 59
Figura 86: Registro temperatura Pila Tres Inv Semana Dos 59
Figura 87: Registro temperatura Pila Tres Inv Semana Tres 59
Figura 88: Registro temperatura Pila Tres Inv Semana Cuatro 59
Figura 89: Registro temperatura estación meteorológica 60
Figura 90: Registro temperatura estación meteorológica 60
Figura 91: Registro temperatura estación meteorológica 60
Figura 92: Registro humedad para control y muestreo de nueva pila 61
Figura 93: Esquema de secado para el biosólido. 64
Figura 94: Diferencia humedad Pila Uno Inv Semana Uno 72
Figura 95: Diferencia humedad Pila Uno Inv Semana Dos 72
Figura 96: Diferencia humedad Pila Uno Inv Semana Tres 72
Figura 97: Diferencia humedad Pila Dos Inv Semana Uno 73
Figura 98: Diferencia humedad Pila Dos Inv Semana Dos 73
Figura 99: Diferencia humedad Pila Dos Inv Semana Tres 73
Figura 100: Diferencia humedad Pila Tres Inv Semana Uno 74
Figura 101: Diferencia humedad Pila Tres Inv Semana Dos 74
Figura 102: Diferencia humedad Pila Tres Inv Semana Tres 74
Figura 103: Diferencia temperatura Pila Uno Inv Semana Uno 75
Figura 104: Diferencia temperatura Pila Uno Inv Semana Dos 75
Figura 105: Diferencia temperatura Pila Uno Inv Semana Tres 75
Figura 106: Diferencia temperatura Pila Dos Inv Semana Uno 76
Figura 107: Diferencia temperatura Pila Dos Inv Semana Dos 76
Figura 108: Diferencia temperatura Pila Dos Inv Semana Tres 76
Figura 109: Diferencia temperatura Pila Tres Inv Semana Uno 77
Figura 110: Diferencia temperatura Pila Tres Inv Semana Dos 77
Figura 111: Diferencia temperatura Pila Tres Inv Semana Tres 77
Figura 112: Registro temperatura estación meteorológica 78
Figura 113: Registro temperatura estación meteorológica 78
Figura 114: Registro temperatura estación meteorológica 78
Figura 115: Registro temperatura estación meteorológica 79
Figura 116: Registro temperatura estación meteorológica 79

Figura 117: Registro temperatura estación meteorológica 79
Figura 118: Registro humedad estación meteorológica 80
Figura 119: Registro humedad estación meteorológica 80
Figura 120: Registro humedad estación meteorológica 80
Figura 121: Registro humedad estación meteorológica 81
Figura 122: Registro humedad estación meteorológica 81
Figura 123: Registro humedad estación meteorológica 81
Figura 124: Esquema de secado para el biosólido..... 82
Figura 125: Ficha técnica producto aplicado en biosólidos 84
Figura 126: Ficha técnica termocupla para medir temperatura biosólidos..... 84
Figura 127: Ficha técnica sensor portátil de gases 85
Figura 128: Ficha técnica de termobalanza para la medición de sólidos totales..... 86
Figura 129: Datasheet de pH-metro de laboratorio 86
Figura 130: Descripción funcionamiento de la balanza digital de laboratorio..... 87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Destino de biosólidos producidos en las principales PTAS de la región metropolitana. 11
Tabla 2: Etapas de desarrollo del CGIB de acuerdo al procesamiento de biosólidos 12
Tabla 3: Número de llamados realizados por las comunidades aledañas a El Rutal por malos olores 14
Tabla 4: Propiedades biosólidos que recibe el CGIB para su secado 20
Tabla 5: Identificación de los diferentes períodos de medición para cada tanda de pilas 31
Tabla 6: Registro que realiza PLC instalado en invernadero 35
Tabla 7: Rangos de concentración de gases y temperatura que definen luz de semáforo en invernadero 36
Tabla 8: Fechas de inicio y término de control de las tres primeras tandas de pilas 38
Tabla 9: Valores de temperatura (pila uno) y sólidos totales con los cuales se retiraron las pilas del invernadero y exterior. 40
Tabla 10: Tiempo de secado de las pilas en invernadero y exterior. 41
Tabla 11: Composición de entrada de biosólido al CGIB 51
Tabla 12: Distancia máxima de pluma según escenario 52
Tabla 13: Área de influencia según escenario 52
Tabla 14: Tasa de emisión para el amoníaco de acuerdo a datos de sensor ubicado en tubería. 63
Tabla 15: Límites permisibles para el amoníaco 64
Tabla 16: Transferencia de calor para el secado de una pila de biosólido en galpón 65
Tabla 17: Remoción de agua para las tres tandas de pilas en galpón y su réplica en exterior 66
Tabla 18: Cálculo de los diferentes mecanismos de transferencia de calor en base a la temperatura de la pila uno del invernadero 83

1. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Aguas Andinas por la oportunidad de ser parte de este proyecto tan interesante y contingente; desde el comienzo me he sentido acogida e integrada en el grupo de trabajo. A don Alfredo Fanta y don Boris Trumper, quienes han sido, durante todo este tiempo que lleva el proyecto piloto en marcha, apoyos fundamentales para lograr cumplir cada una de las metas propuestas.

Al personal del Centro de Gestión Integral de Biosólidos, quienes desde el primer día me recibieron de la mejor manera; a Pablo Sánchez, quien con su buena disposición y humor me ayudó cada vez que necesitaba algo o tenía alguna duda sobre los procesos llevados a cabo en El Rutal; a Jorge Pérez y Francisco Pardo, quienes siempre han estado con buena voluntad cada vez que iba a tomar muestras al invernadero. Sin ellos la tarea no habría sido tan fácil de llevar.

Agradecer a mi profesora guía, Andrea Carvajal, quien con su amplio conocimiento en el tema, su constante entusiasmo y simpatía me dirigió para lograr lo que en un comienzo veía tan difuso. A la Universidad, por la formación académica, por permitirme desarrollar mis capacidades y sentir que soy capaz de hacer frente a cada nuevo desafío; por brindar siempre las herramientas para sentir que hasta el último día estaría siendo apoyada.

A mis padres, por hacer esto posible, por confiar en mí y en mis capacidades; sin ellos nada de esto sería posible.

2. RESUMEN

El agua es un recurso limitado que debe ser utilizado de manera responsable, debido a su omnipresencia en todos los ámbitos de la vida del ser humano. Las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS), cumplen una labor fundamental al devolver este recurso a su cauce natural con el mínimo de los impactos, si bien generan un impacto positivo al tratar las aguas contaminadas, se origina otro problema medioambiental: altos volúmenes de lodos a los cuales se les debe dar un tratamiento para su disposición final; por lo cual se debe definir un plan de acción que permita manipular estos residuos, evitando así problemas medioambientales que van desde malos olores hasta la contaminación de suelos y cauces naturales.

Aguas Andinas es una empresa del rubro sanitario que busca dar solución a este tipo de problemas medioambientales, por lo cual, en el año 2009 creó el Centro de Gestión Integral de Biosólidos (CGIB), quien tiene por función el acopio y tratamiento de los biosólidos producidos en las grandes PTAS de la Región Metropolitana, que son La Farfana y Trebal.

En el CGIB se realiza el secado de biosólidos en dos modalidades: solar, realizado en meses de altas temperaturas y biológico, secado en pilas cuando las condiciones climáticas no son favorables; obteniendo un producto final con una baja carga patogénica, listo para ser dispuesto en predios agrícolas o darle otro tipo de uso.

El secado biológico, desde el inicio de las operaciones del CGIB, ha presentado un inconveniente: llamados constantes por parte de los vecinos de localidades cercanas debido a olores molestos. Es por esto que Aguas Andinas decide realizar un proyecto piloto que consiste en la construcción de un galpón donde se realice el secado biológico, permitiendo así la captación de gases contaminantes para su tratamiento antes de ser liberados a la atmósfera con una menor carga odorífera.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la operación del biosecado en invernadero y evaluar si el galpón construido en el CGIB El Rutal permite mitigar la emisión de malos olores.

El trabajo presentado en esta memoria consiste en el seguimiento de una pila de biosólido al interior del galpón y otra en el exterior, ambas con igual composición; midiendo día por medio humedad, pH y temperatura. Se hizo seguimiento de la evolución de ambas y comparando su comportamiento. Se registró además en línea la concentración de gases contaminantes antes mencionados, humedad y temperatura dentro del galpón.

Como resultados se obtuvo que las pilas dispuestas en el galpón demoran menos tiempo en llegar a la humedad deseada, 40 % , casi la mitad del tiempo respecto al exterior, por lo que se puede establecer que la construcción del recinto permite realizar un secado más rápido, evitando de esta manera extender el procedimiento debido a las precipitaciones de los meses de invierno, que es donde se realiza el secado biológico o biosecado.

Respecto a la emisión de gases contaminantes se obtuvo que para el amoníaco, la actividad y concentración de éste estaba determinada por la temperatura y el oxígeno disponible para su producción. Para el ácido sulfhídrico se dio la situación inversa, a menores temperaturas y mayor humedad dentro del invernadero, mayor es la concentración de éste, debido al ambiente anaerobio que se genera. Y para los compuestos orgánicos volátiles se tiene que estos aumentaban en concentración directamente con la temperatura dentro del galpón.

Debido a la inactividad del lavador de gases, no se pudo evaluar la capacidad de mitigación de olores del galpón, sin embargo se pudo medir la concentración de los contaminantes gaseosos; por lo que queda como tarea pendiente la eficiencia del equipo y su funcionamiento óptimo.

En general el proyecto permite medir el comportamiento de las pilas de biosólido durante el período de secado, seguir la evolución de las variables más importantes del proceso y por sobre todo, reducir el impacto que conlleva la disposición de estos residuos.

3. INTRODUCCIÓN

3.1. Antecedentes

El agua es un recurso que debe ser utilizado de manera responsable debido a su cantidad limitada, por lo que el tratamiento de las aguas servidas es un proceso que se ha vuelto importante en los últimos años en Chile. Además la normativa es cada vez más estricta, debido a las consecuencias que produce la descarga de efluentes con alto contenido orgánico a ríos y mares.

En la actualidad existen 289 plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) en el país, de las cuales 32 se encuentran en la Región Metropolitana; al año 2015 se trataron 527 millones de metros cúbicos de aguas servidas, que corresponde a un 100 % de cobertura del agua utilizada en la región en los diferentes sectores, de acuerdo a información de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (*SISS, 2015*).

El tratamiento de las aguas servidas, si bien permite devolver el agua a su cauce natural con un bajo impacto, genera una gran cantidad de residuos los cuales originan otra problemática: la disposición de los biosólidos, cuyo volumen al año 2015 llegó a las 321.903 toneladas en la Región Metropolitana (*Aguas Andinas, 2015*).

Para dar solución a esta problemática es que surge el Centro de Gestión Integral de Biosólidos (CGIB), proyecto iniciado por Aguas Andinas el año 2009, cuyo objetivo principal es tratar los residuos sólidos obtenidos de las PTAS para su disposición final.

Los biosólidos producidos en las PTAS de la Región Metropolitana poseen diversos destinos, los más importantes se presentan en la *Tabla 1*:

Tabla 1: Destino de biosólidos producidos en las principales PTAS de la región metropolitana. (Aguas Andinas, 2015)

Destino	**Toneladas**	[%]
Relleno sanitario	68.202	21
Centro de gestión integral de biosólidos El Rutal	104.822	33
Uso agrícola	148.879	46

Como se observa en la *Tabla 1*, luego del uso en predios agrícolas, el mayor porcentaje de destino de estos residuos es el CGIB, ubicado en fundo El Rutal en la comuna de Til Til, provincia de Chacabuco, posee un área total de 1.890 Ha y cuyo acceso se encuentra en el kilómetro 59 de la ruta 5 Norte, próximo a las localidades de Montenegro y Rungue.

Figura 1: Ubicación CGIB (Chávez, F., 2011)

El Centro de Gestión se construirá en etapas, con el propósito de abarcar 1.000 toneladas diarias de la producción de sólidos que reciben tratamiento biológico en la PTAS La Farfana y Trebal, de acuerdo a la información que muestra la *Tabla 2*.

Tabla 2: Etapas de desarrollo del CGIB de acuerdo al procesamiento de biosólidos. (Aguas Andinas, 2009)

Etapa	**Biosólidos tratados (75 % humedad)** $\left[{Ton}/{d}\right]$
I	300
II	750
III	1.000

Los sólidos que se reciben de las PTAS ya han pasado por el proceso de digestión anaerobia y centrifugado, con una humedad de ingreso aproximada de 75%, el cual es un valor alto, lo que conlleva un aumento en los costos de transporte, por el volumen que estos ocupan. Se le debe reducir el contenido de agua con el propósito de darle una disposición

final, ya sea en rellenos sanitarios autorizados, monorelleno, uso interno en El Rutal o uso externo como abono agrícola, por ejemplo, debido a la reducción de volumen y carga patógena (Ver *Figura 2*).

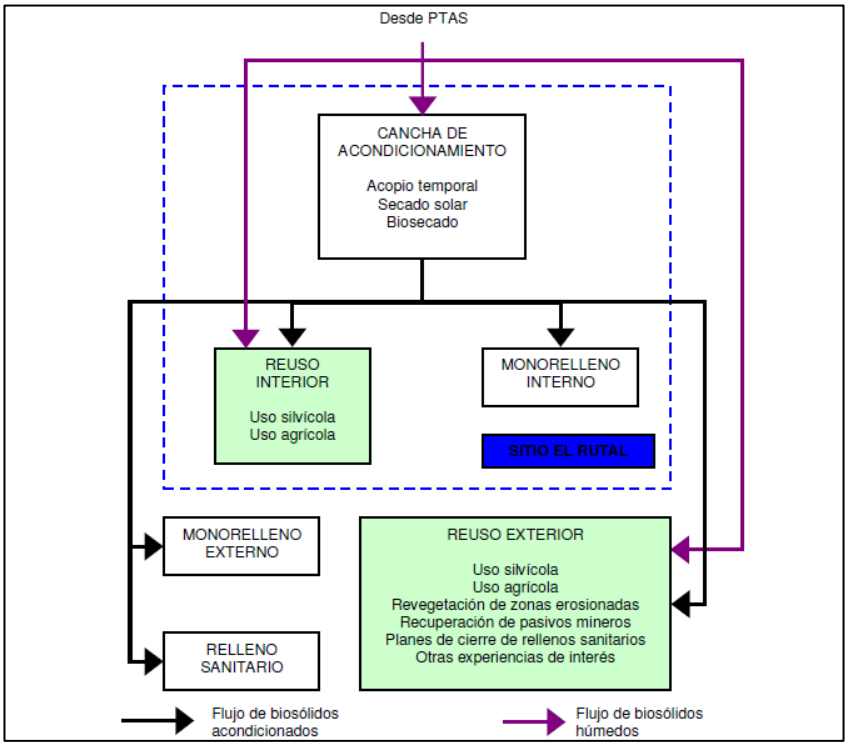


Figura 2: Línea de acción desde la llegada de los biosólidos desde las PTAS hasta su disposición final (Aguas Andinas, 2009)

Para lograr la disminución de la humedad de los sólidos se poseen dos técnicas de secado utilizadas de acuerdo a la época del año en la que se reciban:

Secado solar: proceso realizado entre los meses de octubre a abril (7 meses), se poseen 5 canchas de secado impermeables, con el propósito de evitar el drenaje a las aguas subterráneas, donde los sólidos se disponen en hileras de máximo 0,5 *m* de altura (*Fuentes, M., 2016*) realizando volteo periódico hasta alcanzar la humedad deseada para su retiro (40 %). Con esto se optimiza el manejo y disposición de los sólidos como monorelleno o para reuso.

Secado biológico: se realiza entre los meses de mayo a septiembre (5 meses) debido a la ausencia de altas temperaturas; se elaboran pilas mezclando cantidades determinadas de sólido húmedo (proveniente de las PTAS), sólido seco (sometido ya a secado solar) y material estructurante; esta composición, más los volteos esporádicos, permiten entregar las condiciones aeróbicas a la pila para promover el proceso de secado.

3.2. Problemática

En los meses de verano, donde las altas temperaturas permiten desarrollar el secado solar obteniendo buenos resultados, el proceso de secado se desarrolla de forma eficiente, ya que las condiciones meteorológicas fomentan la evaporación del agua de los sólidos. Sin embargo, en los meses donde las temperaturas disminuyen, se presenta un problema que al día de hoy no se ha encontrado una solución permanente: presencia de malos olores en las poblaciones cercanas a El Rutal, principalmente Rungue y Montenegro, quienes se han quejado con mayor frecuencia en los meses de mayo, junio y agosto, donde se lleva a cabo el biosecado o secado biológico.

Tabla 3: Número de llamados realizados por las comunidades aledañas a El Rutal por malos olores (Aguas Andinas, 2015)

	Llamados Aló Vecino				
Mes	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**
Enero			4	20	4
Febrero		3	3	2	2
Marzo		3	7	4	1
Abril		2	6	8	3
Mayo		3	20	26	7
Junio		1	12	40	2
Julio		9	10	7	3
Agosto		18	19	4	2
Septiembre		8	4	6	
Octubre	1	9	2		
Noviembre	4	7	10	2	
Diciembre	5	5	3		
Total anual	10	68	100	119	24

Como se observa en la *Tabla 3*, se tiene que desde el inicio de las operaciones del CGIB se han presentado quejas por malos olores a través de la línea gratuita "Aló vecino", las denuncias son investigadas por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) de la Universidad de Chile, quienes realizan una visita a terreno con el propósito de determinar la intensidad, origen y fuente de los olores, estableciendo así si estos son debido a la empresa o externos.

Aguas Andinas, como empresa preocupada por el bienestar de las comunidades aledañas a sus instalaciones, ha implementado diversas medidas de mitigación de olores con el propósito de reducir el impacto de sus procedimientos. Particularmente para su Centro de Gestión Integral de Biosólidos, desde sus inicios se han generado medidas de prevención y mitigación tales como:

- Aplicación de catalizador orgánico, *Biostreme*, el cual acelera las reacciones químicas y biológicas, permitiendo así una reducción de la emisión de olores, mejorando la consistencia de los biosólidos (Ver en Anexos el detalle del producto, sección 10.6).
- El horario de volteo de las pilas queda determinado de acuerdo a la dirección del viento, si éste va en dirección a los poblados cercanos, el volteo se reprograma.
- Disminución de actividades de secado, cuando los reclamos aumentan.
- Cuando se presenta emergencia ambiental no se realizan volteos.
- Para evitar un aumento de la humedad del biosólido producto de las precipitaciones, las pilas se tapan el día anterior; cuando se destapan, se realiza el volteo de una pila por día, debido a los malos olores generados por la condición anaeróbica.

Además se han establecido mesas de trabajo con las comunidades cercanas, con el propósito de establecer una comunicación directa entre los vecinos y la empresa, de manera de poder detectar de forma temprana eventuales problemas, dificultades y molestias, logrando así establecer relaciones de confianza a través del compromiso y la responsabilidad.

De esta manera surge la idea de implementar una solución definitiva a los malos olores presentes en el CGIB, por lo que el año 2015 se plantea la alternativa de construir un invernadero donde se realice biosecado de forma contenida. De esta forma se propone llevar a cabo el secado en los meses de invierno, además con la instalación de una chimenea y lavador de gases, que permitan disminuir la emisión de gases a la atmósfera y por tanto a las poblaciones aledañas.

3.3. Introducción teórica

Desde el punto de vista teórico, el secado es un proceso en el cual el agua presente en un compuesto se evapora, reduciendo así la masa de éste y modificando sus propiedades tanto cualitativas como cuantitativas.

El secado es un proceso de remoción de agua, que en el caso de los biosólidos, permite aprovechar los residuos de los procesos industriales, ya que al eliminar el agua se reduce la actividad de microorganismos, logrando su preservación; estos son obtenidos en grandes cantidades, por lo que se consigue así disminuir los niveles de contaminación dándole uso a todos los componentes que conforman la producción de productos.

3.3.1. Conceptos previos

A continuación se definen los conceptos utilizados para describir la teoría de secado (*Geankoplis, 1998*).

Humedad: cantidad de vapor de agua por unidad de aire seco.

Humedad libre: humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio.

Humedad ligada: humedad presente en una sustancia que posee una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido en estado puro en iguales condiciones de temperatura.

Humedad no ligada: contenido de humedad que ejerce la misma presión de vapor en el equilibrio que el líquido puro.

Humedad de equilibrio: humedad presente en una sustancia cuya presión de vapor es igual a la presión de vapor del agua en el aire o medio

3.3.2. Curva de velocidad de secado

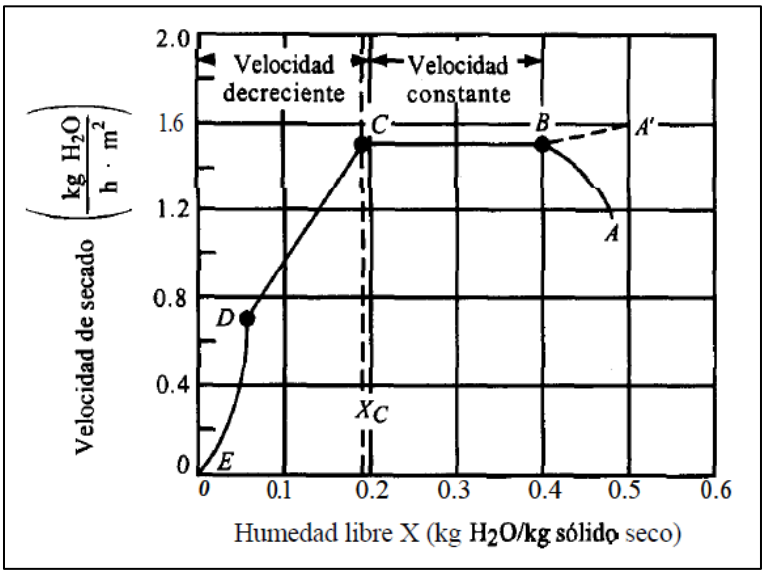


Figura 3: Curva de velocidad de secado en función de la humedad libre (Geankoplis, 1998)

Como muestra la *Figura 3*, se tiene la velocidad de secado en condiciones de secado constante (humedad, temperatura y dirección del viento sin variaciones): partiendo en el punto A, el cual corresponde a la humedad libre del compuesto; en este punto es donde la velocidad de secado aumenta. Se puede partir en el punto A' cuando la superficie del compuesto se encuentra muy caliente, éste es un proceso que se da en estado no estacionario y suele ser de corta duración. Llegando al punto B se logra que la temperatura

de la superficie alcance su valor de equilibrio. La recta que se aprecia entre los puntos B y C corresponde al período de velocidad de secado constante. A partir del punto C la velocidad disminuye hasta D, por lo que la recta CD corresponde al período de velocidad decreciente. Finalmente en el punto D la velocidad decrece con mayor rapidez, hasta llegar a la humedad de equilibrio, punto E.

Si bien el proceso se puede dar en diferentes condiciones constantes, siempre están presentes ambas etapas: velocidad de secado constante y decreciente.

En la etapa de velocidad constante, la superficie del sólido contiene una gran cantidad de agua, la cual se asemeja a una película continua; en este período el proceso de secado se lleva a cabo como si no estuviese presente el compuesto, sin embargo la morfología de éste puede aumentar la velocidad de secado, favoreciendo el proceso. Si el sólido posee una estructura porosa, el agua que se elimine será la proveniente de su interior, la etapa se prolonga mientras la velocidad de evaporación sea igual a la con que ésta llegue a la superficie. La temperatura del proceso en la etapa de secado a velocidad constante es equivalente a la temperatura de bulbo húmedo.

Para determinar numéricamente la velocidad de secado en período constante se debe seguir el siguiente procedimiento (*Treybal, 1980*):

Calcular la humedad libre

$$X = X^* - X_t \tag{1}$$

Donde X^* es la humedad en equilibrio y X_t, humedad registrada en tiempo t. Luego se grafica la humedad libre en función del tiempo obteniendo una curva que permite modelar la velocidad de secado:

$$R = -\frac{L_s}{A} * \frac{dX}{dt} \tag{2}$$

Siendo R la velocidad de secado medida en $kg_{agua}/m^2 * s$, L_s masa de sólido seco en kg y A el área expuesta al secado en m^2. Si se integra la ecuación (2) desde X_1 en $t_1 = 0$ a X_2 en $t_2 = t$ se determina el tiempo que demora la etapa de secado a velocidad constante:

$$t = \frac{L_s}{A * R_c} * (X_2 - X_1) \tag{3}$$

R pasa a ser R_C, que es la velocidad de secado en período constante, ya que en ese período X_1 y X_2 son menores que la humedad crítica X_C.

Si se considera que la transferencia de calor se realiza únicamente por efectos de convección y que en condiciones estacionarias la velocidad de este proceso es igual a la de transferencia de materia, se tiene que:

$$q = h * (T - T_w) * A \tag{4}$$

Siendo q la velocidad de transferencia de calor, T_w la temperatura del sólido, T temperatura del medio, y h el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

El flujo del vapor de agua (N_A) desde el sólido al medio circulante sería:

$$N_A = k_y * (y_w - y) \tag{5}$$

Siendo k_y el coeficiente convectivo de transferencia de materia, y_w es la fracción molar del vapor de agua en el gas en la superficie, e y es la fracción molar de vapor de agua en el gas (Ver representación gráfica en *Figura 4*).

Haciendo el supuesto (*Treybal, 1980*):

$$y \cong \frac{HM_B}{M_A} \tag{6}$$

Donde H es la humedad del aire o gas, M_A es el peso molecular del agua y M_B, del aire.

Se tiene que:

$$N_A = k_y * \frac{M_B}{M_A} * (H_w - H) \tag{7}$$

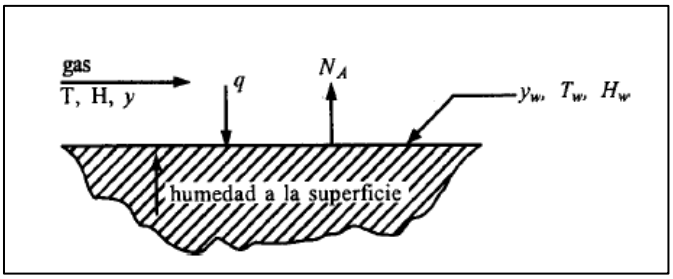


Figura 4: Transferencia de calor y materia de un sólido al ambiente (Geankoplis, 1998)

Por tanto, al igualar las ecuaciones (4) y (7):

$$q = M_A * N_A * \lambda_w * A \tag{8}$$

Siendo λ_w el calor latente a la temperatura T_w.

Igualando las ecuaciones (4) y (8) se llega a la relación entre los procesos de transferencia de materia y calor:

$$R_C = \frac{q}{A\lambda_w} = \frac{h * (T - T_w)}{\lambda_w} = k_y * M_B * (H_w - H) \tag{9}$$

En ausencia de transferencia de calor por conducción y radiación, se tiene que la temperatura del sólido será la temperatura de bulbo húmedo del aire, mientras dure el proceso de secado a velocidad constante.

El tiempo de secado se puede determinar igualando R, ecuación (2), con el valor de q ecuación (8):

$$t = \frac{L_s * \lambda_w * (X_1 - X_2)}{A * h * (T - T_w)} = \frac{L_s * (X_1 - X_2)}{A * k_y * M_B * (H_w - H)} \tag{10}$$

La etapa de velocidad de secado decreciente se da cuando se llega al contenido de humedad libre crítico, es decir, el contenido de humedad en la superficie no es suficiente para mantener la película continua. La superficie húmeda se comienza a reducir hasta quedar completamente seca (punto D de *Figura 3*). El segundo período decreciente se da cuando la evaporación comienza a ocurrir a nivel interno de la estructura sólida. El calor se transfiere a través del compuesto hasta llegar a la zona de vaporización. El agua evaporada se mueve por el sólido hasta llegar al medio externo.

La velocidad de secado R en esta etapa no es constante, ya que luego de pasar la humedad libre crítica X_C, ésta va disminuyendo.

El tiempo de secado para esta etapa se calcula de la siguiente manera:

$$t = \frac{L_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R} \tag{11}$$

3.3.3. Clasificación del proceso de secado

En la industria existen diferentes métodos para secar sólidos, dependiendo del tipo y el uso final que se le dará, es la selección del equipo y metodología a seguir.

Método de operación: se puede secar en proceso continuo (estado estacionario) o por lotes (proceso intermitente de carga y descarga).

Mecanismo de transferencia de calor: secado directo, la sustancia a secar se pone en contacto directo con el gas caliente que permite la remoción del agua (convección). Secado indirecto, el calor se obtiene mediante un intermediario entre el gas o sustancia caliente y el sólido (conducción), el cual puede ser una bandeja metálica, exposición a radiación infrarroja, etc.

Compuesto a secar: la sustancia a secar puede ser un sólido, el cual a su vez puede ser frágil o fuerte; puede ser granular como también puede ser un material delicado. La manipulación de éste es quién definirá el tipo de secado y la técnica a utilizar.

Para el caso particular del compuesto a secar en el CGIB, estos corresponden a biosólidos, que son los residuos provenientes del tratamiento de las aguas servidas. Sus propiedades se muestran en la *Tabla 4*:

Tabla 4: Propiedades biosólidos que recibe el CGIB para su secado (Aguas Andinas, 2009)

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
pH	7,3	Nitrógeno total [%]	3,2
Sólidos totales [%]	65	Anhídrido fosfórico [%]	4,5
Sólidos volátiles [%]	45	Potasio [%]	0,4
$Cu\ \left[{}^{mg}/_{kg}\right]$	630	$Zn\ \left[{}^{mg}/_{kg}\right]$	1857
$Ni\ \left[{}^{mg}/_{kg}\right]$	48	$As\ \left[{}^{mg}/_{kg}\right]$	10
$Cd\ \left[{}^{mg}/_{kg}\right]$	2	$Hg\ \left[{}^{mg}/_{kg}\right]$	2
$Se\ \left[{}^{mg}/_{kg}\right]$	2	$Pb\ \left[{}^{mg}/_{kg}\right]$	76

De acuerdo a las propiedades de los biosólidos dispuestos a secar, el alta carga orgánica que poseen y el lugar donde se realizará el proceso, CGIB, Til Til, el secado que se utiliza es por lotes y directo.

3.3.4. Equipos para secado

A continuación se describen los diferentes equipos utilizados en la industria para el proceso de secado de sólidos:

Secado en bandeja: proceso por lotes, el sólido se distribuye de manera homogénea en las bandejas o anaqueles de metal, como se muestra en la *Figura 5*. Aire calentado mediante un calentador, que puede ser eléctrico, es recirculado de forma paralela a las bandejas permitiendo así la transferencia de materia.

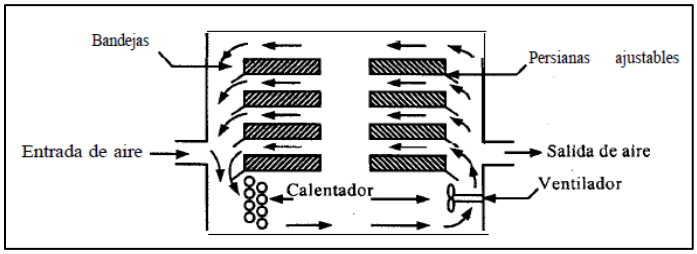


Figura 5: Esquema secado en bandejas (Geankoplis, 1998)

Secado indirecto al vacío en anaqueles: proceso por lotes, gabinete metálico con puertas herméticas para asegurar la condición de vacío; los anaqueles se conectan a los colectores de vapor, así las bandejas que contienen los sólidos húmedos se disponen en ellos. El calor se transfiere a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Este tipo de secador se usa en productos de alto costo o bien, que sean sensibles a la temperatura o que se oxiden fácilmente; permiten manejar sólidos con compuestos tóxicos o valiosos. Esquema del proceso se observa en la *Figura 6*.

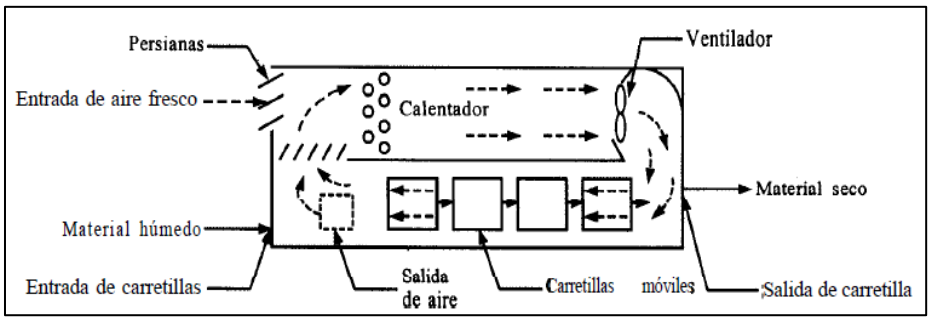


Figura 6: Esquema secado indirecto al vacío con anaqueles (Geankoplis, 1998)

Secado continuo en túnel: proceso utilizado para el secado principalmente de alimentos, los sólidos se disponen en bandejas metálicas, las cuales se hacen circular por un túnel en donde se ponen en contacto con gases calientes en contracorriente o paralelo.

Secador rotatorio: proceso continuo el cual consiste de un tambor metálico (ver *Figura* 7) el cual gira sobre su eje, inclinado levemente hacia la salida. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por la parte superior y se van desplazando por el cilindro a medida que éste gira. El calentamiento es por contacto directo mediante gases calientes que circulan a contracorriente.

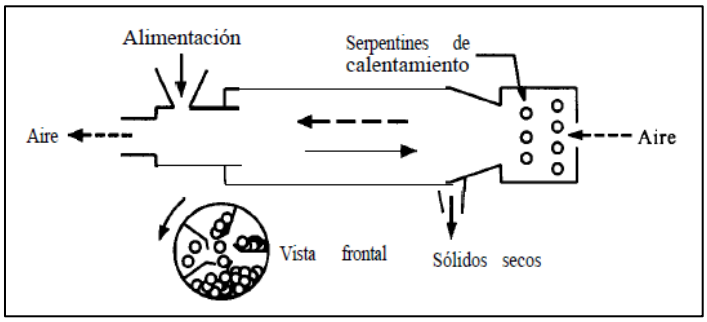


Figura 7: Esquema secado rotatorio (Geankoplis, 1998)

<u>Secador de tambor:</u> proceso continuo, consiste en un tambor de metal calentado, como se observa en la *Figura 8*, al cual en su exterior se evapora el agua en una capa delgada de líquido hasta que se seca. El sólido, luego de ser secado por completo, se raspa de la superficie del tambor, el cual gira lentamente. Este tipo de proceso es adecuado cuando se desea secar suspensiones o pastas de sólidos.

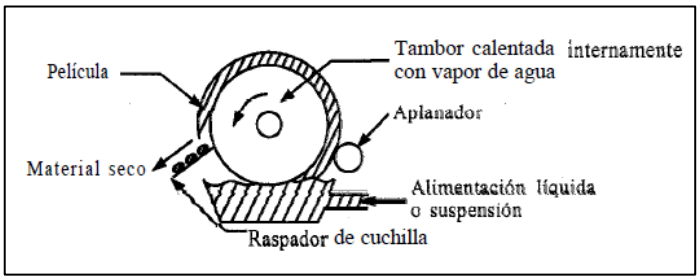


Figura 8: Esquema secado de tambor (Geankoplis, 1998)

<u>Secado por aspersión:</u> proceso continuo, líquido o suspensión se atomiza en una corriente de gas caliente con el propósito de obtener gotas finas. El agua de esa corriente se evapora rápidamente, por lo que se obtiene sólidos secos que se separan de la corriente gaseosa. El flujo de gas y líquido pueden ir en contracorriente, paralelo o una combinación. La corriente gaseosa luego de salir de la cámara de aspersión se dirige a un ciclón donde se separan las partículas finas, las cuales son muy ligeras y porosas. Un esquema del proceso se observa en la *Figura 9*.

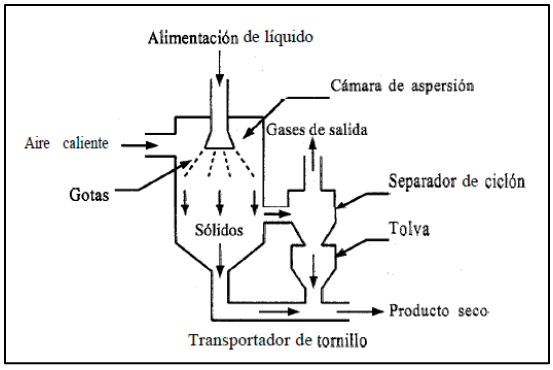


Figura 9: Esquema proceso de secado por aspersión (Geankoplis, 1998)

El secado que se realiza a los biosólidos dispuestos en el CGIB depende de la estación del año en la que estos lleguen a El Rutal: desde octubre hasta abril se realiza secado solar, y entre los meses de mayo a septiembre se realiza biosecado.

Secado solar: el biosólido se dispone en hileras de máximo 50 *cm* de altura, realizando volteo esporádico mediante un tractor con tornillo de mezcla sinfín, esto se realiza hasta que la pila logre un 60 % de sólidos totales. Se dispone de 5 canchas acondicionadas en El Rutal para realizar este proceso. Técnica sencilla y eficaz, fácil de aplicar (*Fuentes, M., 2016*).

Biosecado: secado biológico que involucra la mezcla y formación de pilas de biosólidos húmedos (estabilizados y deshidratados) con biosólidos secos y astillas de madera u otro material estructurante para generar bajo condiciones aeróbicas un aumento de la temperatura dentro de las pilas, lo que permite secar los biosólidos (*Fuentes, M., 2016*).

El procedimiento a seguir para el proceso de biosecado consta de cuatro etapas (*Aguas Andinas, 2009*):

1. Pre mezcla de materiales que conforman la pila
2. Máquina volteadora da forma a la pila y realiza volteo periódico
3. Cuando se ha alcanzado el porcentaje de sólidos totales fijado, 60 %, la pila se tamiza
4. Biosólido estable es almacenado

Las pilas se disponen en 5 canchas de asfalto donde se dejarán mientras se secan, haciendo el seguimiento y muestreo respectivo. Uno de los criterios de volteo es cuando la temperatura de la pila sea mayor o igual a 40 ℃.

3.3.5. Actividad microbiana

El biosecado es un proceso de reducción de la humedad de un sólido debido a la acción de bacterias, las cuales al metabolizar el contenido orgánico del lodo aumentan su temperatura, permitiendo así la evaporación del agua contenida (*Cai et al., 2012*).

El biosólido se caracteriza por poseer una alta variedad de bacterias, las cuales modifican su distribución de acuerdo a la etapa por la cual atraviesa el secado del biosólido, las cuales son (*Cai et al., 201*6):

Etapa mesofílica: la temperatura del lodo fluctúa entre 25 y 35 ℃. Las principales bacterias presentes en esta etapa son *Ferribacterium*, la cual se encarga de reducir el ión $Fe(III)$ (*Cummings et al., 1999*), *Acinetobacter*, que reduce el nitrato a amoniaco (*Trois et al., 2010; Mara et al., 2012*) y *Flavobacterium*, que se encarga de degradar la lignina y el pentaclorofenol (*Scelza et al., 2008; Aarthi et al., 2004*).

Etapa termofílica: la temperatura interna del lodo se mueve entre 60 y 70 ℃, donde *Acinetobacter* es la bacteria más abundante de la primera parte de la etapa termofílica; durante la segunda parte predomina la bacteria *Bacillus*, la cual degrada proteínas y

almidón; mientras que la *Pseudomonas* puede degradar lípidos y lignina (*Ten et al., 2005; Prabhakaran et al., 2015*).

Etapa de enfriamiento: finalizando el proceso de secado la bacteria predominante es *Sphingobacterium*, quien se encarga de degradar los ácidos grasos y otros compuestos complejos (*Kuo et al, 1999*).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo principal

El objetivo principal es estudiar la operación del biosecado en invernadero y evaluar si permite mitigar la emisión de malos olores.

4.2. Objetivos secundarios

- Estudiar si el invernadero mejora las condiciones de secado de los biosólidos.
- Medir las emisiones del invernadero, analizando los factores que inciden en ellas.
- Estudiar la relación entre temperatura, humedad y emisión de gases, dentro del invernadero.
- Evaluar las condiciones de funcionamiento óptimo del invernadero y equipos complementarios.

5. METODOLOGÍA

El proyecto realizado en esta memoria consistió en evaluar si el biosecado realizado en invernadero permitía reducir o mitigar los malos olores y comparar la operación en estas condiciones con la pila dispuesta a la intemperie, que es como se realiza en la actualidad el secado. Para ello se instalaron dos pilas en el recinto: una al interior del invernadero y otra al exterior, se midió tres veces a la semana el contenido de sólidos totales, temperatura y pH, hasta llegar a la humedad final previamente establecida (40 %), para luego comparar el comportamiento de ambas durante el proceso de secado.

A continuación se presenta cada una de las etapas que se llevaron a cabo para el estudio de biosecado en el invernadero del CGIB.

5.1. Armado y volteo de las pilas

Las pilas tienen una dimensión aproximada de 35 m de largo, 5 m de ancho y 1,5 m de alto. Están compuestas de lodo húmedo (75 % de humedad proveniente de La Farfana y Trebal), lodo seco (lodo ya procesado) y material estructurante.

Los componentes se mezclan en las canchas de secado gracias a la acción de un cargador frontal *Tolva Ford* o *Scania* de 10 toneladas, el cual también le da forma a la pila. Se mezcla un total de 240 m^3 de biosólido, los cuales se distribuyen de forma equitativa en dos partes: una fracción se deposita en el interior del invernadero y la otra en el exterior, que representaría su homólogo o par.

Se realiza volteo frecuente de las pilas, día por medio, esto con el propósito de favorecer la aireación y con ello la reacción exotérmica que se produce en su interior y el secado. El volteo se realiza mediante la máquina marca *Backhus*, modelo *21.50* (ver *Figura 10*), la cual posee un tornillo sinfín, el cual gira a una velocidad de 3500 rpm permitiendo así la homogenización del biosólido.

5.2. Criterios de volteo y retiro pilas

De acuerdo a reuniones previas al inicio del control y muestreo de las pilas de biosólidos, junto al personal del CGIB se establecieron los criterios a seguir durante el período de secado de los lodos, según experiencias anteriores de prueba:

- Cuando la temperatura del biosólido sea mayor o igual a 40 ℃, se realizará un volteo de la pila, esto para favorecer la aireación del lodo y la actividad microbiana.
- Cuando se llegue a un porcentaje mayor o igual al 60 % de sólidos totales, o bien, a un 40 % de humedad en la pila; ésta estará lista para su retiro y disposición final.

Figura 10: Máquina volteadora de los biosólidos (Elaboración propia).

5.3. Invernadero

El galpón es tipo invernadero, ya que sus dimensiones y estructura son las mismas que posee este tipo de construcción utilizada para el crecimiento de plantas; por tanto se habla indistintamente de galpón o invernadero.

El invernadero está construido sobre una base de concreto, con paredes del mismo material de altura $1{,}5\ m$, siendo la cubierta del invernadero de policarbonato alveolar marca *DVP* con protección UV y un 90 % de transmisión de luz solar.

Las dimensiones del invernadero son $40\ m$ de largo, $9{,}6\ m$ de ancho y $7{,}5\ m$ de alto (ver *Figuras 11* y *12*). Entregando así un volumen disponible para la disposición de biosólidos de $2.880\ m^3$.

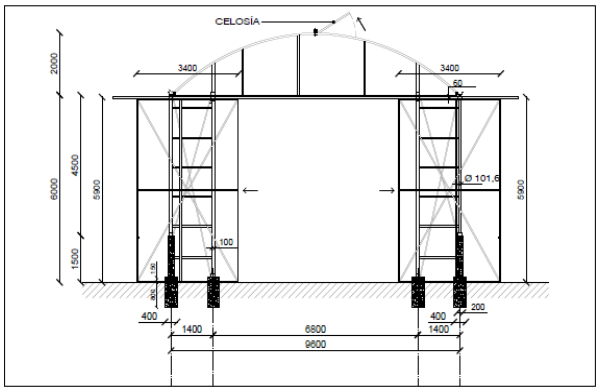


Figura 11: Vista frontal galpón (PROAMCO, 2016)

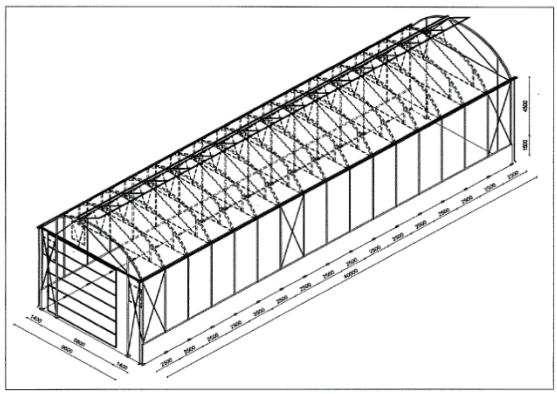


Figura 12: Viste superior galpón (PROAMCO, 2016)

Posee una celosía sobre portón sur (*Figura 11*) que permite el ingreso de aire fresco, con un área disponible de 5 m^2 cuando ésta se encuentra 100 % abierta.

Cuatro ventiladores dispuestos en el interior del invernadero, cuyo flujo es 6.000 m^3/h, velocidad de giro de 1450 rpm y potencia de 0,96 HP. Su función es recircular el aire dentro del galpón para favorecer el transporte de agua desde el biosólido al flujo de aire que ingresa.

Tres extractores marca *Moderar*, modelo *VL 465* que funcionan en paralelo, cuyo flujo de operación es de 6.000 m^3/h, velocidad de giro de 1450 rpm y potencia de 6,26 HP. Su función es extraer el aire que circula en el interior del galpón.

Lavador de gases que funciona con agua potable, la cual es recirculada con bomba centrífuga marca *Iwaki*, modelo *MX402HCV6*, cuyo flujo es de 0,06 m^3/min y velocidad de giro 2900 rpm. Su función es tratar el flujo que proviene del invernadero, el cual trae una alta carga de gases contaminantes, por lo que, mediante un flujo de agua a contracorriente, se absorben estos compuestos, entregando un flujo gaseoso más limpio.

El lavador se conecta con una chimenea de 12 m de altura de acero revestido con HDPE a través de una tubería del mismo material, la cual libera el flujo de gases, debido a su altura de ésta, estos son dispersados al ambiente.

Figura 13: Vista interior del invernadero (Elaboración propia).

Figura 14: Sensores de gases interior invernadero (Elaboración propia)

Figura *15: Ubicación sensores dentro de invernadero (Elaboración propia).*

Figura 16: Vista interna del invernadero con biosólido (Elaboración propia).

La disposición de los sensores dentro del invernadero, tomando como referencia la vista frontal del galpón (*Figuras 13* y *16*) es la siguiente:

- A 15 m de la puerta norte en costado izquierdo sobre la pared de concreto (1,5 m) se encuentra el sensor de H_2S; sobre éste a 2,5 m se ubican los sensores de $COV´s$ y NH_3.
- A 4 m de la puerta norte en costado izquierdo sobre la pared de concreto se ubica el sensor uno de temperatura y humedad (tercer pilar).
- A 27 m de la puerta norte en costado izquierdo sobre la pared de concreto a 6,5 m de altura se ubica el segundo sensor de humedad y temperatura (quinceavo pilar).
- A 9,5 m sobre la base del invernadero se encuentran los cuatro ventiladores distribuidos equidistantes entre sí.

En el exterior del galpón se ubica el sensor de humedad y temperatura, el cual está dispuesto, de acuerdo a *Figura 17*, en la pared izquierda a $9{,}5\ m$ de la superficie (sobre puerta de emergencia).

Como indica la *Figura 19*, la tubería que extrae los gases del invernadero los conduce a tres extractores que funcionan en paralelo, para luego pasar a través de un lavador de gases que funciona con agua potable; para analizar la capacidad de absorción de gases de éste se dispone de sensores de humedad, temperatura y gases a la salida (*Figura 18*) para finalmente liberar la corriente gaseosa a través de una chimenea.

<u>Sensor de humedad y temperatura:</u> transmisor de humedad no condensada y temperatura proveedor *VETO*, modelo *A6041928*; rango de humedad relativa de $0 + 100\ \%$ con una exactitud del $3\ \%$. El rango de medición de temperatura es de $-20 + 80\ ℃$ con una exactitud de $\pm 0{,}4\ \%$. Éste se instaló dentro del invernadero (dos transmisores).

<u>Sensor de humedad y temperatura:</u> transmisor de humedad condensada por períodos cortos y de temperatura proveedor *VETO*, modelo *A6041901*; rango de humedad relativa de $0 + 100\ \%$ con una exactitud de $2{,}5\ \%$; el rango de temperatura es de $-20 + 80\ ℃$ con una exactitud de $\pm 0{,}4\ \%$. Éste se instaló en el exterior del invernadero y tubería luego del lavador.

<u>Sensor de gases:</u> equipo marca *Dräger*, modelo *Polytron 7000*. Funciona entre $-40 + 65\ ℃$ de temperatura; y una humedad relativa que fluctúe entre $0 + 100\ \%$ sin condensación. Instalado en interior del invernadero y tubería.

Figura 17: Vista exterior invernadero (Elaboración propia).

Figura 18: Sensores ubicados en tubería luego del lavador de gases (Elaboración propia).

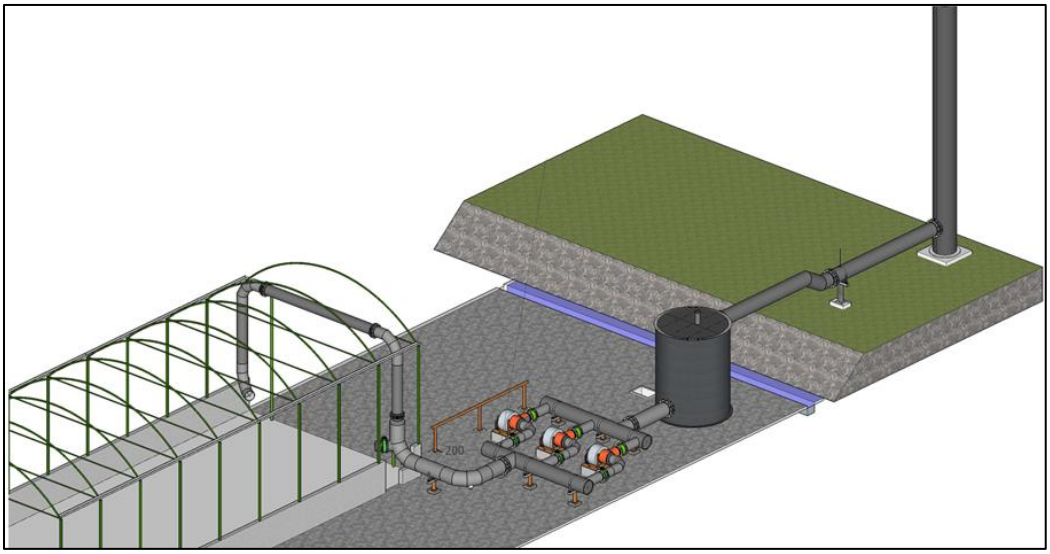


Figura 19: Vista general del invernadero y la conexión a extractores, lavador y chimenea. (PROAMCO, 2016)

Las principales variables medidas fueron las siguientes:

Biosólido

- Temperatura
- Sólidos totales
- Humedad
- pH

Invernadero

- Concentración de gases
- Funcionamiento extractores y ventiladores del invernadero

El procedimiento de medición realizado se llevó a cabo en diferentes etapas:

Verificación del normal funcionamiento de los equipos del invernadero: antes de ingresar al galpón se registró la condición que indica el semáforo (verde, amarillo o rojo) instalado en la parte superior de la construcción; se revisó el panel donde se encuentra el HMI y PLC que controlan a los equipos instalados en el invernadero, permitiendo que éste funcione con sus tres extractores y cuatro ventiladores encendidos.

Ingreso a invernadero: luego de asegurar la condición segura de operación, se abren los portones del galpón, haciendo ingreso, esto con la máscara con filtro de gases y sensores móviles de gases (NH_3 y H_2S) como medida preventiva. Se cierran los portones.

Muestreo: se toma muestra de biosólido en tres puntos de la pila, como indica *Figura 20*. Se mide temperatura y registra concentración puntual de gases (NH_3 y H_2S).

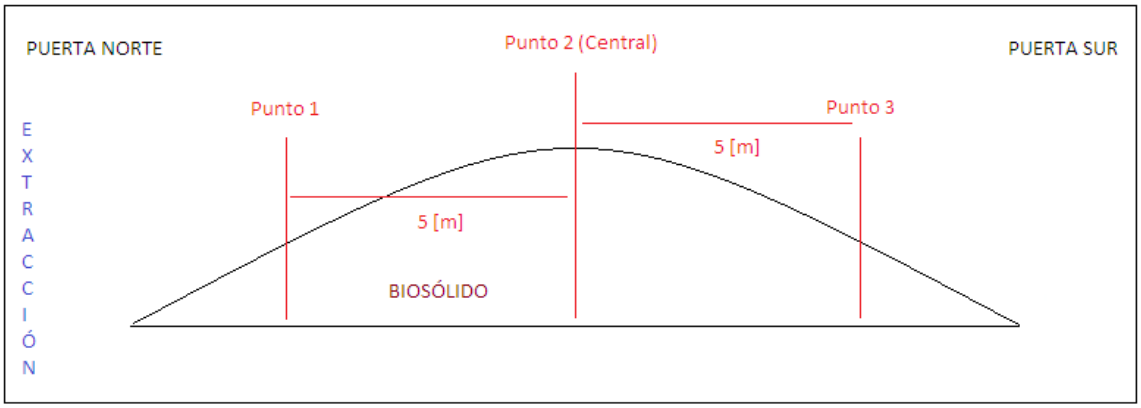


Figura 20: Muestreo realizado en pila ubicada en invernadero (Elaboración propia).

<u>Muestreo homólogo:</u> se mide temperatura y se toman muestras de biosólido en pila testigo ubicada en el exterior de la misma forma que la ubicada en invernadero, además del registro de la concentración puntual de gases.

Este procedimiento se realiza día por medio, idealmente los días lunes, miércoles y viernes.

5.4. Registro mediciones

Para el registro de los datos se asignan nombre a cada pila muestreada, es decir, para la primera tanda de valores se denomina **"Pila Uno Inv"** al biosólido dispuesto en el interior del galpón y **"Pila Uno Ext"** a su homólogo ubicado a la intemperie; lo mismo se aplica para las otras dos tandas de seguimiento.

Las mediciones realizadas se registraron de acuerdo a la *Tabla 5*:

Tabla 5: Identificación de los diferentes períodos de medición para cada tanda de pilas (Elaboración propia)

	Pila uno Invernadero			**Pila dos Invernadero**			**Pila tres Invernadero**		
	Inicio	**Término**	**Tiempo [d]**	**Inicio**	**Término**	**Tiempo [d]**	**Inicio**	**Término**	**Tiempo [d]**
Semana uno	28-07	31-07	4	17-08	21-08	4	02-09	04-09	3
Semana dos	01-08	07-08	7	22-08	28-08	7	05-09	11-09	7
Semana tres	08-08	14-08	7	29-08	01-09	4	12-09	16-09	5
Semana cuatro	15-08	16-08	2						

5.5. Equipos para control y muestreo

Temperatura: el equipo utilizado para medir esta variable es una termocupla marca *RTD Thermometer*, modelo *CHY 805*. El manual de uso en detalle en Anexos, sección 10.7.

Sensor de gases móvil: se utilizan como medida preventiva, equipo marca *MSA*, modelo *Altair 2X*. Medición de NH_3 y H_2S. El manual de usuario se muestra en Anexos, sección 10.8.

Barreno: barra de acero con abertura en forma de ojal en un extremo utilizada para tomar muestra de biosólido, ver *Figura 21*.

Máscara con filtro de gases: pieza facial cara completa, mediana. Marca *3M*, modelo *6800*. Cartuchos contra vapores y gases múltiples marca *3M*, modelo *6006*. Aprobado por el NIOSH (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional) contra ciertos vapores orgánicos, gases ácidos, amoníaco, metilamina o formaldehído.

Figura 21: Barreno para tomar muestra de biosólido (Elaboración propia).

Luego de tomar muestras de biosólido y medir temperatura de la pila, se realizan los análisis para medir sólidos totales, pH y humedad, permitiendo así caracterizar el lodo.

Sólidos totales: permite medir el contenido sólido presente en el lodo. Representa la humedad y se mide por diferencia de masas. Para esto se utiliza el equipo marca *Precisa*, modelo *XM 60*, su uso se detalla en Anexos, sección 10.9.

Figura 22: Equipo para medición de sólidos totales (Elaboración propia).

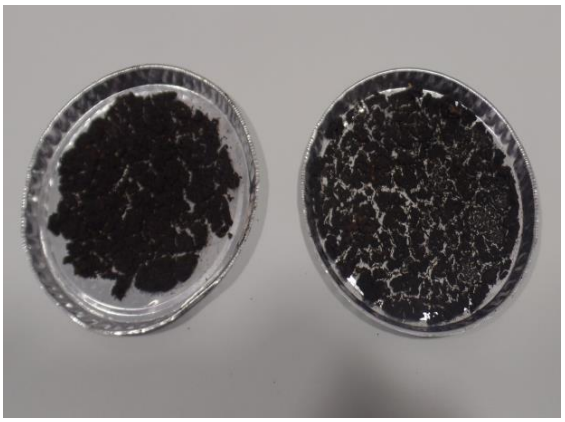


Figura 23: Muestras de biosólidos luego de medir sólidos totales (Elaboración propia).

Se tara una bandeja de aluminio y luego se masa aproximadamente 8 g de biosólido; se da inicio al funcionamiento del equipo, el cual comienza a secar la muestra a 105 $°C$ hasta llegar a una masa constante; el valor que entrega es en %, sin embargo también puede ser en g.

Esta medición demora por lo menos 30 minutos, por lo cual se analiza el punto central de la pila del invernadero y de su par del exterior.

<u>pH</u>: esta medición permite registrar el contenido de protones hidrógeno, H^+, del lodo estando en solución. Para ello se utiliza el equipo marca *ThermoScientific* modelo *Orion A121* (*Figura 24*), el cual se muestra en detalle en Anexos, sección 10.10.

Figura 24: pH-metro para medir concentración de iones hidrógeno del biosólido (Elaboración propia).

Se toma una muestra de aproximadamente 0,5 g de biosólido y se deposita en un vaso precipitado de 50 mL, con la ayuda de una espátula éste se disuelve en 10 mL de agua destilada; luego se agrega un imán que permita su fácil agitación al dejarlo sobre el agitador magnético. Esta medición se realiza en los tres puntos de cada pila.

<u>Humedad:</u> debido a que la medición de sólidos totales se realiza sólo en el punto central de cada pila, se mide en paralelo la humedad de los tres puntos, con el propósito de contrastar las mediciones. Para preparar las muestras se utiliza la balanza analítica marca *Precisa*, modelo *XT 220A* (detalle del uso en Anexos, sección 10.11), en la cual se tara una bandeja de aluminio y luego se masa aproximadamente $7\ g$ de muestra de biosólido de cada punto. Finalmente, posterior a haber registrado el valor de las masas, las muestras se llevan a secado en la estufa marca *Memmert*, modelo *UNB400* a $105\ ℃$ durante un mínimo de 24 horas.

Figura 25: Balanza analítica para preparar muestras (Elaboración propia).

Figura 26: Muestras de biosólido en estufa (Elaboración propia).

Figura 27: Estufa para medición de humedad (Elaboración propia).

Transcurrido este período de tiempo, la muestra se vuelve a masar en la balanza obteniendo así la masa final, con lo cual se puede calcular la humedad de la siguiente manera, de acuerdo al Instituto de Salud Pública (*ISP, 2000*):

$$H\ [\%] = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100 \qquad (12)$$

Siendo m_1 la masa de la bandeja de aluminio vacía; m_2 la masa de la muestra de biosólido más la bandeja y m_3 la masa de la muestra final.

5.6. Registro y medición de emisiones de gases

Existen sensores de gases instalados dentro del invernadero (*Figuras 14* y *15*) y en la tubería luego del lavador (*Figura 18*) que permiten registrar la emisión de gases de forma continua, debido a la presencia de un PLC que almacena datos cada 10 minutos; además de gases registra tanto humedad como temperatura interna y externa.

Tabla 6: Registro que realiza PLC instalado en invernadero (Elaboración propia).

Dato registrado	Unidad	Dato registrado	Unidad
NH_3	$[ppm]$	H_2S	$[ppm]$
COV	$[ppm]$	T_1, T_2, T_3, T_4	[°C]
HR_1, HR_2, HR_3, HR_4	[%]		

Siendo T_1 y T_2 temperaturas registradas al interior del invernadero; T_3 en el exterior y T_4 en la tubería instalada después del lavador. Lo mismo para las humedades relativas (HR_x).

El NH_3 se registra en el interior del invernadero y en la tubería luego del lavador. Lo mismo para los registros de H_2S y COV. El PLC registra además las fallas de los cuatro ventiladores y de los sensores de gases.

El invernadero dispone de semáforos en ambos portones, los cuales, de acuerdo a la programación pre definida, indican el estado dentro del invernadero:

Luz verde: condiciones tanto de gases como de temperatura son aptas para que personal capacitado ingrese.

Luz amarilla: alerta al personal a tomar precaución cuando se ingrese al invernadero, debido a que las concentraciones de gases y temperatura superan la condición de normalidad.

Luz roja: indica que el acceso al invernadero queda prohibido, ya que las emisiones de gases y temperatura están en niveles muy elevados de acuerdo a los parámetros previamente definidos.

La *Tabla 7* resume la condición que representa cada color del semáforo:

Tabla 7: Rangos de concentración de gases y temperatura que definen luz de semáforo en invernadero (Elaboración propia).

	Condición		
	VERDE	**AMARILLO**	**ROJO**
Sensor	**Menor a**	**Mayor o igual a**	**Mayor o igual a**
$NH_3[ppm]$	20	20	35
H_2S $[ppm]$	8	8	15
COV $[ppm]$	8	8	15
T [°C]	45	45	50

Esto de acuerdo a la normativa vigente respecto a la emisión de gases nocivos en espacios confinados (*Ministerio de Salud, 2000*) donde ingresará personal por un determinado período de tiempo. El PLC además registra cuando el invernadero está con semáforo en amarillo y rojo.

Los datos se guardan en un pendrive en formato *.dtl*, por lo cual deben ser transformados a *.xlsx* para poder ser leídos en un archivo Excel, esto gracias al programa *EasyBuilderPro*.

Como muestra la *Figura 28*, está el menú principal de la HMI donde se registran los datos de los sensores, se modifica el funcionamiento de los equipos y muestra el estado del invernadero.

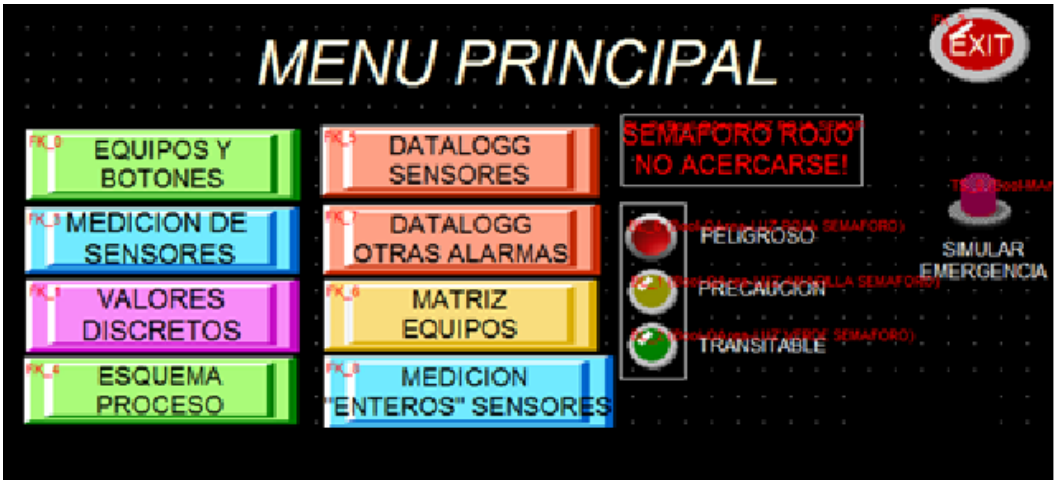


Figura 28: HMI de funcionamiento del invernadero.

En la opción *"Datalogg sensores"* se puede observar el registro de los sensores, los cuales se van almacenando en un pendrive ubicado en la parte posterior de la pantalla de la HMI. En *"Datalogg alarmas"* se registra cuando el semáforo pasa a amarillo o rojo. En la opción *"Esquema proceso"* se muestra un resumen de los equipos, la medición de los sensores y el estado actual de los equipos, como muestra la *Figura 29*:

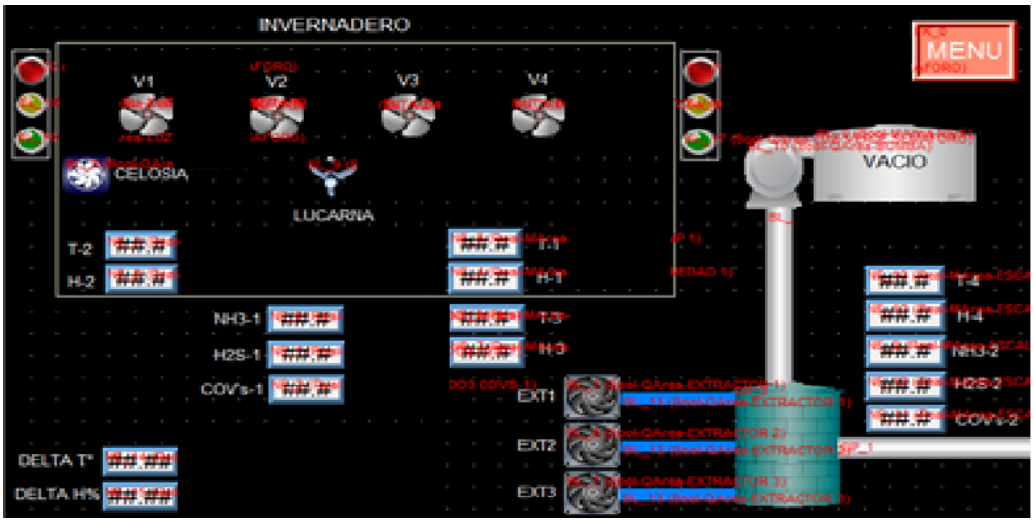


Figura 29: Esquema del proceso con sus sensores registrando el valor actual.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Temperatura y sólidos totales

El control y seguimiento del funcionamiento del invernadero inició el día 28 de julio, donde se preparó la pila de biosólido número uno y su homólogo en el exterior. Al 20 de septiembre se prepararon y dispusieron en invernadero y exterior un total de tres pares de pilas, lo cual se muestra en detalle en la *Tabla 8*. De acuerdo a la metodología descrita en la sección anterior los resultados obtenidos de las experiencias de control fueron los siguientes:

Tabla 8: Fechas de inicio y término de control de las tres primeras tandas de pilas (Elaboración propia).

	Invernadero			**Exterior**		
	Inicio	**Término**	**Tiempo [d]**	**Inicio**	**Término**	**Tiempo [d]**
Pila uno	28-07	16-08	20	28-07	16-08	20
Pila dos	17-08	01-09	15	17-08	14-09	24
Pila dos nueva	-	-	-	11-08	29-08	18
Pila tres	02-09	14-09	14	02-09	24-09	22

Como indica la *Tabla 8*, la duración de las pilas varía de acuerdo a las condiciones ambientales y operativas del invernadero, obteniendo los resultados que se muestran a continuación.

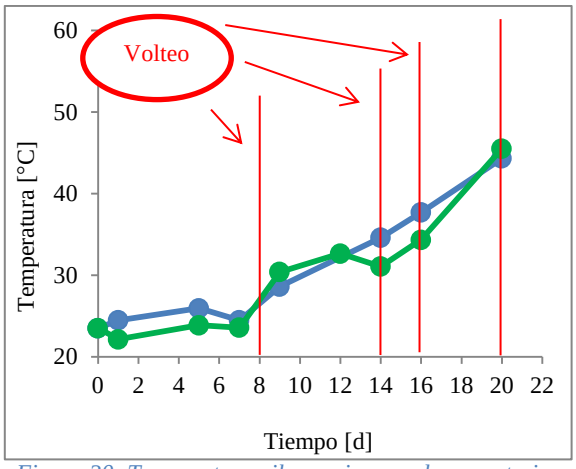


Figura 30: Temperatura pila uno invernadero y exterior

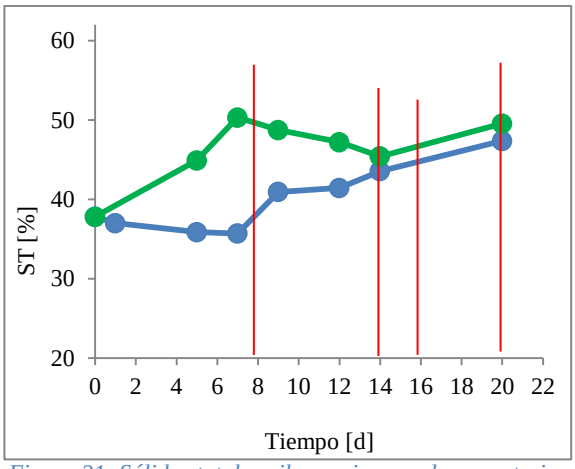


Figura 31: Sólidos totales pila uno invernadero y exterior

Pila Uno Inv — Pila Uno Ext

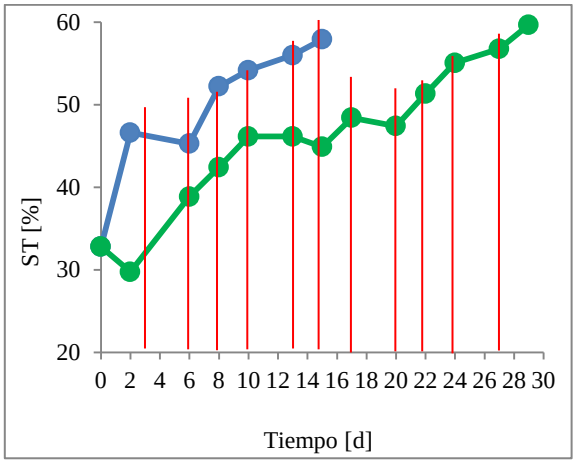


Figura 32: Sólidos totales pila dos invernadero y exterior

Pila Dos Inv — Pila Dos Ext

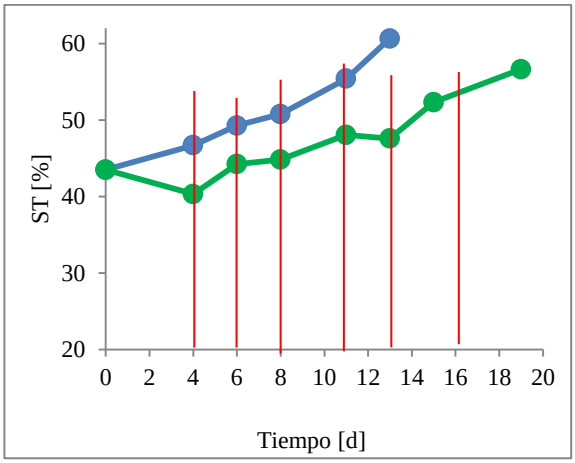


Figura 33: Sólidos totales pila tres invernadero y exterior

Pila Tres inv — Pila Tres Ext

Como se observa en la *Figura 30*, sólo se pudo realizar seguimiento de temperatura a la pila uno, debido a que el equipo presentó fallas en su funcionamiento.

Pila uno: tanto la temperatura de la pila del galpón como exterior fluctúa a lo largo del período de secado, esto debido principalmente a los días que se realizó volteo (líneas rojas verticales), ya que, al comparar esta acción respecto a las otras pilas, se realizó con menor frecuencia. La temperatura de la pila ubicada en el exterior varió más respecto a la del galpón, ya que debía acondicionarse a los cambios ambientales, llegando el día 20 a estar por sobre los 40 ℃, a partir de este valor es que la actividad microbiana se lograría desarrollar con normalidad (*Cai et al., 2016*). Lo mismo sucede con los sólidos totales, el porcentaje presente en la composición de ambas pilas no desarrolló una tendencia clara, ya que hay días que aumenta y otros que disminuye; debido principalmente a la falta de aireación de la pila, fomentando el desarrollo de un ambiente anaeróbico, impidiendo que la actividad microbiana se lleve a cabo y con ello, el secado del biosólido (*Deng et al., 2009*).

Pila dos: debido a problemas del equipo no se pudo medir temperatura, sin embargo se registró la evolución de los sólidos totales, los cuales a medida que la pila se iba secando, fueron aumentando en valor, ya que la humedad propia del sólido fue disminuyendo; la pila demoró 15 días aproximadamente en secarse, esto debido, además de los volteos periódicos, a las condiciones ambientales, ya que la temperatura ambiental durante el secado bordeó los 30 ℃.

Pila tres: los sólidos totales para esta tanda de pilas presentó una tendencia más definida, ya que a medida que ésta se iba secando, el porcentaje fue en aumento hasta llegar al criterio definido. El volteo se realizó día por medio, favoreciendo la aireación de la pila, el aumento de la temperatura y la actividad microbiana, logrando de esta forma que el sólido se secara en 14 días aproximadamente.

A continuación se muestra un resumen de los datos finales de cada pila.

Tabla 9: Valores de temperatura (pila uno) y sólidos totales con los cuales se retiraron las pilas del invernadero y exterior (Elaboración propia).

	Pila Uno		**Pila Dos**		**Pila Tres**	
	Invernadero	**Exterior**	**Invernadero**	**Exterior**	**Invernadero**	**Exterior**
$\mathbf{ST_f}$ [%]	47,3	49,54	57,91	59,68	60,65	56,64
$\mathbf{T_f}$ [℃]	44,32	45,53				

Como se observa en la *Tabla 9*, se tiene que para la pila de biosólidos uno y su homólogo en el exterior no se aplicaron los criterios definidos para los volteos y retiro (temperatura sobre los 40 ℃ para voltear y 60 % de sólidos totales o más para retirarla del galpón), esto debido a que ANAM (Análisis Ambientales) comenzaría a realizar un seguimiento de las emisiones de olores en las pilas del invernadero; por tanto la primera tanda se retiró del lugar y se dispusieron las segundas pilas. El aumento del porcentaje de sólidos totales de las pilas dos y tres fue más rápido, principalmente debido a la aireación frecuente de la pila, permitiendo que el agua se evaporara con mayor facilidad, logrando que las pilas se secaran en menor tiempo.

6.2. Tiempo de secado

A continuación se muestran los tiempos que demoraron las pilas en secar tanto dentro como fuera del galpón.

Tabla 10: Tiempo de secado de las pilas en invernadero y exterior (Elaboración propia).

	Invernadero $[d]$	**Exterior** $[d]$
Pila Uno	20	20
Pila Dos	15	28
Pila Tres	14	22

Según *Tabla 10*, el tiempo que demora el biosólido en galpón en llegar a la humedad definida para su retiro es considerablemente menor respecto a su réplica en el exterior, llegando, para el caso de la pila dos, a la mitad del tiempo. Esto debido a las condiciones que se crean en el galpón: alta humedad y temperatura (*Bennamoun, 2012*).

Cuando la temperatura de la pila está por sobre los 40 ℃ aproximadamente, la actividad microbiana está en su etapa mesofílica, donde gran variedad de comunidades bacterianas realizan su labor de degradar compuestos complejos (*Cai et al., 2016*), aumentando de esta manera la temperatura del biosólido, logrado así reducir su contenido de agua. Este proceso es llevado a cabo gracias a la aireación de la pila, la cual permite generar un ambiente aerobio que fomenta la actividad microbiana (*Robles et al., 2010*).

Por otro lado, la humedad dentro del invernadero permite que el transporte de agua desde el sólido a la corriente gaseosa se vea favorecido, debido a que ésta última, por la alta temperatura en el galpón, posea un bajo contenido de humedad, por lo que el gradiente de transporte es alto (*Geankoplis, 1998*).

El pH de las pilas con el transcurso de los días en el invernadero y exterior:

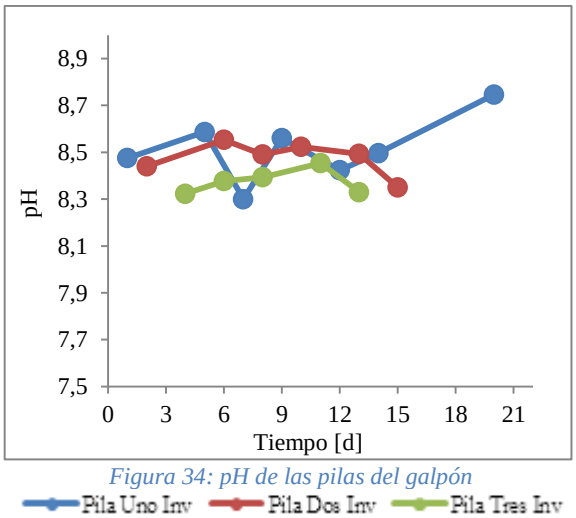


Figura 34: pH de las pilas del galpón

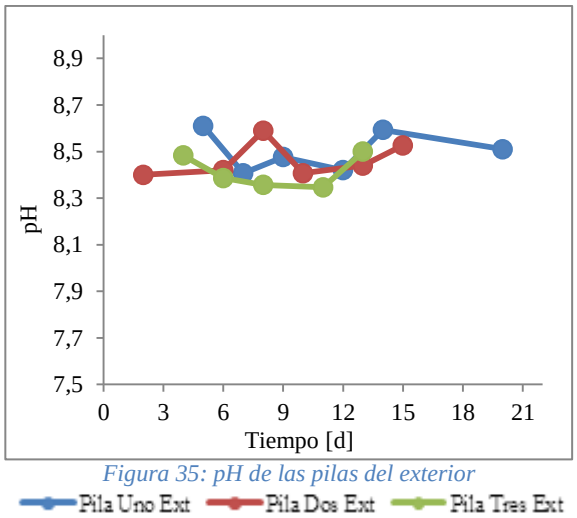


Figura 35: pH de las pilas del exterior

El pH del biosólido, tanto del invernadero como exterior no varía considerablemente, se mueve entre 8,3 y los 8,75; de acuerdo a la literatura, el valor de esta propiedad está estrechamente relacionada con la tasa de emisión de compuestos volátiles (*Deng et al., 2009)*, especialmente de la alta concentración identificada de amoníaco. No existe gran variación entre las tres tandas de pilas, los valores medidos de pH tanto para los sólidos en galpón como exterior no sufren variaciones bruscas en esta propiedad; la concentración de iones hidrógeno en los biosólidos depende de la emisión de gases durante el secado y no así de la temperatura de operación.

De los gases monitoreados por los sensores instalados en el invernadero se obtuvieron los siguientes registros resumidos:

6.3. Concentración de gases en galpón

Desde un comienzo del piloto los sensores presentaron errores en sus lecturas, por lo cual se analizó el comportamiento de los gases basándose en el supuesto de que los datos obtenidos reflejaron la tendencia de acuerdo a la actividad microbiana.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del comportamiento de los gases dentro del galpón por actividad microbiana.

6.3.1. Compuestos orgánicos volátiles COV´s:

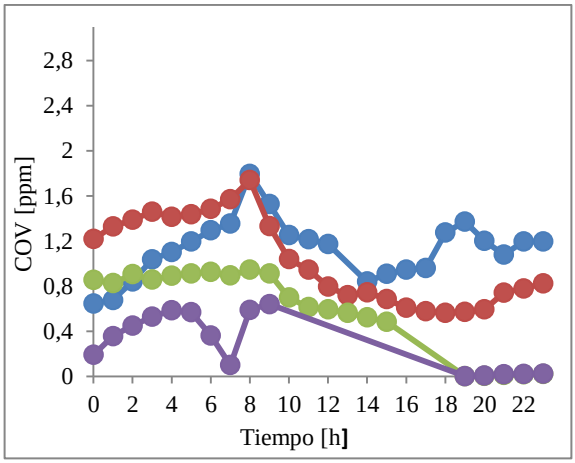


Figura 36: Registro COV´s Pila Uno Inv Semana Uno

28-jul 29-jul 30-jul 31-jul

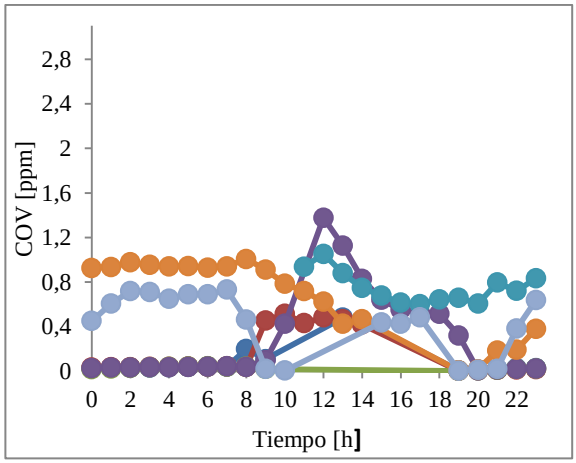


Figura 37: Registro COV´s Pila Uno Inv Semana Dos

01-ago 02-ago 03-ago 04-ago 05-ago 06-ago 07-ago

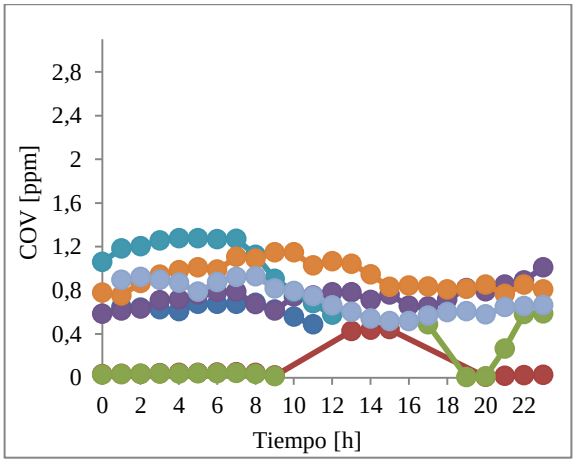


Figura 38: Registro COV´s Pila Uno Inv Semana Tres

08-ago 09-ago 10-ago 11-ago 12-ago 13-ago 14-ago

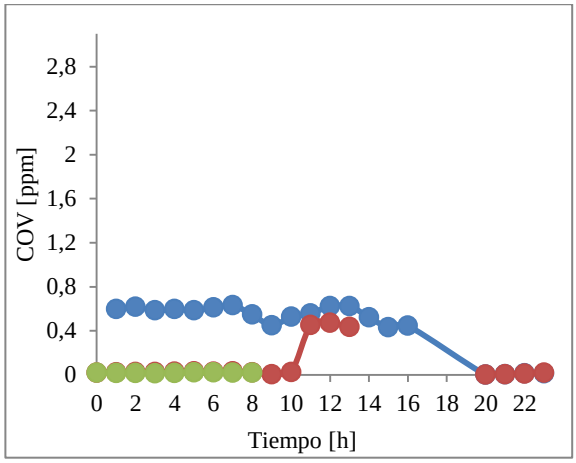


Figura 39: Registro COV´s Pila Uno Inv Semana Cuatro

15-ago 16-ago 17-ago

Según la *Figura 36*, se tiene que la mayor concentración durante el período de control fue de 2 mg/L, ésta se presentó en la primera semana; a medida que iban transcurriendo los días, la concentración fue disminuyendo como muestran las *Figuras* 37, *38* y *39*. En la semana uno las mayores concentraciones de COV´s se presentaron en horas de la mañana $(9{:}00)$, esto debido que está comenzando la actividad microbiana principalmente de bacterias mesofílicas (*Cai et al., 2016*) que utilizan gran parte del carbono como fuente de energía expulsando CO_2 y generando calor, ya que las reacciones metabólicas son de naturaleza exotérmica. En la semana dos, las mayores concentraciones (1,5 mg/L) se presentan a horas del mediodía, esto debido a un aumento de la temperatura por la generación de calor además del factor externo (temperatura ambiente), en esta etapa del

proceso la materia orgánica alcanza su bioestabilización a través de reacciones bioquímicas de oxidación llevadas a cabo por organismos de tipo termofílicos.

En la semana tres la concentración disminuye, manteniéndose relativamente constante a lo largo del día ($1\ mg/L$) y en la semana cuatro las concentraciones van en disminución debido a la maduración del biosólido. Esta primera tanda de pilas controladas no fueron volteadas día por medio como a las dos que le siguieron, es por esto también, además de la actividad microbiana que se generan compuestos orgánicos volátiles; una insuficiente o incompleta aireación lleva a la producción de compuestos de sulfuro, emisión de alcoholes, cetonas, ésteres, etc (*Deng et al., 2009*).

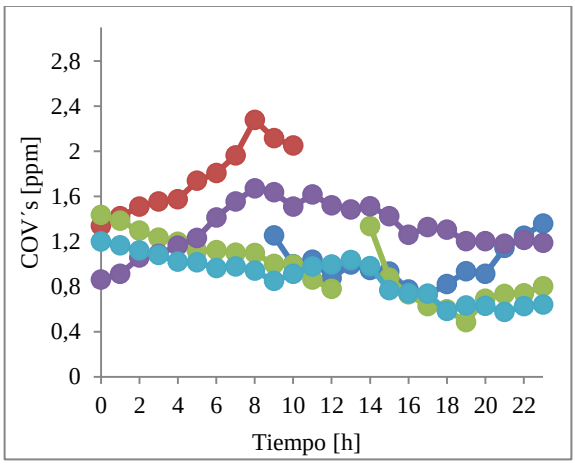


Figura 40: Registro COV´s Pila Dos Inv Semana Uno

17-ago 18-ago 19-ago 20-ago 21-ago

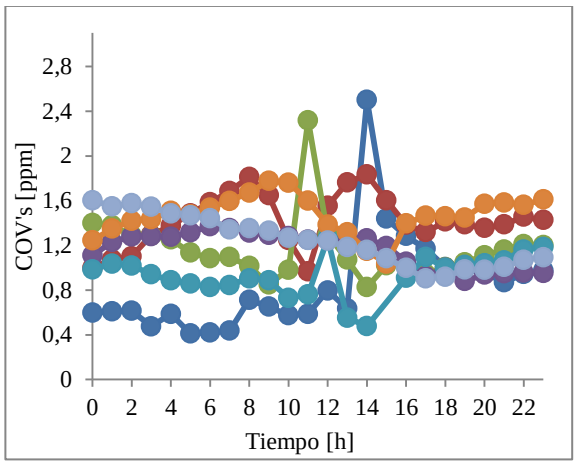


Figura 41: Registro COV´s Pila Dos Inv Semana Dos

22-ago 23-ago 24-ago 25-ago 26-ago 27-ago 28-ago

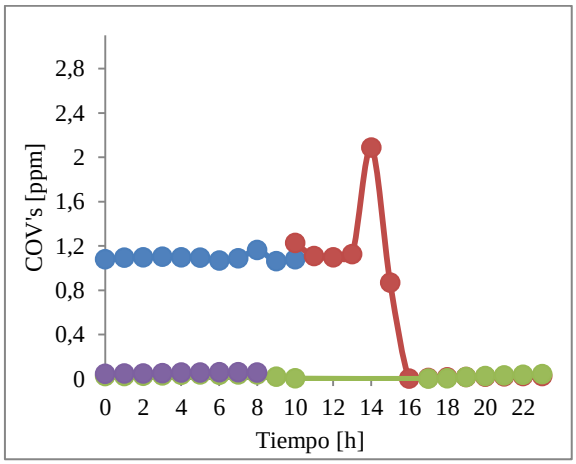


Figura 42: Registro COV´s Pila Dos Inv Semana Tres

29-ago 31-ago 01-sep 02-sep

De acuerdo a la *Figura 40* que corresponde a la primera semana de control de la segunda pila, se tiene que las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles llegan a los $2{,}4\ mg/L$ siendo máximas en horas de la mañana $(8{:}00)$; esto principalmente por el inicio de la actividad bacteriana en el biosólido; ya en la segunda semana las concentraciones se vuelven constantes durante el día presentando máximos a horas del mediodía, cuando la temperatura es alta en el exterior e interior del invernadero. La última semana, *Figura 42*, las concentraciones disminuyen considerablemente respecto a las semanas anteriores, esto debido a que la pila posee un nivel de humedad $(40\ \%)$ bajo para mantener la actividad microbiana.

Para esta tanda de pilas se realizó volteo día por medio, por lo que las concentraciones de compuestos volátiles disminuyeron de manera más rápida respecto a la primera tanda que no llevó el control correspondiente (*Deng et al., 2009*).

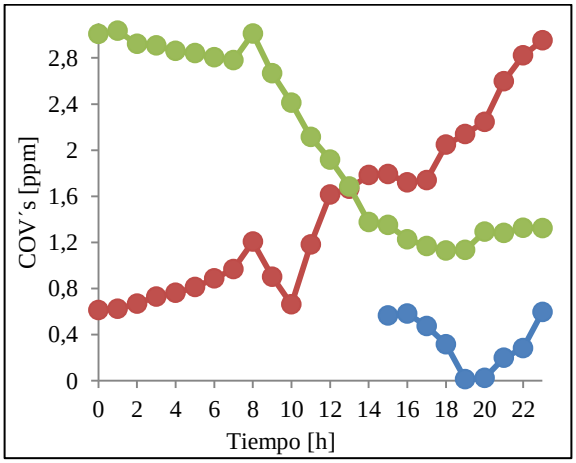


Figura 43: Registro COV´s Pila Tres Inv Semana Uno

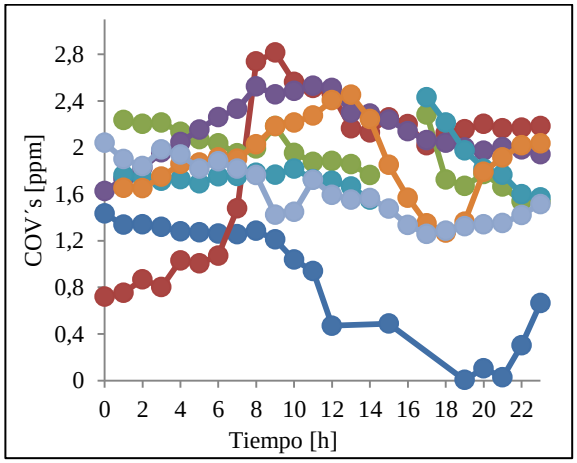


Figura 44: Registro COV´s Pila Tres Inv Semana Dos

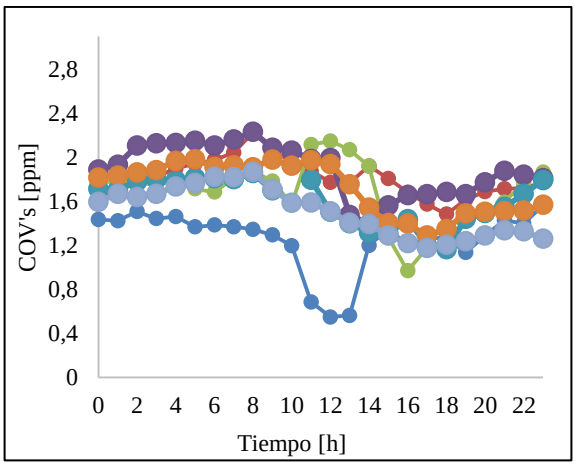


Figura 45: Registro COV´s Pila Tres Inv Semana Tres

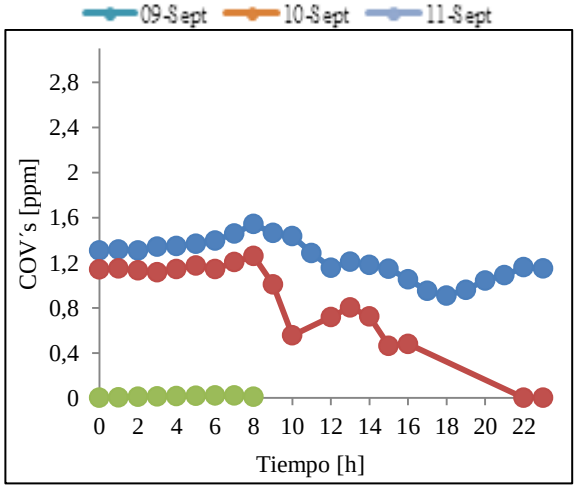


Figura 46: Registro COV´s Pila Tres Inv Semana Cuatro

La tercera tanda de pilas se armó el 2 de septiembre, donde la temperatura ambiente es mayor respecto al seguimiento realizado a las dos primeras, por lo cual en la primera semana de control las concentraciones llegaron a 3 mg/L, en los tres días iniciales las concentraciones aumentaron en horas del mediodía cuando la temperatura ambiente llegaba a los 30 ℃, por lo que el valor dentro del invernadero era 4 ℃ mayor aproximadamente. La actividad microbiana es potenciada por esta condición junto con los volteos día por medio de acuerdo a la programación, lo que se refleja en las altas concentraciones de estos compuestos. Las altas temperaturas se mantienen en las semanas siguientes por lo que los COV´s se mantienen en concentraciones elevadas respecto a las otras pilas dispuestas en el invernadero. Ya en la última semana la concentración se ve reducida a la mitad, principalmente por la pérdida de agua de la pila, lo que reduce considerablemente la actividad microbiana.

6.3.2. Ácido sulfhídrico

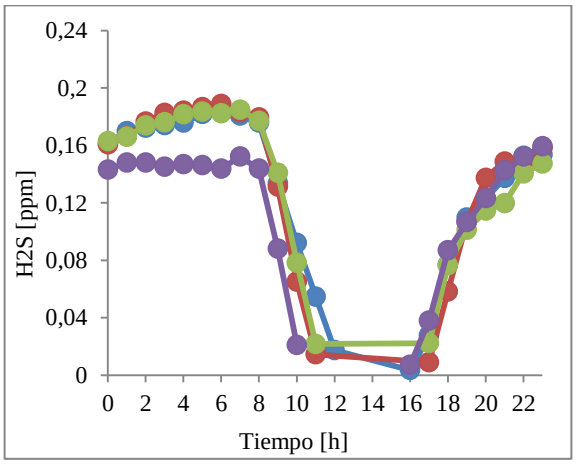


Figura 47: Registro H2S Pila Uno Inv Semana Uno

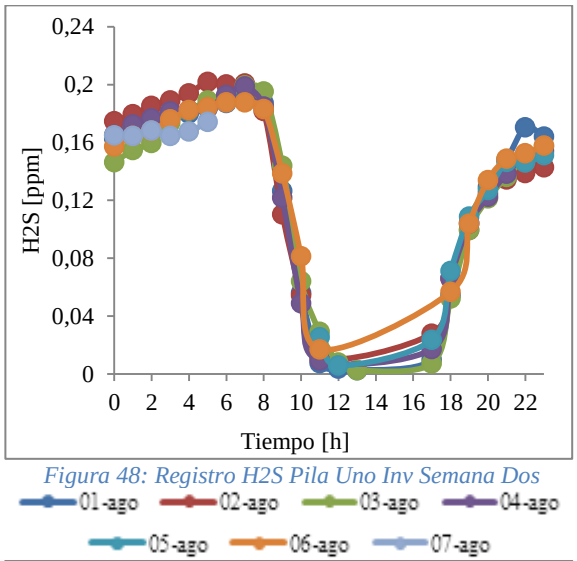


Figura 48: Registro H2S Pila Uno Inv Semana Dos

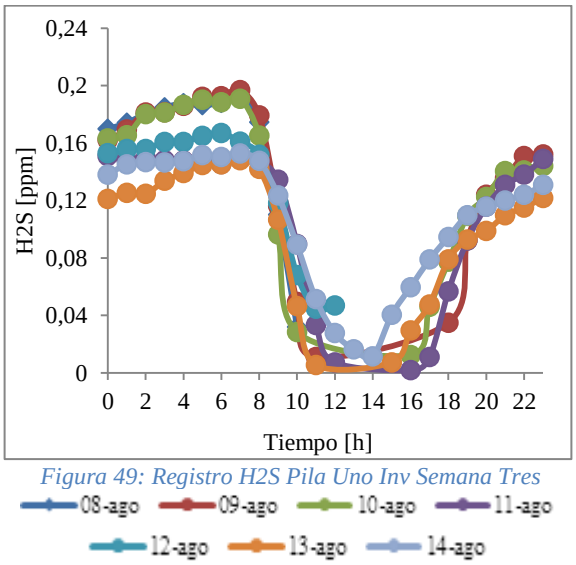


Figura 49: Registro H2S Pila Uno Inv Semana Tres

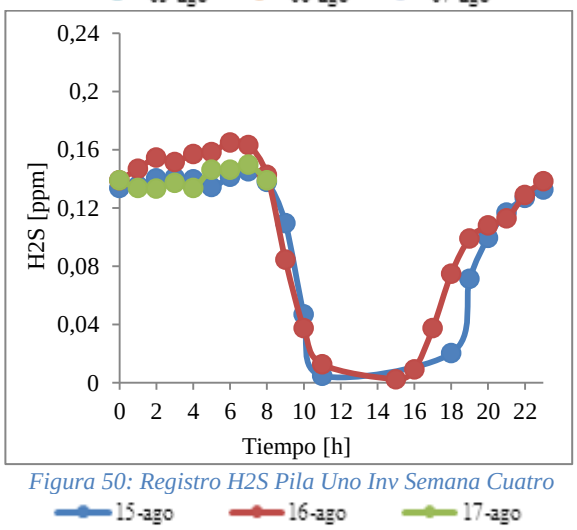


Figura 50: Registro H2S Pila Uno Inv Semana Cuatro

De acuerdo a investigaciones realizadas sobre las emisiones de ácido sulfhídrico durante el secado térmico de lodos (*Weng et al., 2015*) se determinó que mientras mayor es la temperatura de operación del procedimiento, la concentración del gas aumentaba; otro factor importante en la producción del gas es la presencia de bacterias sulfato-reductoras, las cuales son responsables de transformar compuestos de azufre presentes en la materia orgánica, como iones sulfatos, a sulfuro de hidrógeno, el cual a bajas concentraciones produce malos olores, la producción de este gas se da en condiciones anaeróbicas, es decir, en ausencia de oxígeno.

Como se observa en las *Figuras 47, 48, 49* y *50*, para la pila uno las concentraciones de ácido sulfhídrico mantienen una tendencia definida a lo largo de la vida del biosólido; la concentración es mayor en la mañana cuando la temperatura es baja y a medida que ésta va en aumento la producción del gas va decayendo y vuelve a subir nuevamente a horas de la tarde; el mismo comportamiento para todos los días que se realizó muestreo de la pila uno.

Esto puede suponer que a temperaturas más bajas la concentración aumenta, lo cual se contradice con lo inicialmente planteado de acuerdo a la investigación de *Weng* y colaboradores; el factor que determina la producción del gas son las condiciones que se presentan dentro del galpón a lo largo del día, si bien la temperatura pareciera tener una relación directa con la concentración del gas, es la humedad quien define su producción. Como se muestra en las *Figuras 64* a *67*, se tiene que la humedad relativa dentro del invernadero en las primeras horas del día es de un 100 %, es decir, el aire que circula por el galpón está saturado, lo que permite establecer que la humedad del biosólido es alta, reduciendo así el espacio inter partícula para el movimiento del oxígeno; logrando de esta manera que se genere un ambiente anaeróbico en el biosólido, fomentando así la actividad de bacterias sulfato reductoras. La acción de estas bacterias reduce los iones sulfatos presentes en los lodos hasta sulfuro de hidrógeno.

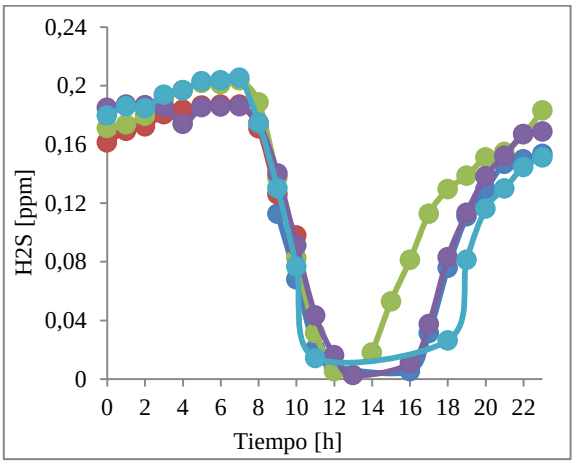


Figura 51: Registro H2S Pila Dos Inv Semana Uno

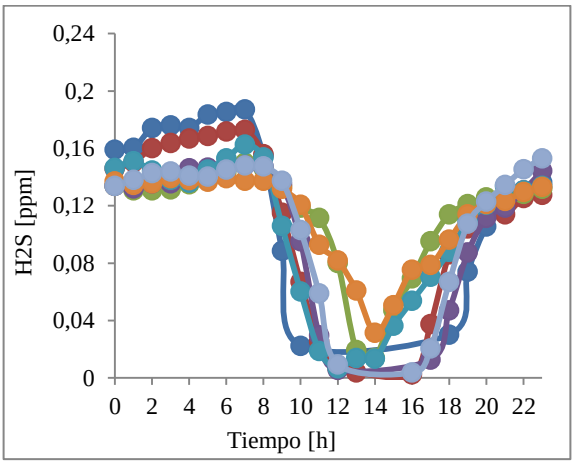


Figura 52: Registro H2S Pila Dos Inv Semana Dos

17-ago 18-ago 19-ago 20-ago 21-ago

22-ago 23-ago 24-ago 25-ago 26-ago 27-ago 28-ago

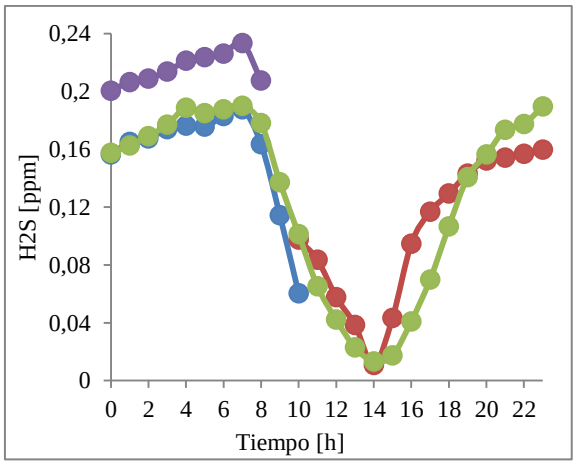


Figura 53: Registro H2S Pila Dos Inv Semana Tres

29-ago 31-ago 01-sep 02-sep

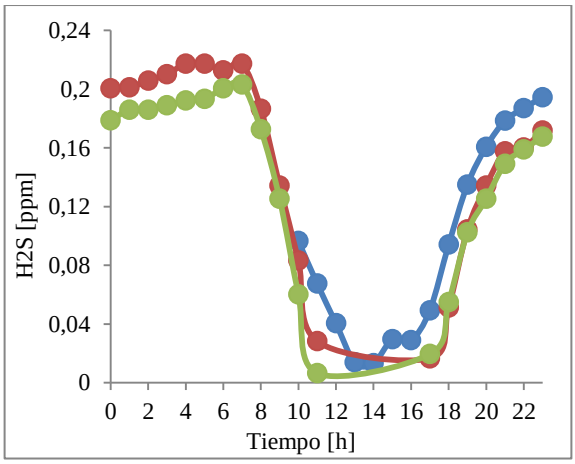


Figura 54: Registro H2S Pila Tres Inv Semana Uno

02-sep 03-sep 04-sep

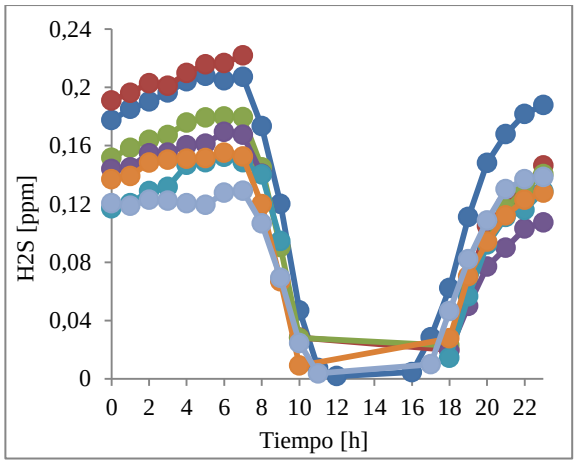


Figura 55: Registro H2S Pila Tres Inv Semana Dos

05-sep 06-sep 07-sep 08-sep 09-sep 10-sep 11-sep

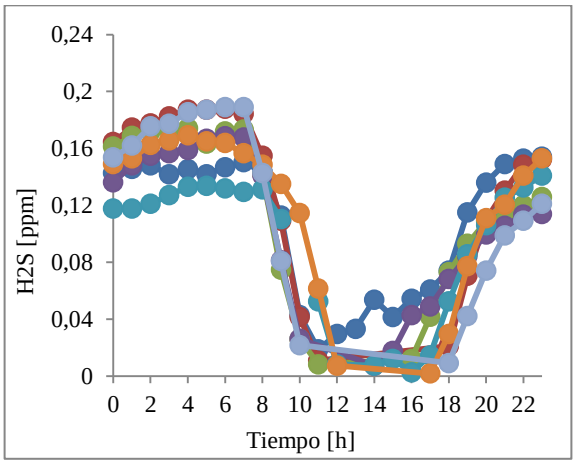


Figura 56: Registro H2S Pila Tres Inv Semana Tres

12-sep 13-sep 14-sep 15-sep 16-sep 17-sep 18-sep

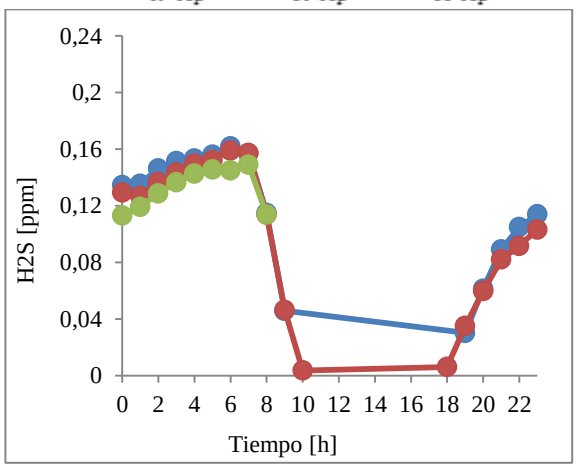


Figura 57: Registro H2S Pila Tres Inv Semana Cuatro

19-sep 20-sep 21-sep

Como se observa en las *Figuras 51* a *57*, el comportamiento del sulfuro de hidrógeno en las pilas dos y tres es igual al de la pila uno; lo cual se debe principalmente a la presencia de una alta humedad relativa en el galpón (ver *Figuras 64* a *74*) a horas de la mañana y en la noche. Mientras mayor sea el contenido de humedad relativa en el galpón, el *film* que cubre la superficie del biosólido será mayor, provocando un aumento en la producción de ácido sulfhídrico.

6.3.3. Amoníaco

Los registros de este gas son del sensor externo ubicado en la tubería luego del lavador, ya que el sensor del invernadero presentó fallas desde antes de preparar la primera pila. Sin embargo, debido a la inactividad del lavador, la concentración debería presentar un valor similar a la presente en el interior del galpón.

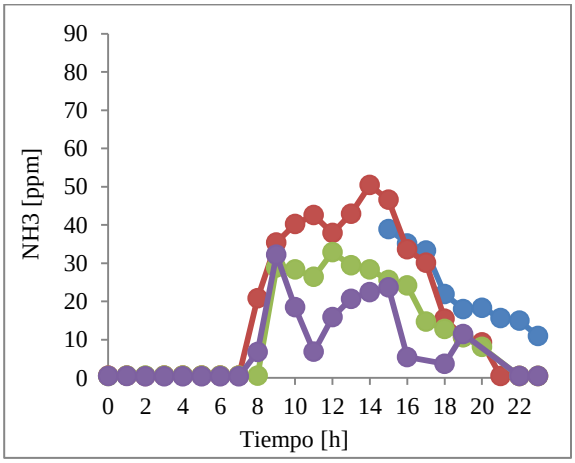


Figura 58: Registro NH3 Pila Uno Inv Semana Uno

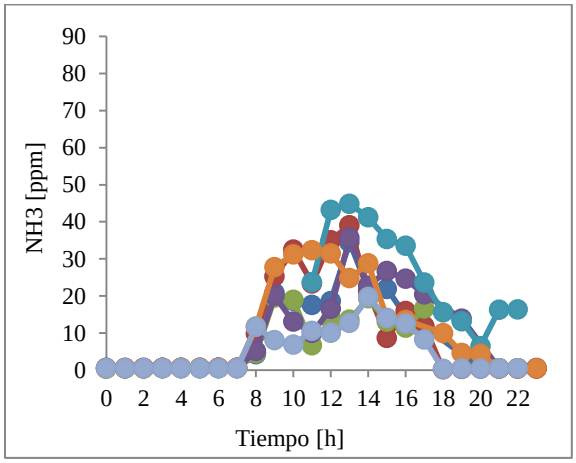


Figura 59: Registro NH3 Pila Uno Inv Semana Dos

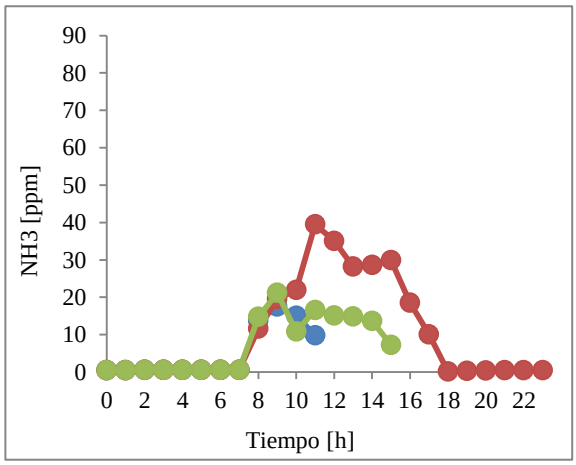


Figura 60: Registro NH3 Pila Uno Inv Semana Tres

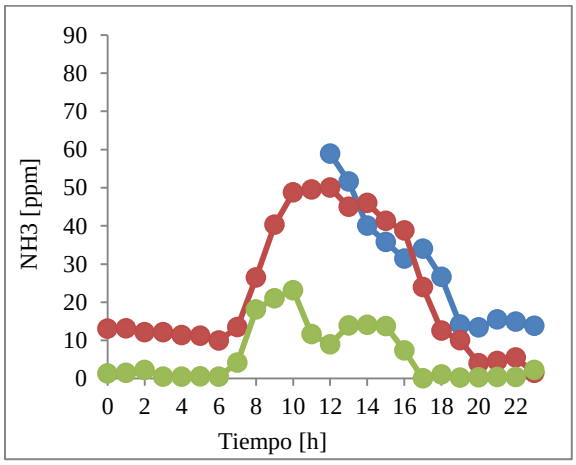


Figura 61: Registro NH3 Pila Tres Inv Semana Uno

03-sep 04-sep 05-sep

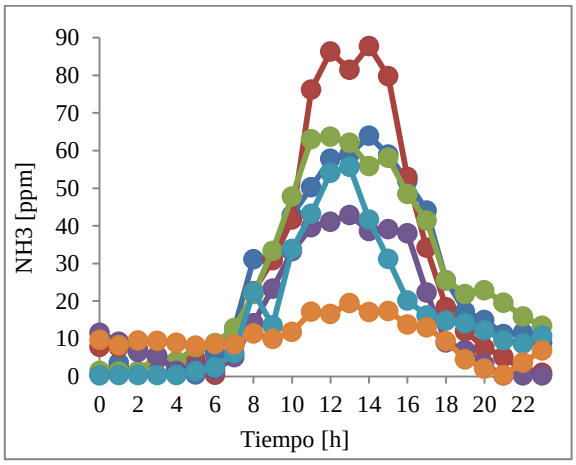


Figura 62: Registro NH3 Pila Tres Inv Semana Dos

06-sep 07-sep 08-sep 09-sep 10-sep 11-sep

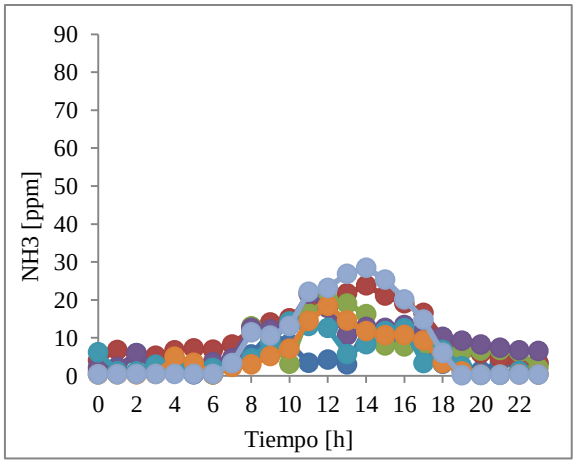


Figura 63: Registro NH3 Pila Tres Inv Semana Tres

12-sep 13-sep 14-sep 15-sep 16-sep 17-sep 18-sep

Los biosólidos dispuestos en el galpón para su secado poseen carga orgánica, debido a que provienen desde el tratamiento de aguas residuales urbanas; es por esto que al ser sometido a una corriente de aire seca y su alto contenido de humedad se produce la actividad microbiana al interior de los lodos.

De acuerdo a información entregada por el área de gestión de biosólidos de Aguas Andinas, se tiene que el lodo recibido de planta La Farfana posee la siguiente composición:

Tabla 11: Composición de entrada de biosólido al CGIB (Aguas Andinas, 2009)

Componente	**Composición** [%]
Cenizas	48,87
Azufre	1,87
Carbono	25,67
Hidrógeno	3,97
Nitrógeno	3,62
Oxígeno	15,77

A partir de la información presentada en la *Tabla 12*, el contenido de nitrógeno presente en el lodo permite que se produzca el gas de olor característico, lo cual se refleja en las altas concentraciones de amoníaco a lo largo del secado de las pilas dentro del invernadero.

Durante el secado de lodos la concentración de amoníaco pasa por etapas (*Deng et al., 2009*), en una primera instancia la concentración del gas va en aumento debido a la temperatura que adquiere el biosólido a medida que se va secando; luego pasa a la etapa de tasa de emisión constante, donde la actividad microbiana está en su máximo para luego volver a decaer por la disminución de la temperatura del galpón y la pila.

El amoníaco emitido por el biosólido durante el proceso de secado se debe principalmente a la hidrólisis de las proteínas presentes en el lodo (*Wang et al, 2007*). Cuando las proteínas son disueltas, éstas son hidrolizadas para formar multipéptidos, dipéptidos y aminoácidos. Los aminoácidos luego hidrolizan para formar ácido orgánico, amoníaco y dióxido de carbono (*Ren et al., 2006*).

Como se observa en las *Figuras 58* a *63*, el comportamiento de la concentración de amoníaco para las pilas uno y tres posee igual tendencia, ya que el biosólido y composición de éstas fue la misma, por lo que el contenido orgánico, y de nitrógeno en particular, no varió.

Para el caso de la pila uno (*Figuras 58, 59* y *60*) la concentración máxima no superó los $50\ ppm$, caso contrario para la pila tres que llegó casi a un valor de $100\ ppm$, esto debido principalmente a dos factores: temperatura y período de volteo. La pila tres se inició en septiembre, donde la temperatura ambiente permitía que las condiciones dentro del galpón se vieran favorecidas para un secado más rápido y por otro lado, el volteo constante, el cual se realizó de manera correcta de acuerdo a experiencias anteriores (día por medio), lo que brinda mayor aireación a la pila de biosólido, permitiendo así que la actividad microbiana se lleve a cabo, dando como producto, entre otros, amoníaco.

6.3.4. Evalución odorante

Como estudio complemetario al seguimiento de operaciones del invernadero, el área de Medioambiente de Aguas Andinas realizó una evaluación respecto al impacto de la construcción del recinto y el grado de dispersión de los gases que generan mal olor por la acción de la chimenea de $12\ m$ y los extractores instalados.

Se aplicó una dosis de odorante en el invernadero que fuera fácilmente perceptible en los diferentes sectores del recinto, y con la ayuda de caminantes calificados se logró determinar la influencia de la pluma de olores.

Las pruebas se realizaron entre los meses de junio y julio del presente año cuando aun no se disponían pilas de biosólidos en el galpón.

Se evaluó la percepción de olores en diferentes escenarios de operación obteniendo los siguientes resultados, los cuales permiten complementar el estudio de la concentración de gases:

Tabla 12: Distancia máxima de pluma según escenario (Aguas Andinas, 2016)

Escenario	**Distancia máxima desde galpón** $[m]$	**Reducción con respecto a escenario uno** [%]
Uno (sin galpón)	1856	–
Dos (galpón más un extractor)	1215	34,5
Tres (galpón más dos extractores)	792	57,3
Cuatro (galpón más tre extractores)	600	67,7

Tabla 13: Área de influencia según escenario (Aguas Andinas, 2016)

Escenario	**Área de influencia** $[Ha]$	**Reducción con respecto a escenario uno** [%]
Uno (sin galpón)	179,9	–
Dos (galpón más un extractor)	71,8	60,1
Tres (galpón más dos extractores)	24,9	86,2
Cuatro (galpón más tre extractores)	15,7	91,3

De acuerdo a la información entregada en las *Tablas 12* y *13*, se determinó que la construcción del invernadero permitió la reducción de la pluma de gases debido al proceso de secado, por lo tanto el impacto de la construcción es positivo y genera una disminución en la percepción de malos olores. El confinamiento de gases y la instalación de una chimenea de $12\ m$ permite que los gases se dispersen más rápidamente y más cerca de la zona de producción, evitando así que lleguen a los poblados aledaños al CGIB.

6.4. Condiciones interior galpón

6.4.1. Humedad invernadero

Se muestra el resumen de los valores registrados por los sensores de humedad dentro del invernadero; al ser dos, se grafica el promedio de las mediciones:

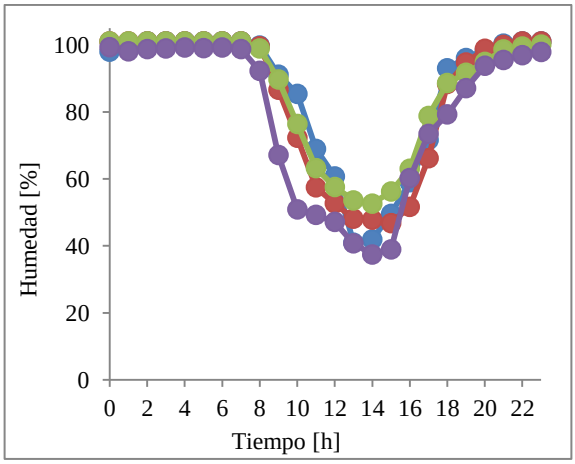


Figura 64: Registro humedad Pila Uno Inv Semana Uno

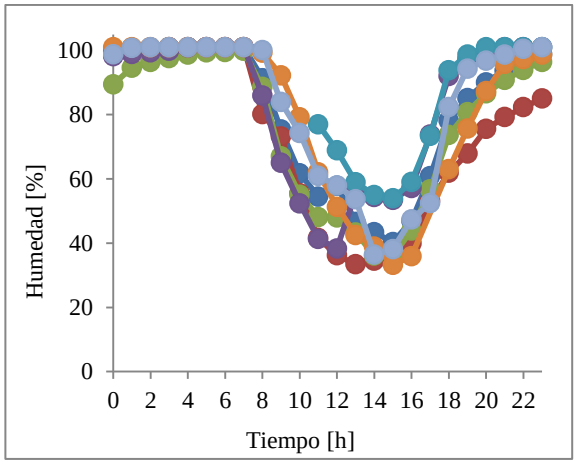


Figura 65: Registro humedad Pila Uno Inv Semana Dos

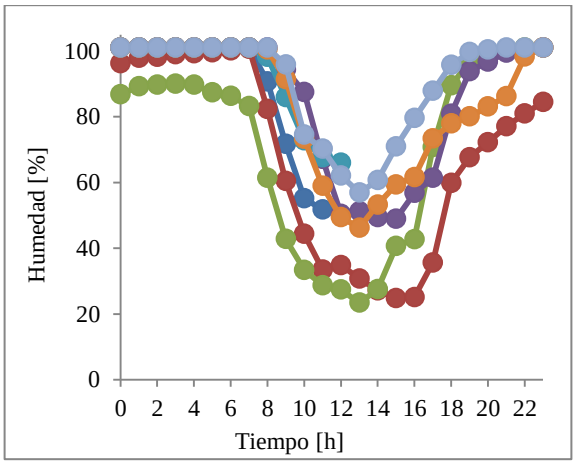


Figura 66: Registro humedad Pila Uno Inv Semana Tres

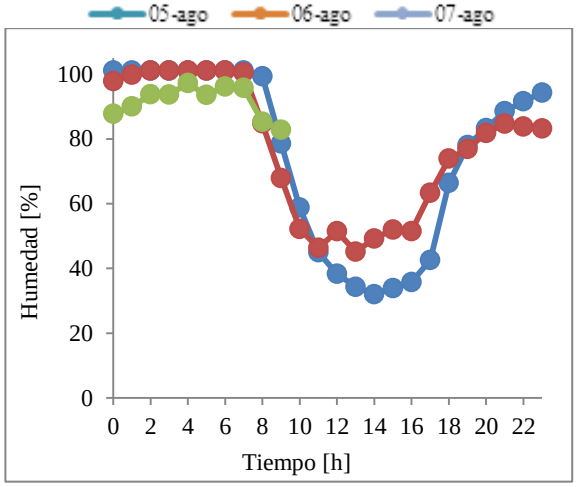


Figura 67: Registro humedad Pila Uno Inv Semana Cuatro

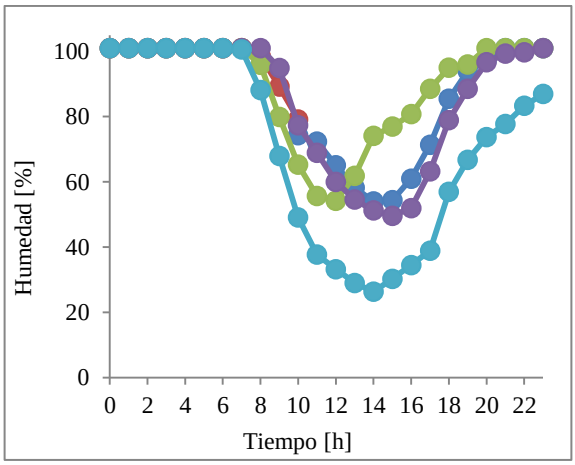


Figura 68: Registro humedad Pila Dos Inv Semana Uno

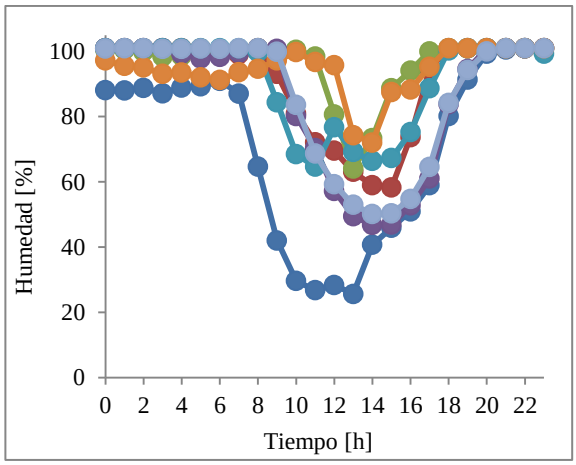


Figura 69: Registro humedad Pila Dos Inv Semana Dos

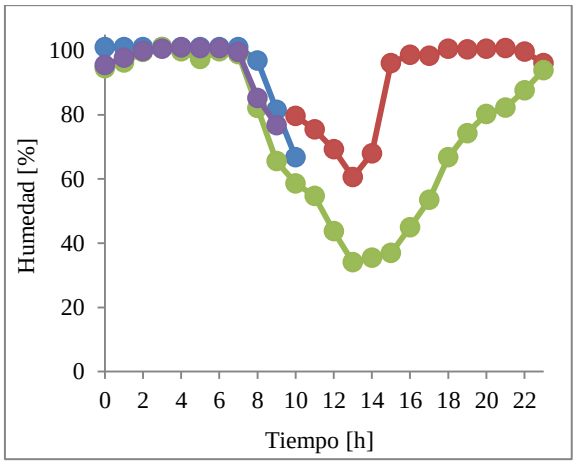


Figura 70: Registro humedad Pila Dos Inv Semana Tres

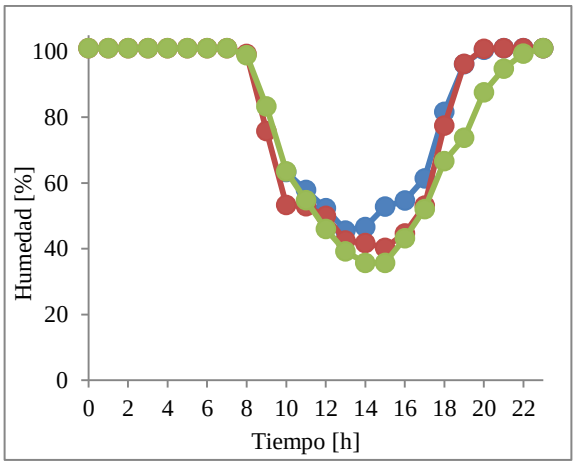


Figura 71: Registro humedad Pila Tres Inv Semana Uno

02-sep 03-sep 04-sep

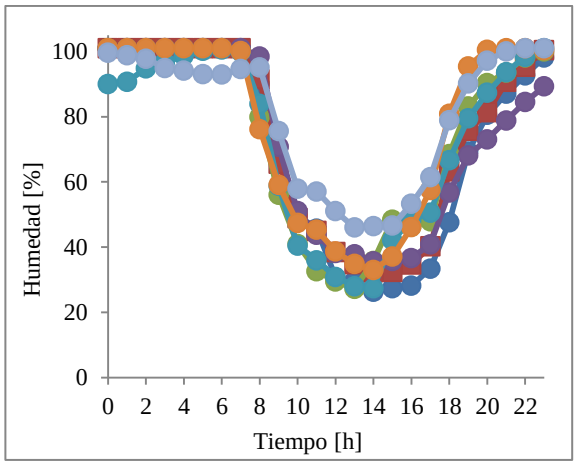


Figura 72: Registro humedad Pila Tres Inv Semana Dos

05-sep 06-sep 07-sep 08-sep 09-sep 10-sep 11-sep

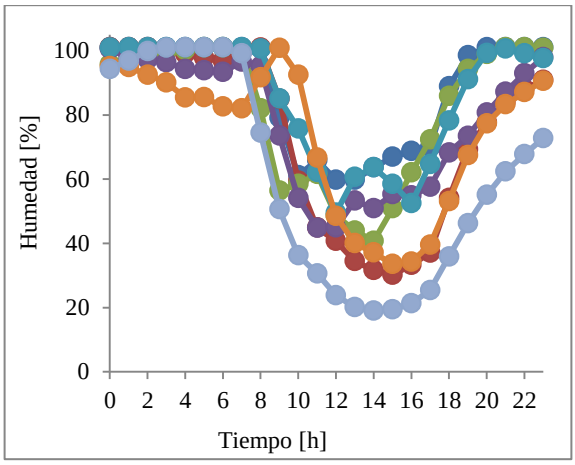


Figura 73: Registro humedad Pila Tres Inv Semana Tres

12-sep 13-sep 14-sep 15-sep 16-sep 17-sep 18-sep

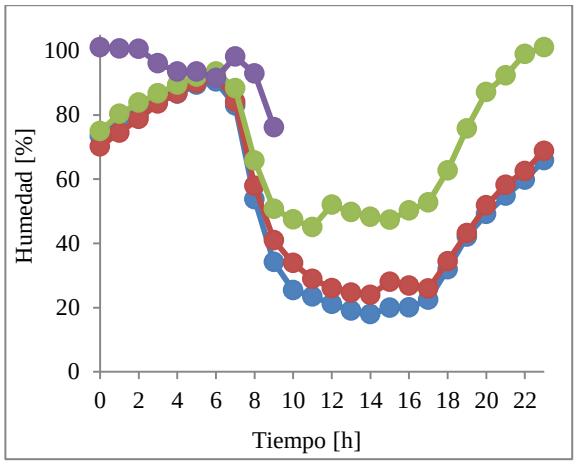


Figura 74: Registro humedad Pila Tres Inv Semana Cuatro

19-sep 20-sep 21-sep 22-sep

Los transmisores de humedad instalados al interior del galpón registran valores de humedad no condensada, es decir, antes de que se llegue al punto de rocío. Su rango de medición es de 0 *a* 100 % de humedad relativa, con una exactitud de medición de ± 3 %. Sin embargo en horas de la madrugada los valores registrados por los sensores superaron el 100 % lo que indica una falla en la lectura del equipo o bien, su calibración.

Como se observa en las *Figuras 64* a *74*, el comportamiento de la humedad al interior del galpón presenta la misma tendencia para las tres tandas de pilas: valor alto en horas de la mañana y noche, disminuyendo a horas del mediodía, donde, como se mostrará más adelante, se presentan las mayores temperaturas tanto dentro como fuera del invernadero. Esto se debe a las condiciones ambientales, las cuales se muestran en los siguientes gráficos que resumen la humedad ambiental en Til Til para los días de control a través de la estación meteorológica ubicada en Montenegro:

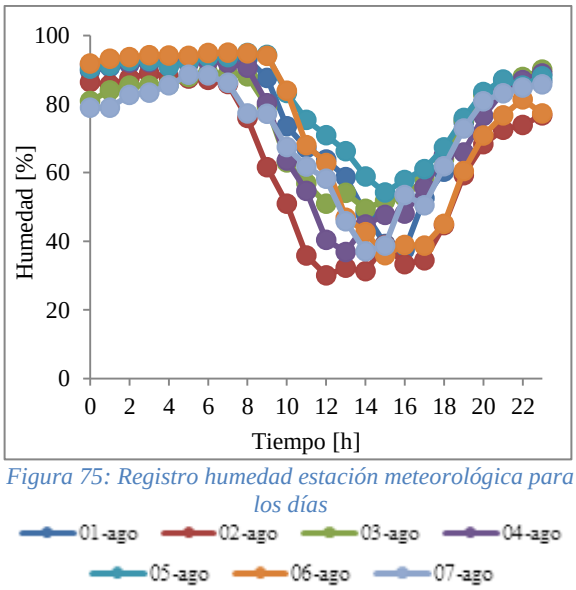


Figura 75: Registro humedad estación meteorológica para los días

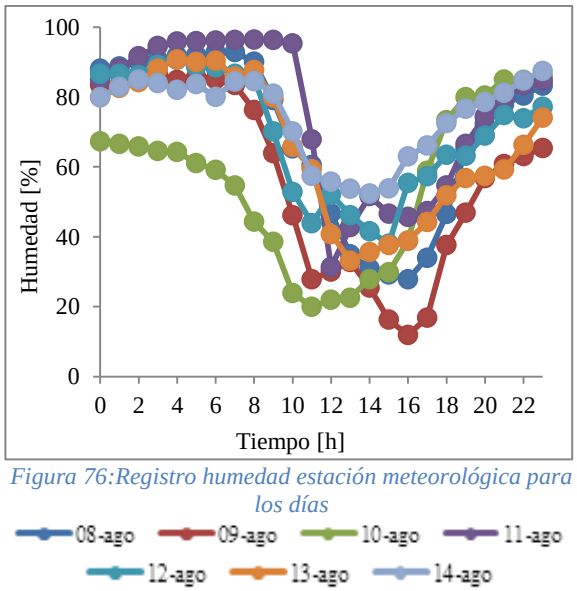


Figura 76:Registro humedad estación meteorológica para los días

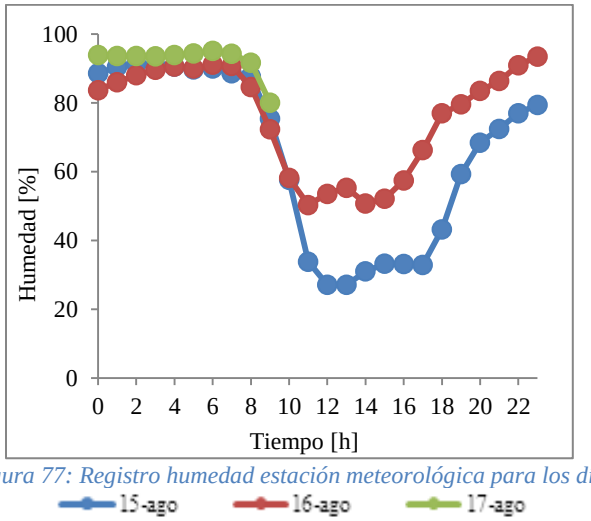


Figura 77: Registro humedad estación meteorológica para los días

De acuerdo a la información presentada en las *Figuras 75*, *76* y *77*, se tiene que la humedad al exterior del galpón se comporta de igual forma que en el galpón, con aumentos a horas de la noche y mañana; disminuyendo a horas del mediodía.

La humedad relativa en el exterior, para la primera tanda de pilas es cercana al 100 %, sin embargo es menor a la humedad del galpón, lo que genera un gradiente que permite el transporte de agua por parte del aire que ingresa al invernadero, logrando de esta manera disminuir el contenido de humedad del biosólido. Se presenta el mismo comportamiento de humedad externa para las pilas dos y tres (Ver Anexos, sección 10.4.).

6.4.2. Temperatura invernadero

Al igual que para la humedad, el invernadero posee dos sensores en su interior, por lo cual se grafica el promedio de estas mediciones:

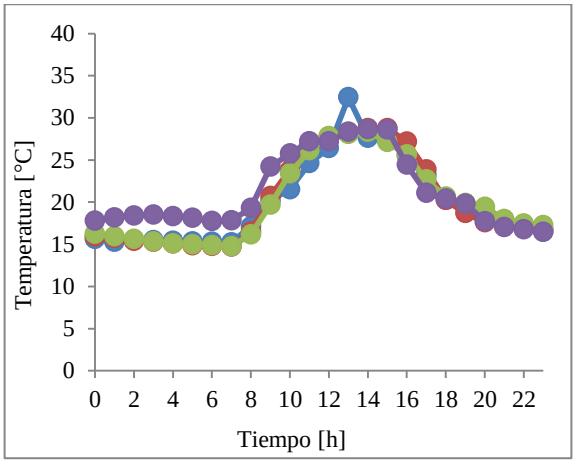


Figura 78:Registro temperatura Pila Uno Inv Semana Uno

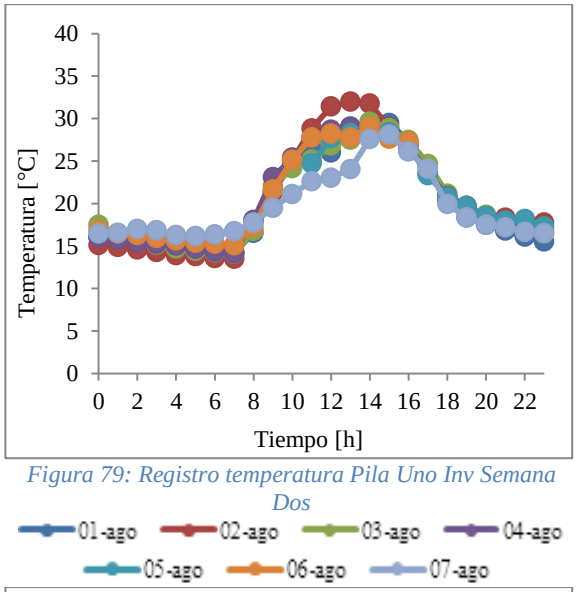


Figura 79: Registro temperatura Pila Uno Inv Semana Dos

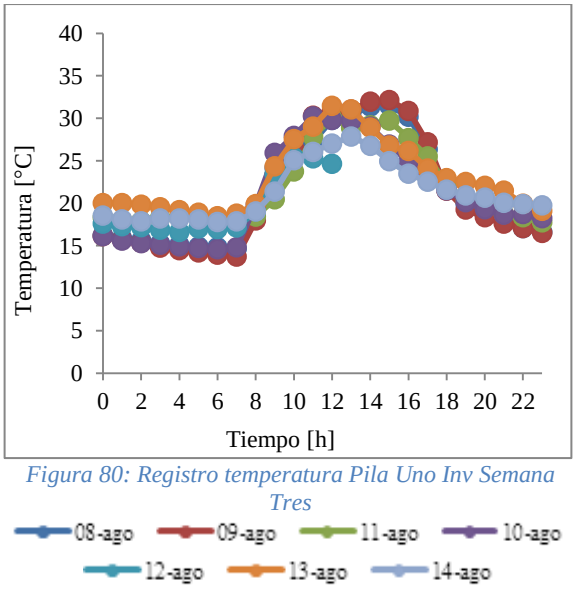


Figura 80: Registro temperatura Pila Uno Inv Semana Tres

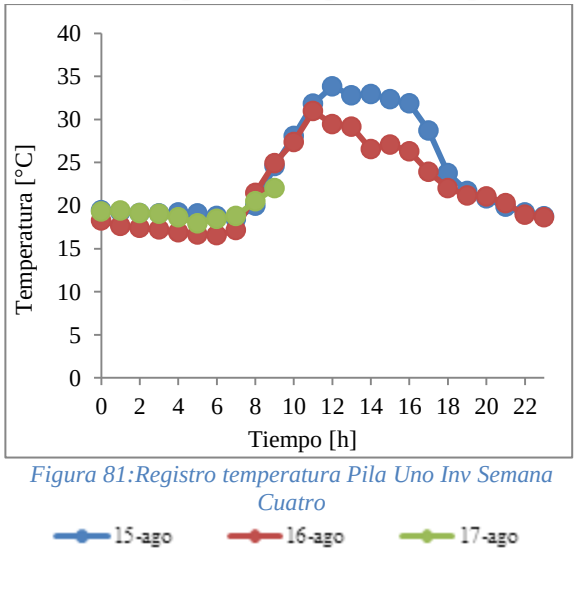


Figura 81:Registro temperatura Pila Uno Inv Semana Cuatro

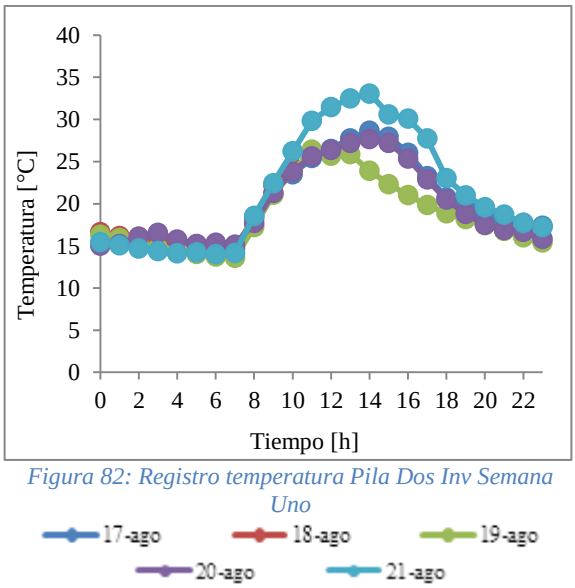


Figura 82: Registro temperatura Pila Dos Inv Semana Uno

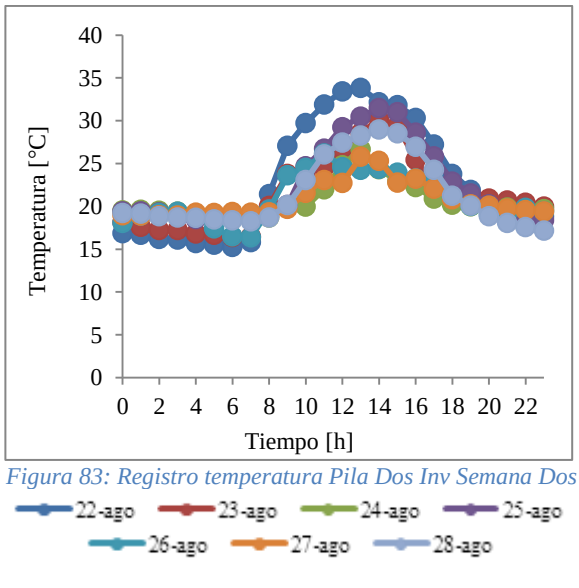


Figura 83: Registro temperatura Pila Dos Inv Semana Dos

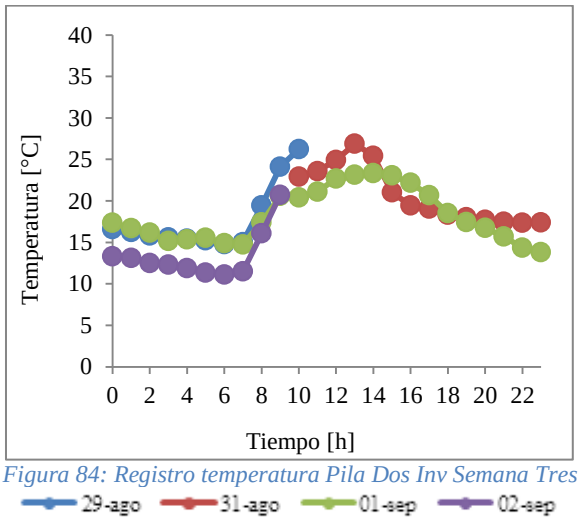


Figura 84: Registro temperatura Pila Dos Inv Semana Tres

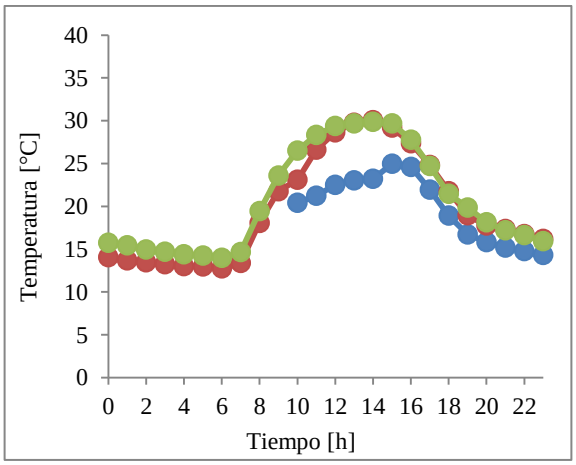


Figura 85:Registro temperatura Pila Tres Inv Semana Uno

02-sep 03-sep 04-sep

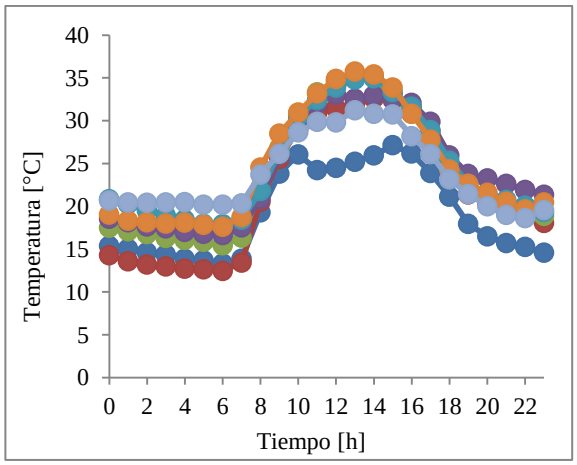


Figura 86:Registro temperatura Pila Tres Inv Semana Dos

05-sep 06-sep 07-sep 08-sep 09-sep 10-sep 11-sep

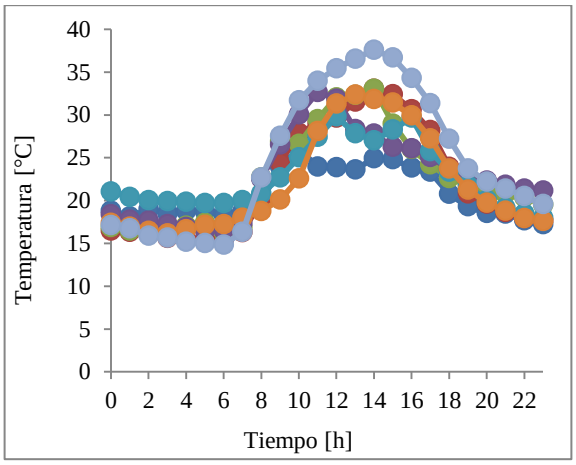


Figura 87: Registro temperatura Pila Tres Inv Semana Tres

12-sep 13-sep 14-sep 15-sep 16-sep 17-sep 18-sep

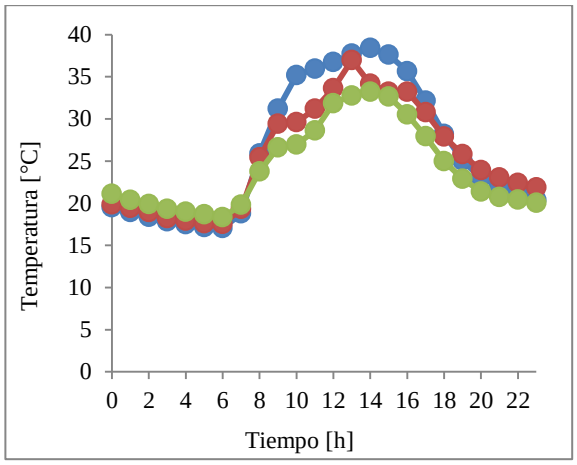


Figura 88: Registro temperatura Pila Tres Inv Semana Cuatro

19-sep 20-sep 21-sep

Los transmisores de temperatura instalados en el interior del galpón miden en un rango de temperatura, de acuerdo a información proporcionada por el proveedor, de $-20\ a\ 80$ °C con una exactitud de medición de $\pm 0{,}4$ %. Estos sensores no presentaron fallas mientras se realizaba el control de las pilas, por tanto sus lecturas se acercan a la condición real en el interior del recinto.

Para las tres tandas de pilas controladas el comportamiento de la temperatura siguió el mismo patrón: baja a horas de la noche y mañana, aumentando a mediados de día. La primera tanda se llevó a cabo a fines de julio, lo cual se refleja en que la mínima para esos días (*Figuras 78* a *81*) fue de 15 °C, en cambio para la tercera, que partió a inicios de septiembre, la mínima fue de 20 °C.

Al igual que para la humedad, las condiciones en el interior del invernadero dependen del ambiente que lo rodean, por tanto se muestra a continuación la temperatura al exterior del galpón de acuerdo a información entregada por la estación meteorológica ubicada en Montenegro:

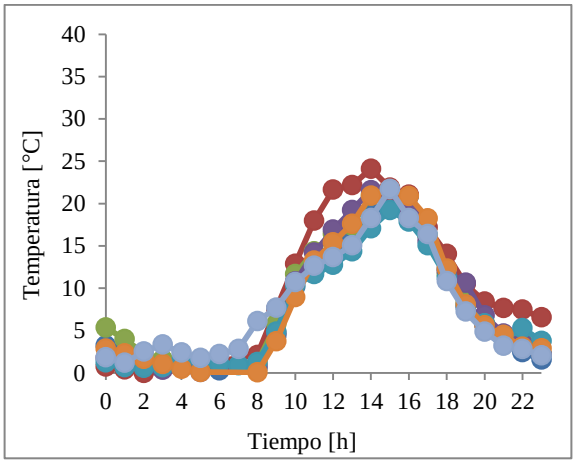


Figura 89: Registro temperatura estación meteorológica para los días

01-ago 02-ago 03-ago 04-ago 05-ago 06-ago 07-ago

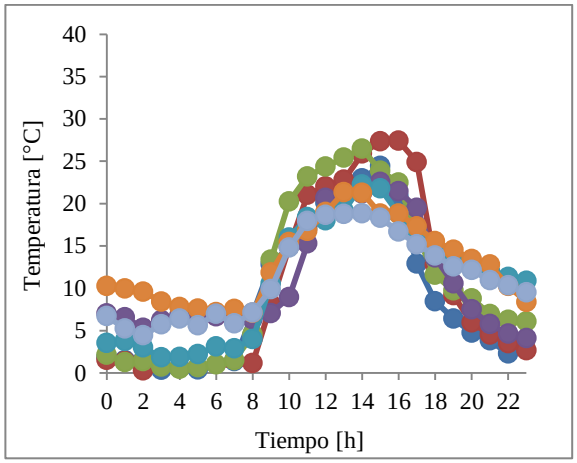


Figura 90:Registro temperatura estación meteorológica para los días

08-ago 09-ago 10-ago 11-ago 12-ago 13-ago 14-ago

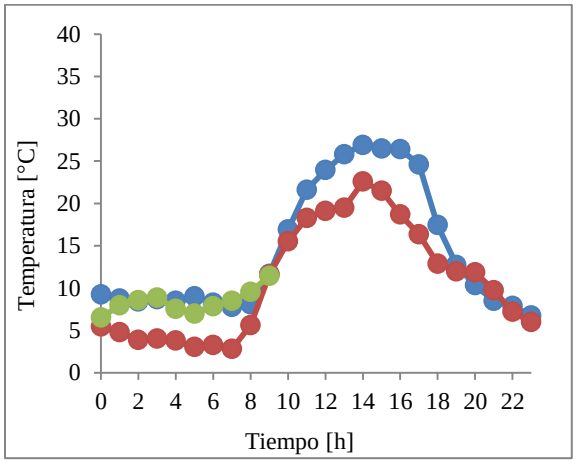


Figura 91:Registro temperatura estación meteorológica para los días

15-ago 16-ago 17-ago

Al comparar la temperatura del invernadero con la exterior, se tiene que es mayor al interior del galpón, debido al aumento de temperatura por la actividad microbiana de la pila durante el secado, además del material que está construido, policarbonato alveolar, el cual fomenta el aumento de temperatura por la radiación solar. Para las otras dos pilas los valores de temperatura externa medida por la estación meteorológica se muestran en Anexos, sección 10.3.

6.5. Problemas operacionales

Cuando se comenzó el monitoreo, de acuerdo a los criterios previamente establecidos para el volteo y retiro de las pilas, éstas no aumentaban su temperatura, lo cual se podía deber a la composición o bien, por la falta de aireación; es por esto que cuando se dispuso la segunda pila en el invernadero y su réplica, se agregó además una tercera pila, ubicada en el exterior, con un mayor porcentaje de humedad, es decir, se le adicionó más lodo húmedo (75 % de humedad). Se controló el porcentaje de agua contenido, entregando los resultados que se muestran en la *Figura 92*:

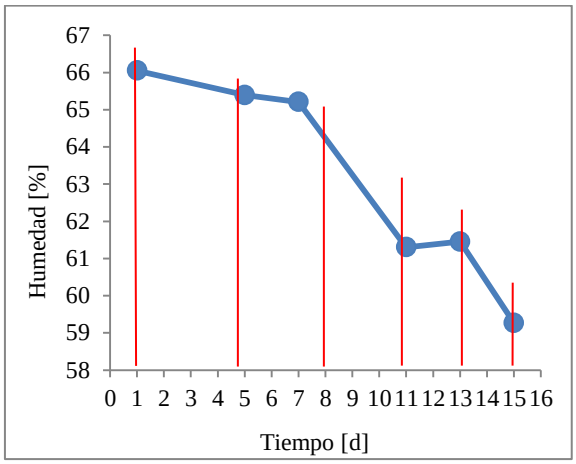


Figura 92: Registro humedad para control y muestreo de nueva pila

Pila Dos Nueva

Al aumentar la frecuencia de los volteos, día por medio, y tomar muestras de la pila con nueva composición y medir la humedad, ésta iba disminuyendo con el transcurso de los días, lo que significa que se estaba secando, por lo cual el factor determinante de este proceso es la aireación, ya que en un comienzo se esperaba a que el biosólido llegase a una temperatura igual o superior a 40 ℃ para voltear; por lo cual luego de esta prueba se estableció que el volteo de las pilas se realizaría día por medio independientemente de la temperatura que ésta poseyera.

6.6. Tasa de emisión de amoníaco

Se calculó la tasa de emisión para el amoníaco, ya que es el compuesto con mayor concentración dentro del invernadero, en comparación a las emisiones de ácido sulfhídrico y compuestos orgánicos volátiles.

Los datos disponibles para el cálculo son las concentraciones medidas por el sensor ubicado en la tubería luego del lavador; los valores registrados por el equipo debiesen ser similares a la condición dentro del invernadero, ya que el lavador se encuentra inactivo.

La tasa, T_e, se calcula de acuerdo al análisis realizado junto con jefatura de operaciones:

$$T_e * A = n * Q * C$$

$$T_e = \frac{n * Q * C}{A} \tag{13}$$

Siendo n el número de extractores, Q el flujo de éste, C la concentración del amoníaco y A el área de emisión.

De acuerdo a las *Figuras 58* a *63* se calcula la tasa a partir de períodos constantes de concentración, donde se asume que el invernadero está funcionando con tres extractores $(n = 3)$, esta suposición es debida a que el automatismo y programación del galpón presentaron fallas desde un comienzo.

Para el 28 de julio, primer día de control, se estima que la concentración promedio es de $38\ ppm_v$ de amoníaco, lo que equivale a $26{,}4\ mg/m^3$; esto entrega una tasa de emisión con un valor de:

$$T_e = \frac{3 * 6000\ {}^{m^3}/_{h} * 26{,}4\ {}^{mg}/_{m^3}}{175\ m^2} = 2715\ \frac{mg}{m^2 * h}$$

Se realiza el mismo procedimiento para los demás días que existen datos disponibles, lo que se resume en la *Tabla 14*:

Tabla 14: Tasa de emisión para el amoníaco de acuerdo a datos de sensor ubicado en tubería (Elaboración propia).

Pila	Fecha	Día pila	Concentración constante $[ppm_v]$	Tasa emisión $\left[\frac{mg}{m^2 * h}\right]$	Volteo
Uno	28 julio	1	38	2715	-
	29 julio	2	45	3216	-
	30 julio	3	25	1787	-
	31 julio	4	20	1440	-
	1 agosto	5	20	1440	-
	3 agosto	7	16	1144	-
	5 agosto	9	45	3216	Sí (Día anterior)
	8 agosto	12	5	360	-
	9 agosto	13	30	2160	-
	10 agosto	14	10	720	Sí
Tres	6 septiembre	7	65	4646	Sí (Día anterior)
	7 septiembre	8	90	6480	Sí
	8 septiembre	9	60	4320	-
	9 septiembre	10	40	2880	Sí
	10 septiembre	11	55	3929	-
	11 septiembre	12	20	1440	-

La mayor tasa de emisión se presenta en la pila tres, el día ocho, esto debido a dos factores: temperatura, la cual de acuerdo a los sensores tuvo su máxima en los 35 ℃ y además ese día se realizó volteo de ambas pilas, lo cual fomentó la actividad microbiana, por lo que la concentración de amoníaco dentro del invernadero fue mayor. Al comparar las tasas de ambas pilas se observa que éstas son mayores para la pila tres, ya que a ésta se le realizaron los volteos día por medio, condición que no se dio para la primera.

Según el Decreto Supremo 594 (*Ministerio de Salud, 2000*), en su Artículo 66, se establece el límite permisible ponderado (8 horas diarias) y temporal (15 minutos continuos) para las concentraciones ambientales del amoníaco en el lugar de trabajo:

Tabla 15: Límites permisibles para el amoníaco (Ministerio de Salud, 2000).

	Límite permisible ponderado		Límite permisible temporal	
	$[ppm_v]$	$\left[{}^{mg}/_{m^3}\right]$	$[ppm_v]$	$\left[{}^{mg}/_{m^3}\right]$
NH_3	20	14	35	24

Como se observa, las concentraciones presentadas en el invernadero, de acuerdo al registro de los sensores, son mucho mayores respecto a lo que establece la normativa, es por esto que al ingresar al galpón se deben portar todos los implementos de seguridad, principalmente la máscara con filtro de gases, ya que por ser un espacio confinado y con altas temperaturas, el no poseer estos elementos puede afectar severamente la salud de los trabajadores. El tiempo dentro del invernadero no debe superar los 15 a 20 minutos, ya que las altas temperaturas y los gases confinados pueden causar fatiga en el personal.

6.7. Transferencia de calor

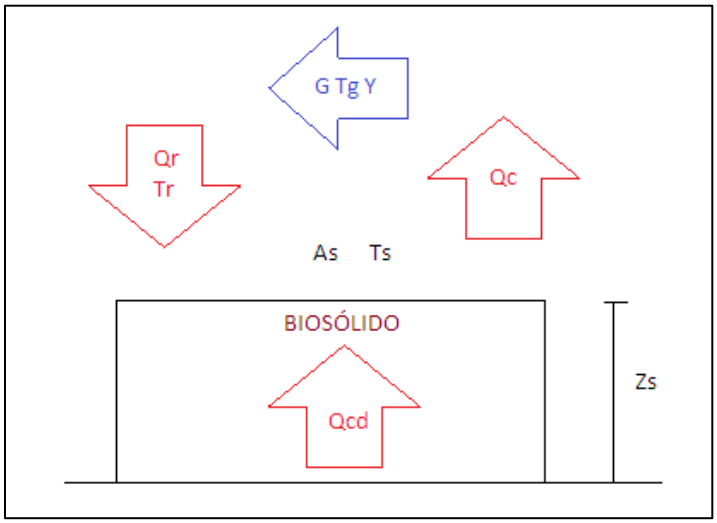


Figura 93: Esquema de secado para el biosólido (Geankoplis, 1998).

La Figura 93 indica el sentido de los flujos de energía para el sistema biosólido en invernadero y los diferentes mecanismos de transferencia en el proceso.

Debido a fallas en la termocupla, sólo se registró el valor de temperatura interna del biosólido para la primera tanda de pilas; por tanto se muestra el resultado obtenido para ésta.

El cálculo en detalle se muestra en Anexos, sección 10.5.

Tabla 16: Transferencia de calor para el secado de una pila de biosólido en galpón (Elaboración propia).

Temperatura pila uno					
	Ts [°C]	**Qc** $\left[W/_{m^2}\right]$	**Qr** $\left[W/_{m^2}\right]$	**Q cond** $\left[W/_{m^2}\right]$	**Qtotal** $\left[W/_{m^2}\right]$
28-07	24,5	−67,5	7192,2	−0,3	7124,4
01-08	25,9	−88,9	7735,8	−0,4	7646,5
03-08	24,5	−67,0	7916,4	−0,3	7849,1
05-08	28,6	−91,1	8916,2	−0,4	8824,8
08-08	37,8	−254,3	4686,0	−1,0	4430,7
10-08	34,6	−207,0	3229,4	−0,8	3021,6
12-08	37,7	−276,8	4003,1	−1,1	3725,3
16-08	44,3	−341,4	1961,4	−1,4	1618,6
Promedio	32,2	−174,3	5705,1	−0,7	5530,1
Total		−1394,0	45640,5	−5,6	44240,9

El calor total promedio transferido por el ambiente a la pila uno ubicada en el galpón fue de $5530{,}1\ W/m^2$; como la superficie de contacto es de $175\ m^2$, el calor total transferido desde el biosólido al ambiente fue de $967.768\ W$.

Como se observa en la *Tabla 16*, el calor transferido por conducción no aporta de manera considerable al total como el caso del mecanismo de transferencia por radiación, esto debido principalmente a la acción del galpón, el cual, como ya se determinó, aumenta la temperatura ambiente en aproximadamente 7 ℃, lo que permite que el secado de las pilas de biosólidos se vea favorecido.

La conducción de calor se genera principalmente por la interacción entre las partículas orgánicas que conforman el biosólido, sin embargo su coeficiente de conductividad térmica es bajo, $0{,}12\ W/K * m$, (*Díaz et al., 2013*) lo que se refleja en el escaso aporte al total de calor transferido.

De acuerdo a la ecuación (16) de Anexos, el flujo de evaporación tiene un valor de:

$$N_C = \frac{5530{,}1\ \left[{}^{W}/_{m^2}\right]}{2406\ \left[{}^{kJ}/_{kg}\right]} = 2{,}30\ \left[{}^{kg}/_{m^2 * s}\right]$$

El flujo de evaporación es bajo, debido a que el proceso de secado es un fenómeno que se produce a bajas velocidades, considerando además el porcentaje de humedad inicial de la pila y otros factores externos al proceso como lo son la temperatura y humedad al interior del galpón.

6.8. Remoción de agua

La remoción de agua de la pila se calcula en base a los registros de humedad para cada pila controlada utilizando la siguiente ecuación:

$$\left(H_{in} - H_{fin}\right) * M_{SH} = kg_{H_2O}\ removido \qquad (14)$$

Tabla 17: Remoción de agua para las tres tandas de pilas en galpón y su réplica en exterior (Elaboración propia)

	Invernadero				**Exterior**			
	Humedad inicial [%]	**Humedad final** [%]	**Remoción** $[kg_{H_2O}]$	**Tiempo** $[d]$	**Humedad inicial** [%]	**Humedad final** [%]	**Remoción** $[kg_{H_2O}]$	**Tiempo** $[d]$
Pila Uno	61,23	52,28	7159	20	58	50,93	5654	20
Pila Dos	59,57	41,99	14065	15	59,2	37,4	17436	28
Pila Tres	58,25	39,86	14709	14	58,45	41,87	13264	22

De acuerdo a la *Tabla 17*, la remoción de agua en la primera tanda de pilas fue inferior respecto a las otras dos, debido a que no se llegó al porcentaje de sólidos totales previamente establecido; sin embargo para las pilas dos y tres, la remoción fue mucho mayor, ya que las temperaturas dentro y fuera del galpón permitieron que el agua se evaporara más rápido, pues la pila dos se dispuso en el invernadero a inicios de septiembre; además los extractores pudieron funcionar de manera continua junto con los ventiladores, sin las interrupciones por los problemas de automatización que se presentaron en un comienzo. Además que el proceso de aireación se realizó de manera normal y controlado día por medio, favoreciendo el aumento de temperatura del biosólido por actividad microbiana, reduciendo así el porcentaje de agua de la misma. La remoción de agua de la pila dos en el exterior fue mayor, debido a que estuvo más días en proceso de secado, por el contrario a la misma dispuesta en galpón, la cual estuvo casi la mitad del tiempo.

7. CONCLUSIONES

El Centro de Gestión Integral de Biosólidos recibe los biosólidos de La Farfana y Trebal para ser sometidos a secado, entregando buenos resultados en meses donde las temperaturas son altas y el proceso demora pocos días; sin embargo, cuando las condiciones son desfavorables, alta humedad y precipitaciones, el secado se prolonga aproximadamente 15 días y surgen los malos olores, los cuales, por acción del viento, llegan a los poblados cercanos.

Por lo tanto la implementación de un galpón donde se lleve a cabo el secado en época de lluvia permite reducir el impacto del proceso, ya que el tiempo de secado se reduce a la mitad de lo que demoraría si fuese realizado a la intemperie, además del confinamiento de gases contaminantes que generan olores molestos. Adicional a esto, la instalación de la chimenea, luego del lavador de gases, permite dispersar la emisión de gases reduciendo el impacto medioambiental, lo que ya es una medida paliativa.

Respecto a la medición de gases al interior del invernadero, ésta fue posible, aunque con la limitante del rango de medición de los sensores instalados, ya que a humedades relativas superiores al 95 %, los equipos miden con error, sin embargo reflejan la tendencia del comportamiento de los gases; el cual depende de la temperatura y contenido de agua en el galpón.

Los factores más importantes a considerar durante el proceso de secado biológico son la temperatura de la pila, la cual debe ser superior a los 40 ℃ , para garantizar que se lleve a cabo la actividad microbiana, que es el condicionante para el aumento de la temperatura del lodo; y además los períodos de volteo, ya que como se observó en la primera tanda de pilas muestreadas, el aumento de temperatura y reducción de humedad fueron despreciables respecto a las otras tandas, pues la pila no recibía la aireación necesaria para que se llevara a cabo el metabolismo de las bacterias, lo que trae como consecuencia un aumento de los malos olores por el aumento de la concentración de compuestos sulfurados.

Respecto a la evaluación de las condiciones óptimas de funcionamiento del invernadero, ésta no se pudo realizar debido a la inactividad del lavador de gases, por lo cual es necesario realizar más pruebas de biosecado.

Por tanto la construcción del galpón permite reducir el tiempo de secado de los biosólidos además de reducir el impacto del proceso por la mitigación de los malos olores.

8. RECOMENDACIONES

De acuerdo a lo realizado durante el seguimiento de la operación del invernadero instalado en el CGIB, se tienen las siguientes recomendaciones basadas en las diferentes experiencias de muestreo y además, comentarios adicionales para un óptimo desarrollo de las labores.

Seguridad personal

- Cada vez que se ingrese al CGIB, se debe informar al jefe de planta, Pablo Sánchez y los operarios que se encuentren presentes en ese momento en el lugar.
- Entrar siempre al invernadero con máscara con filtro de gases y sensores móviles que detecten la presencia de gases tóxicos, estos serán la principal advertencia que se tendrá al estar dentro del recinto.
- El muestreo de la pila del galpón se debe realizar siempre con supervisión de alguien que se encuentre al exterior de éste, con su máscara de filtro de gases, en caso de ocurrir cualquier emergencia.
- Debido a las condiciones ambientales en Til Til, se recomienda realizar el muestreo lo más temprano posible, para evitar sufrir deshidratación o fatiga por las altas temperaturas, para los meses de agosto en adelante.
- En la medida de lo posible, portar una radio o *walkie-talkie* para dar aviso a administración en caso de presentarse una emergencia.
- Asegurarse de que todos los equipos a utilizar en el muestreo (termocupla, sensores móviles) estén funcionando en condiciones óptimas.
- Utilizar traje de papel para los días que la temperatura ambiente sea alta, además de considerar que el invernadero aumenta este valor en 7 ℃ aproximadamente.

Operación

- Realizar el volteo de las pilas día por medio para asegurar la aireación y con ello, la actividad microbiana al interior del biosólido.
- Medir la temperatura del biosólido en todos los puntos de muestreo.
- Revisar si los extractores y ventiladores están funcionando de acuerdo a la programación previamente establecida.
- Medir en tres puntos de la pila para que sea representativo.
- Retirar pendrive del PLC una vez por semana para evitar pérdida de datos (cuando se pasa de un mes a otro, los datos se borran)
- Revisar el color del semáforo.

9. REFERENCIAS

Aarthi, T., Leelapriya, T., Kalaichelvan, P.T., 2004. Application of weak sinusoidal magnetic field on *Flavobacterium* species in the treatment of paper mill effluent. Electromagnetic Biology and Medicine 23, 215-227.

Aguas Andinas, BS Consultores, 2009. Evaluación de impacto ambiental Centro de gestión integral de biosólidos El Rutal, Capítulo 2, Descripción del proyecto (Aguas Andinas, distribución interna).

Aguas Andinas, 2015. Reporte de sustentabilidad, página 43.

Aguas Andinas, 2016. Galpón piloto de secado de lodos- El Rutal. Evaluación de la dispersión de olor mediante modelo matemático. Medio Ambiente, Gerencia de asistencia técnica (Aguas Andinas, distribución interna).

Bennamoun, L., 2012. Solar drying of wastewater sludge: A review. Renewable and sustainable energy reviews 16, 1061-1073.

Borie G., Peirano, P., Espinoza, J., 2000. Distribución del carbono en residuos orgánicos y su interacción con elementos metálicos, nutrientes y/o contaminantes. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Chile (Tesis de pregrado).

Cai, L., Gao, D., Chen, T., Liu, H., Zheng, G., 2012. Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying. Bioresource Technology 117, 13-19.

Cai, L., Chen, T., Gao, D., Zheng, G., 2013. Influence of forced air volumen on water evaporation during sewage sludge bio-drying. Water Research 47, 4767-4773.

Cai, L., Chen, T., Gao, D., Yu, J., 2016. Bacterial communities and their association with the byo-drying of sewage sluge. Water Research 90, 44-51.

Chávez, F., 2011. Determinación del aporte de inmisión de olor generado por la operación del Centro de gestión integral de biosólidos (CGIB) El Rutal, sobre el sector Rungue-Montenegro, en comparación con la línea base de fuentes emisoras. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas (Tesis de pregrado).

Cummings, D. E., Caccavo Jr., F., Spring, S., 1999. Ferribacterium limneticum, gen. nov., sp. Nov., an $Fe(III)$- reducing microorganism isolated from mining-impacted freshwater lake sediments. Archives of Microbiology 171, 183-188.

Deng, W., Yan, J., Li, X., Wang, F., 2008. Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process. Journal of Hazardous Materials 162, 186-192.

Díaz, J., Robles, F., Macías, M., 2013. Determinación de la conductividad térmica de materiales para biosecado mediante el método de placa caliente. Instituto politécnico nacional, Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas. (Tesis de pregrado)

Fuentes, M., 2016. Comunicación personal durante los viajes a El Rutal, agosto de 2016.

Geankoplis, C. J., 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias, Capítulo 9, Secado de materiales de proceso, páginas 579-634. Tercera edición, México. Compañía editorial continental, S.A. de C.V.

ISP, 2000. Determinación de humedad, Método de la estufa de aire. Instituto de Salud Pública, Sub departamento Laboratorios del Ambiente.

Kuo, T.M., Lanser, A.C., Kaneshiro, T., Hou, C.T., 1999. Conversion of oleic acid to 10-ketostearic acid by *Sphingobacterium* sp. strain O22. Journal of the American Oil Chemists' Society 76, 709-712.

Mara, K., Decorosi, F., Viti, C., 2012. Molecular and phenotypic characterization of *Acinetobacter* strains able to degrade diesel fuel. Research in Microbiology 163, 161-172.

Ministerio de Salud, 2000. Decreto Supremo 594. Aprueba el reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.

Prabhakaran, M., Couger, M.B., Jackson, C.A., Weirick, T., 2015. Genome sequences of the lignin-degrading *Pseudomonas* sp. strains YS-1p and *Rhizobium* sp. strain YS-1r isolated from decaying wood. Genome Announcements 3, e00019-15.

PROAMCO, 2016. Planos estructurales de invernadero construido en CGIB, El Rutal para proyecto de biosecado de lodos.

Ren, L. H., Nie, Y.F., Liu, J.G., Jin, Y.Y., 2006. Impact of hydrothermal process on the nutrient ingredients of restaurant garbage. Journal of Environmental Sciences 18,1012-1019.

Robles, F., Ramírez, I., 2010. Efecto de la adición de agentes estructurantes a residuos hortícolas en tratamientos aerobios. Departamento de bioprocesos, Unidad profesional interdisciplinaria de biotecnología, Instituto politécnico nacional, D. F., México (Tesis de pregrado).

Rogers, H. R., 1996. Sources, behaviour and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludges. The Science of the total environment 185, 3-26.

Scelza, R., Rao, M.A., Gianfreda, L., 2008. Response of an agricultural soil to pentachlorophenol (PCP) contamination and the addition of compost or dissolved organic matter. Soil Biology and Biochemistry 40, 2162-2169.

SISS, 2015. Plantas de TAS en operación. Superintendencia de Servicios Sanitarios, Gobierno de Chile. Recuperado de http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3544.html

Superintendencia del Medio Ambiente, 2014. Informe de fiscalización ambiental, Inspección ambiental, Centro de gestión integral de biosólidos El Rutal. Gobierno de Chile.

Ten, L.N., Im., W.T., Kim, M.K., 2005. A plate assay for simultaneous screening of polysaccharide-and protein-degrading micro-organisms. Letters in Applied Microbiology 40, 92-98.

Treybal, R. E., 1980. Operaciones de transferencia de masa, Capítulo 12, Secado, páginas 723-758. Segunda edición, editorial McGraw Hill.

Trois, C., Coulon, F., Combret, C.P.D., 2010. Effect of pine bark and compost on the biological denitrification process of non-hazardous landfill leachate: focus on the microbiology. Journal of Hazardous Materials 181, 1163-1169.

Deng, W., Yan, J., Li, X., 2009. Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process. Journal of Hazardous Materials 162,186-192.

Weng, H., Dai, Z., Ji, Z., Gao, C., 2015. Release and control of hydrogen sulfide during sludge termal drying. Journal of Hazardous Materials 296, 61-67.

Winkler, M.-K. H., Bennenbroek, M. H., Horstink, F. H., van Loosdrecht, M.C.M., 2013. The byodrying concept: An innovate technology creating energy from sewage sludge. Bioresource Technology 147, 124-129.

Wang, X. R., Jin, Y.Y.,Wang, Z.Y., 2007. Experimental research on indirect thermal drying process of sewage sludge. Environmental Science 28, 407-410 (in Chinese).

10. ANEXOS

10.1. Diferencia humedad invernadero y externa

Se grafica la diferencia que existe entre la humedad del invernadero, promedio de los dos sensores; y el valor entregado por la estación meteorológica ubicada en El Rutal, ya que los sensores externos instalados han presentado fallas en sus registros.

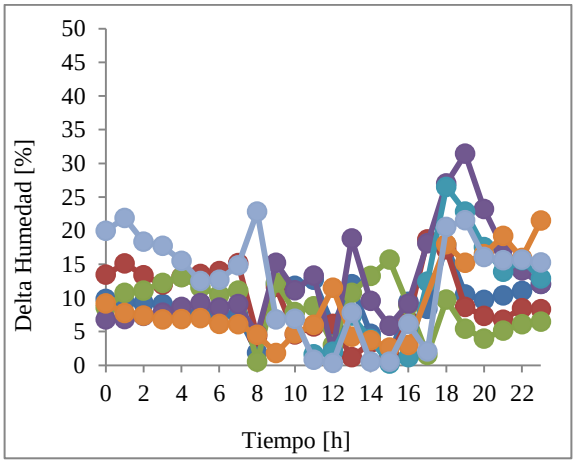


Figura 94: Diferencia humedad Pila Uno Inv Semana Uno

01-ago 02-ago 03-ago 04-ago 05-ago 06-ago 07-ago

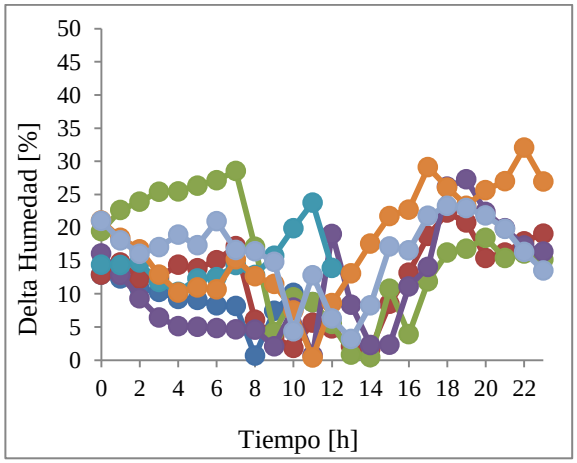


Figura 95: Diferencia humedad Pila Uno Inv Semana Dos

08-ago 09-ago 10-ago 11-ago 12-ago 13-ago 14-ago

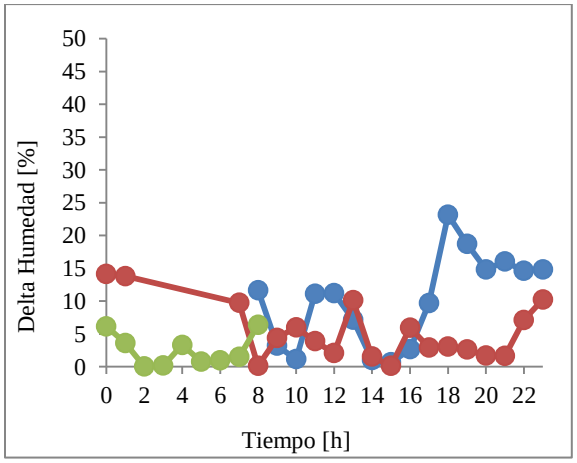


Figura 96: Diferencia humedad Pila Uno Inv Semana Tres

15-ago 16-ago 17-ago

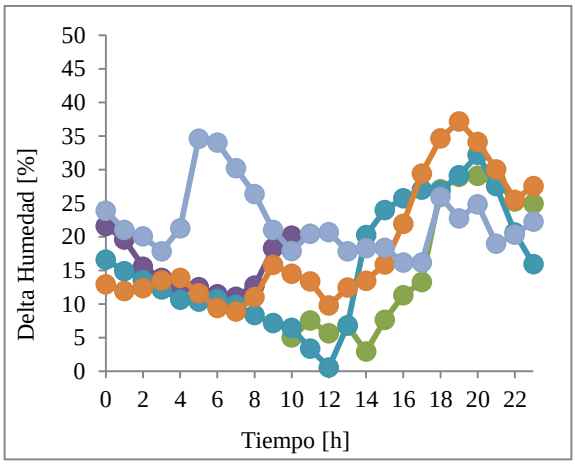


Figura 97:Diferencia humedad Pila Dos Inv Semana Uno

17-ago 18-ago 19-ago 20-ago 21-ago

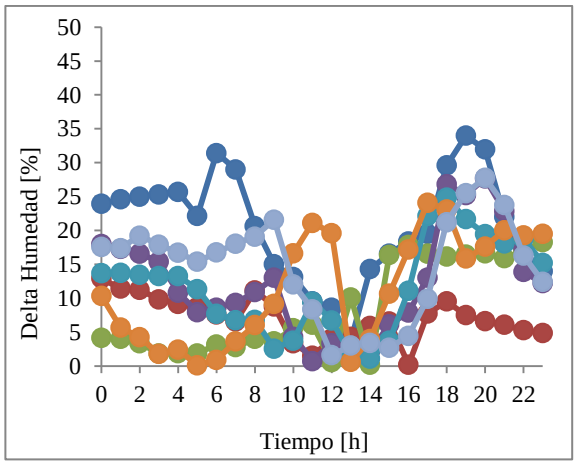


Figura 98:Diferencia humedad Pila Dos Inv Semana Dos

22-ago 23-ago 24-ago 25-ago 26-ago 27-ago 28-ago

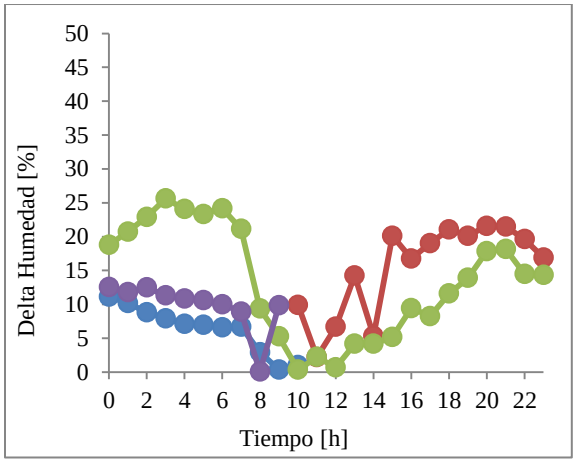


Figura 99:Diferencia humedad Pila Dos Inv Semana Tres

29-ago 31-ago 01-sep 02-sep

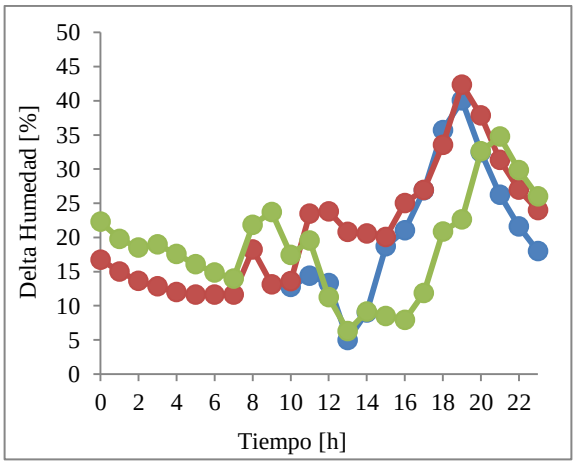


Figura 100:Diferencia humedad Pila Tres Inv Semana Uno

02-sep 03-sep 04-sep

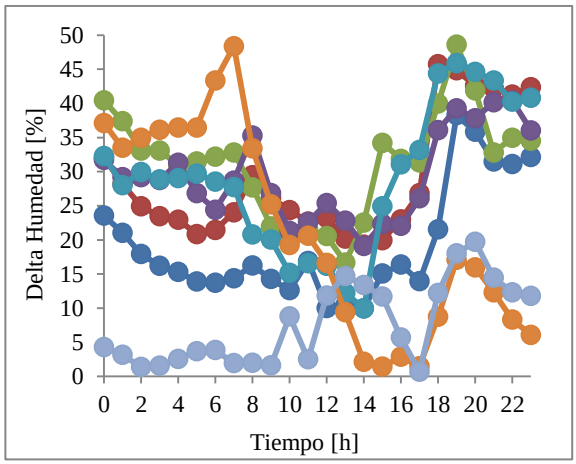


Figura 101: Diferencia humedad Pila Tres Inv Semana Dos

05-sep 06-sep 07-sep 08-sep 09-sep 10-sep 11-sep

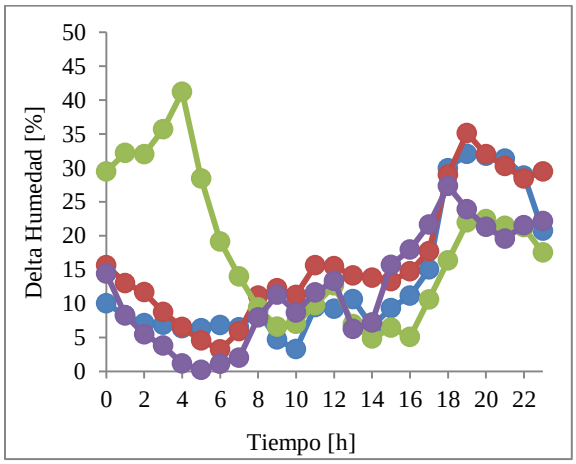


Figura 102: Diferencia humedad Pila Tres Inv Semana Tres

12-sep 13-sep 14-sep 15-sep

10.2. Diferencia temperatura invernadero y externa

Se grafica la diferencia que existe entre la temperatura del invernadero, promedio de los dos sensores; y el valor entregado por la estación meteorológica ubicada en El Rutal, ya que los sensores externos instalados han presentado fallas en sus registros.

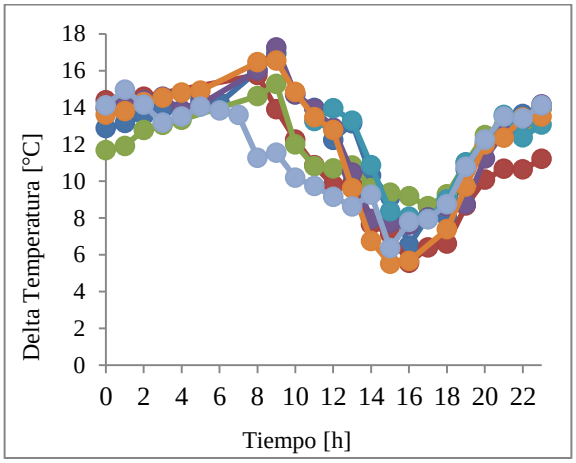


Figura 103:Diferencia temperatura Pila Uno Inv Semana Uno

01-ago 02-ago 03-ago 04-ago 05-ago 06-ago 07-ago

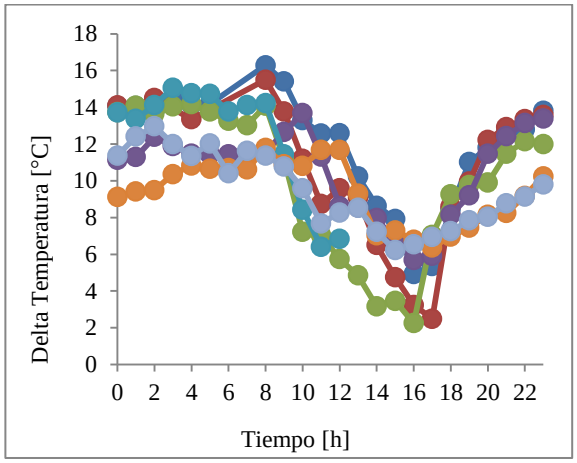


Figura 104: Diferencia temperatura Pila Uno Inv Semana Dos

08-ago 09-ago 10-ago 11-ago 12-ago 13-ago 14-ago

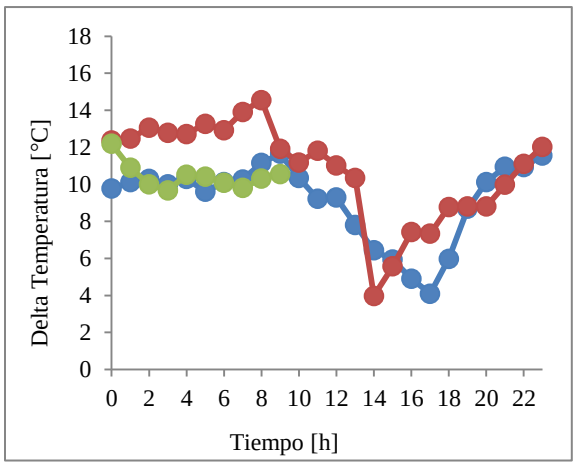


Figura 105: Diferencia temperatura Pila Uno Inv Semana Tres

15-ago 16-ago 17-ago

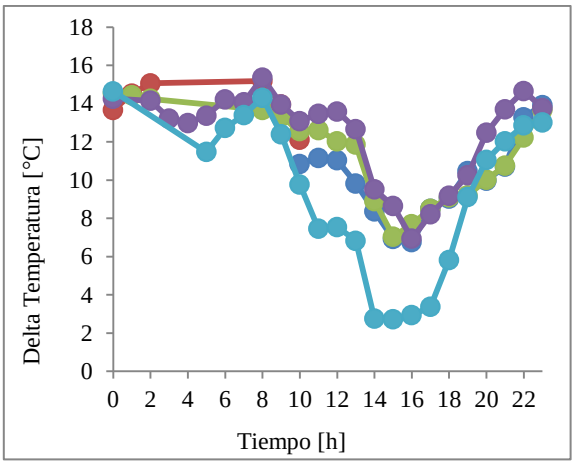


Figura 106:Diferencia temperatura Pila Dos Inv Semana Uno

17-ago 18-ago 19-ago 20-ago 21-ago

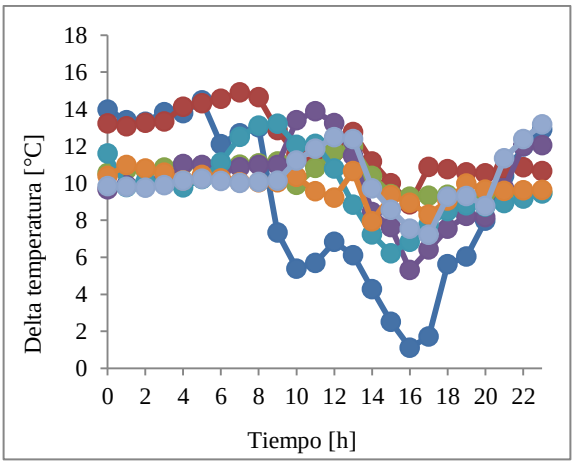


Figura 107:Diferencia temperatura Pila Dos Inv Semana Dos

22-ago 23-ago 24-ago 25-ago 26-ago 27-ago 28-ago

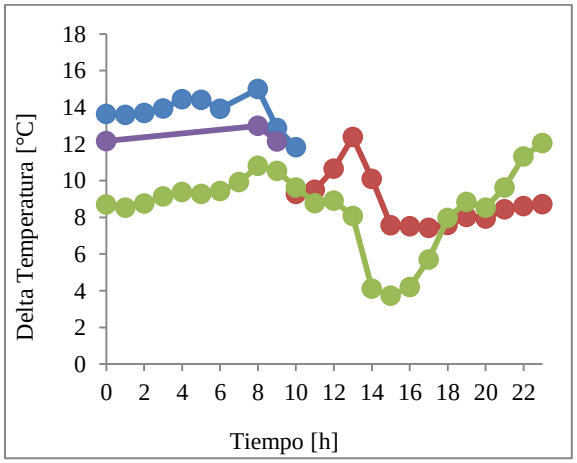


Figura 108:Diferencia temperatura Pila Dos Inv Semana Tres

29-ago 31-ago 01-sep 02-sep

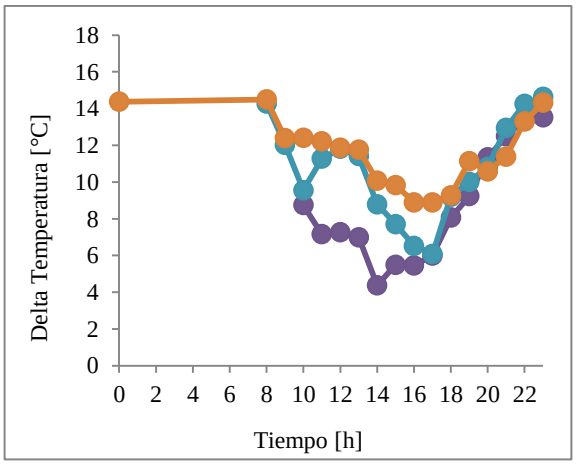


Figura 109:Diferencia temperatura Pila Tres Inv Semana Uno

02-sep 03-sep 04-sep

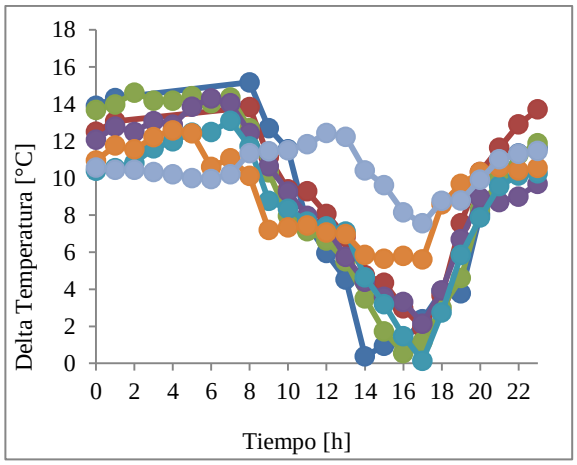


Figura 110:Diferencia temperatura Pila Tres Inv Semana Dos

05-sep 06-sep 07-sep 08-sep 09-sep 10-sep 11-sep

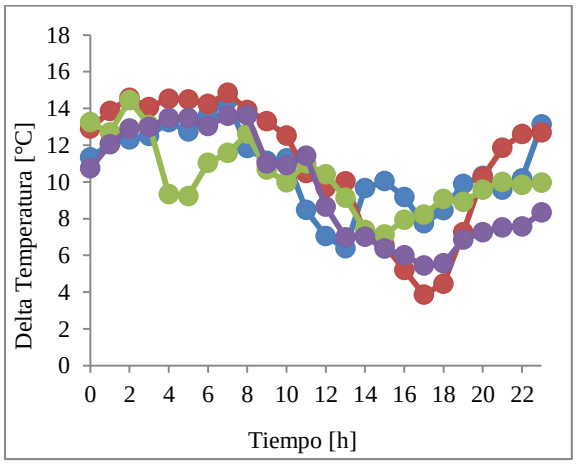


Figura 111:Diferencia temperatura Pila Tres Inv Semana Tres

12-sep 13-sep 14-sep 15-sep

10.3. Temperatura estación meteorológica

La estación meteorológica ubicada en Montenegro registra las condiciones ambientales de la zona, registrando datos en continuo; a continuación se muestra la temperatura ambiente para los días que se realizó control y muestreo de biosólidos.

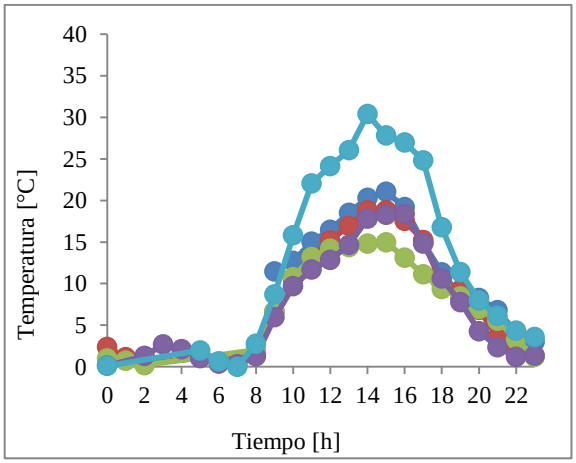


Figura 112:Registro temperatura estación meteorológica para los días

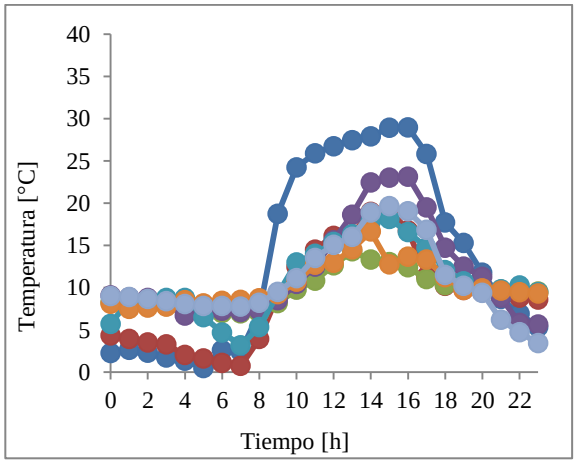


Figura 113:Registro temperatura estación meteorológica para los días

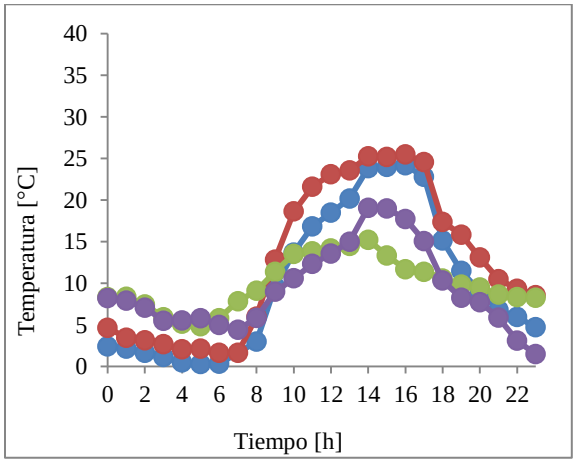


Figura 114:Registro temperatura estación meteorológica para los días

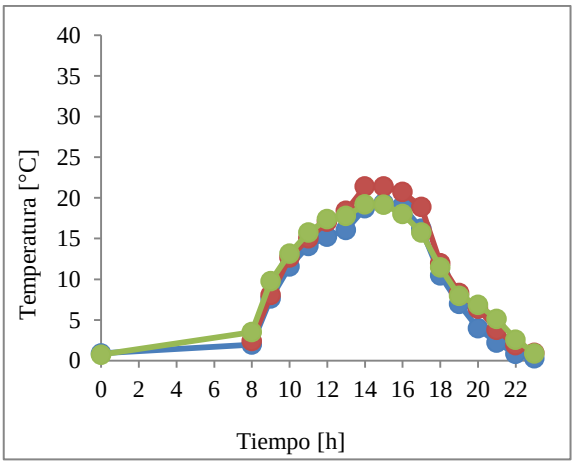


Figura 115:Registro temperatura estación meteorológica para los días

02-sep 03-sep 04-sep

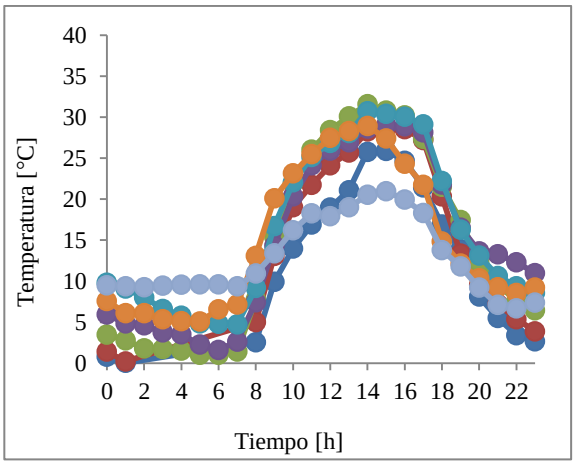


Figura 116:Registro temperatura estación meteorológica para los días

05-sep 06-sep 07-sep 08-sep 09-sep 10-sep 11-sep

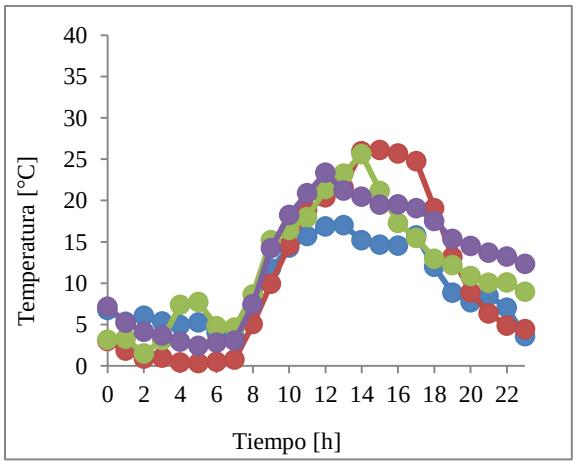


Figura 117:Registro temperatura estación meteorológica para los días

12-sep 13-sep 14-sep 15-sep

10.4. Humedad estación meteorológica

Al igual que para la temperatura, la estación meteorológica registra el valor de la humedad ambiente para la zona de El Rutal, los datos se resumen a continuación:

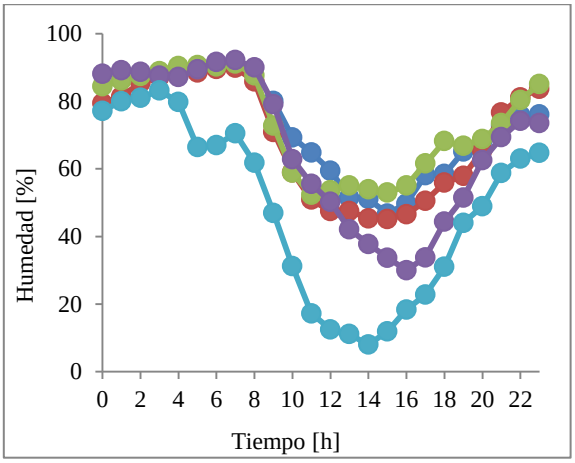


Figura 118:Registro humedad estación meteorológica para los días

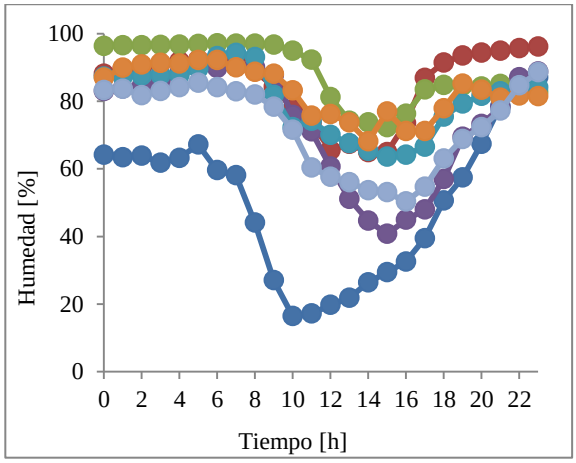


Figura 119:Registro humedad estación meteorológica para los días

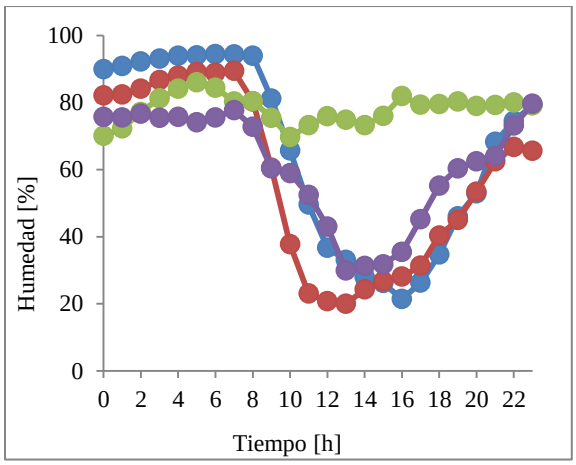


Figura 120:Registro humedad estación meteorológica para los días

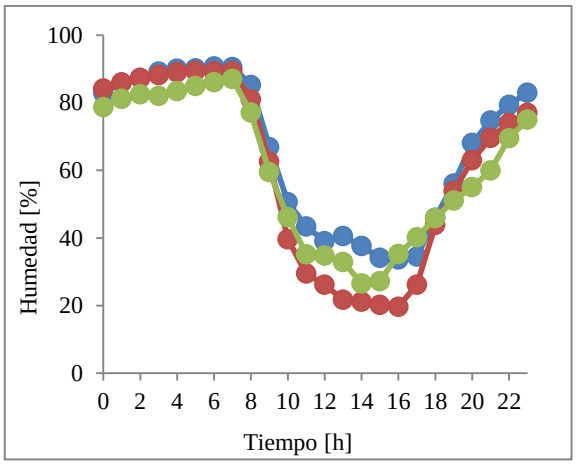


Figura 121:Registro humedad estación meteorológica para los días

02-sep 03-sep 04-sep

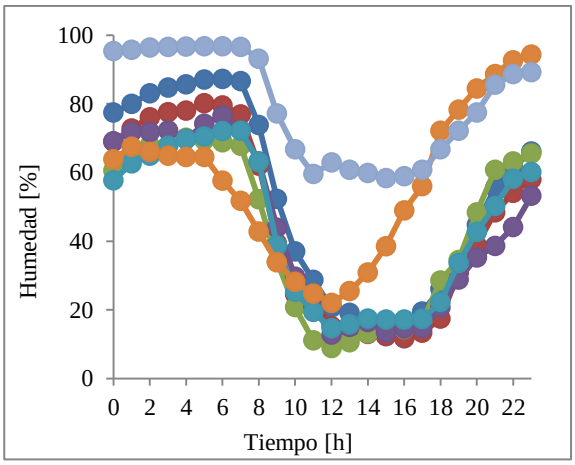


Figura 122:Registro humedad estación meteorológica para los días

05-sep 06-sep 07-sep 08-sep 09-sep 10-sep 11-sep

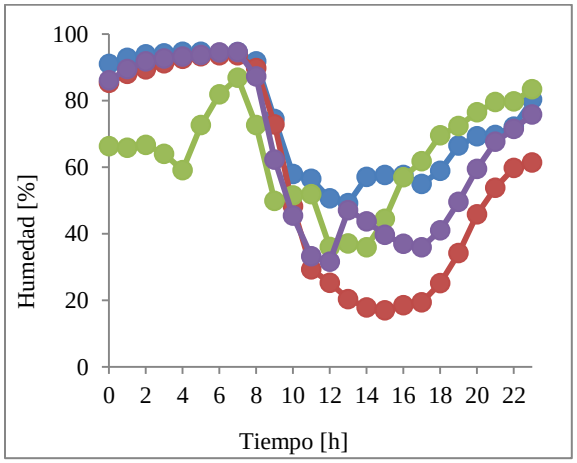


Figura 123: Registro humedad estación meteorológica para los días

12-sep 13-sep 14-sep 15-sep

10.5. Cálculo transferencia de calor

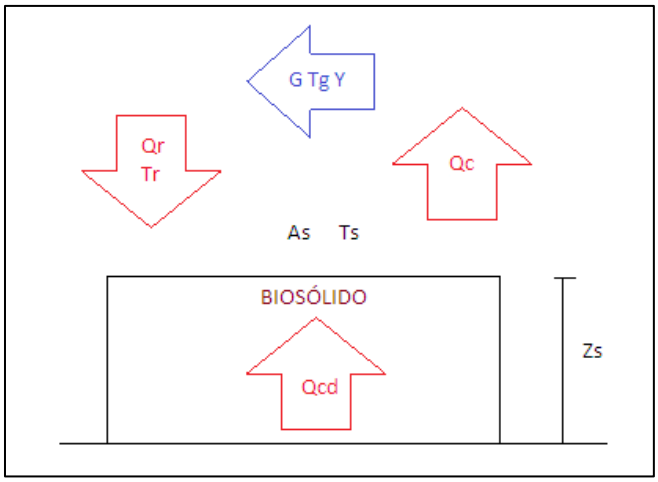


Figura 124: Esquema de secado para el biosólido (Geankoplis, 1998).

De acuerdo a la *Figura 124*, la transferencia de calor en el secado de biosólidos está dada por tres mecanismos (*Geankoplis, 1998*):

- Convección, Q_C
- Conducción, Q_{Cd}
- Radiación, Q_R

Por lo que el calor total transferido, Q_t, desde el ambiente a la pila es

$$Q_t = Q_R + Q_C + Q_{Cd} \tag{15}$$

El flujo de evaporación, N_c, se define como

$$N_c = \frac{Q_t}{\lambda_s} \tag{16}$$

Donde λ_s es el calor latente de evaporación.

La transferencia de calor por convección está dada por la siguiente ecuación:

$$Q_C = h_C * (T_G - T_S) \tag{17}$$

Siendo T_G la temperatura de la corriente gaseosa, T_S la temperatura en la superficie del sólido y h_C el coeficiente de transferencia de materia.

Al estar el biosólido dentro de un galpón con paredes de policarbonato, el efecto de la radiación se debe considerar ya que permite que el secado más rápido de las pilas respecto a las ubicadas en el exterior.

$$Q_R = h_R * (T_R - T_S) \tag{18}$$

$$h_R = \frac{(5{,}729 * 10^{-8}) * (T_R^4 - T_S^4)}{T_R - T_S} \tag{19}$$

T_R es la temperatura de la superficie que irradia y h_R es el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

El calor por conducción a través del sólido queda definido de la siguiente manera:

$$Q_{Cd} = U_k * (T_G - T_S) \tag{20}$$

$$U_k = \frac{1}{\left({}^{1}/_{h_C}\right) + \left({}^{z_S}/_{k_S}\right)} \tag{21}$$

Siendo h_C el coeficiente de transferencia de calor por convección usado en la ecuación (17), z_S es el alto de la pila de biosecado, que en este caso corresponde a $2\ m$ y k_S es la conductividad térmica del biosólido.

En la *Tabla 18* se muestran los valores de cada una de las variables utilizadas para el cálculo de la transferencia de calor entre la pila de biosólido que se somete a proceso de biosecado y el ambiente, el cual está condicionado por la presencia de un galpón.

Siendo T_s la temperatura del biosólido, T_g , temperatura de la corriente de aire, T_r , temperatura de la fuente radiante, galpón de policarbonato y h_r , el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

Tabla 18: Cálculo de los diferentes mecanismos de transferencia de calor en base a la temperatura de la pila uno del invernadero (Elaboración propia)

Temperatura pila uno										
	Día	**Ts [°C]**	**(Tg-Ts) [°C]**	**Tr [°C]**	**(Tr-Ts) [°C]**	**Qc [W/m2]**	**hr [W/m2]**	**Qr [W/m2]**	**Q cond [W/m2]**	**Qtotal [W/m2]**
28-07	1	24,5	−4,5	45	20,5	−67,5	350,3	7192,2	−0,3	7124,4
01-08	5	25,9	−5,9	46	20,1	−88,9	385,5	7735,8	−0,4	7646,5
03-08	7	24,5	−4,5	46	21,5	−67,0	367,6	7916,4	−0,3	7849,1
05-08	9	28,6	−6,1	48	19,4	−91,1	459,6	8916,2	−0,4	8824,8
08-08	12	37,8	−17,0	46	8,2	−254,3	570,7	4686,0	−1,0	4430,7
10-08	14	34,6	−13,8	42	7,4	−207,0	435,8	3229,4	−0,8	3021,6
12-08	16	37,7	−18,5	45	7,3	−276,8	547,5	4003,1	−1,1	3725,3
16-08	20	44,3	−22,8	47	2,7	−341,4	732,5	1961,4	−1,4	1618,6
					promedio	−174,3	481,2	5705,1	−0,7	5530,1
					total	−1394,0	3849,5	45640,5	−5,6	44240,9

10.6. Producto Biostreme

BioStreme

Ficha Ténica D10

BIOSTREME™ D10 Formulación de Micronutrientes totalmente Natural.

Le ofrece a los compostadores la posibilidad de gestionar directamente la biología fundamental de sus operaciones. Cuando se aplica por pulverización tópica a las superficies de trabajo, o por mezcla con la biomasa durante las operaciones de compostaje en hieras - BioStreme™ D10 funciona inmediatamente para suprimir olores molestos tales como: H2S, mercaptanos, ácidos grasos volátiles, cetonas y amoníaco.
Los beneficios incluyen tasas de descomposición y estabilización aceleradas, así como menos frecuencias en el giro manual y aireación de las hileras. Este producto elimina los procesos biológicos que producen olores mientras promueve fuertes poblaciones de bacterias facultativas para degradas eficientemente orgánicos.

Perfil Técnico

BioStreme™ D10 está diseñado para alimentar altas concentraciones de bacterias facultativas - microbios beneficiosos que ayudan en la descomposición agresivamente sin producir subproductos olorosos. Se emplea una mezcla natural, no tóxica y biodegradable, de los aminoácidos, aceites esenciales, vitaminas, minerales, purinas, pirimidinas, y extractos orgánicos complejos. Es completamente seguro de manejar y usar, y no emplea enzimas, alcoholes o bacterias.

Instrucciones de Uso

Método de Hileras: Después de que se construye la hilera, BioStreme D10 se aplica tópicamente usando un camión de agua o de tipo barra pulverizadora para alcanzar una concentración de 10ml/m² (factor de dilución 1001:1 máx.) Repita 3 veces durante el rociado de rutina y de inflexión - o como sea requerido.

Figura 125: Ficha técnica producto aplicado en biosólidos (DMASI, 2016)

10.7. Termocupla

Applications:

- Greenhouse
- Office environment
- Labs
- Environment studies
- Weather monitoring
- Art galleries/Museums
- Department store
- Workshops

Temperature

RTD: Pt385(100Ω), Pt3916/Pt3926(100Ω)
Range:
Pt385(100Ω): -200℃ to 800℃, (-328℉ to 1472℉)
Pt3916/Pt3926(100Ω): -200℃ to 630℃
(-328℉ to 1166℉)
Accuracy:
±(0.05%rdg + 0.2℃) on ℃ scale
±(0.05%rdg + 0.4℉) on ℉ scale

Features:

- USB Port provides excellent user interface (805U/805UW)
- DC 12V adapter (805U/805UW)
- Wireless two ways transmission (805W/805UW)
- RTD single input function
- Pt3916/Pt3926/Pt385 RTD standard
- ℃/℉ user-selective
- MAX/MIN with elapsed time, AVG, REL, REL RECALL, Hi RECALL, Lo RECALL, HOLD function
- TIME setting, REL setting
- Warning beeper with Hi/Lo setting
- Resolution 0.1℃ or 0.2℉
- According to temperature standard ITS-90

Figura 126: Ficha técnica termocupla para medir temperatura biosólidos (CHY, 2016)

10.8. Sensores móviles

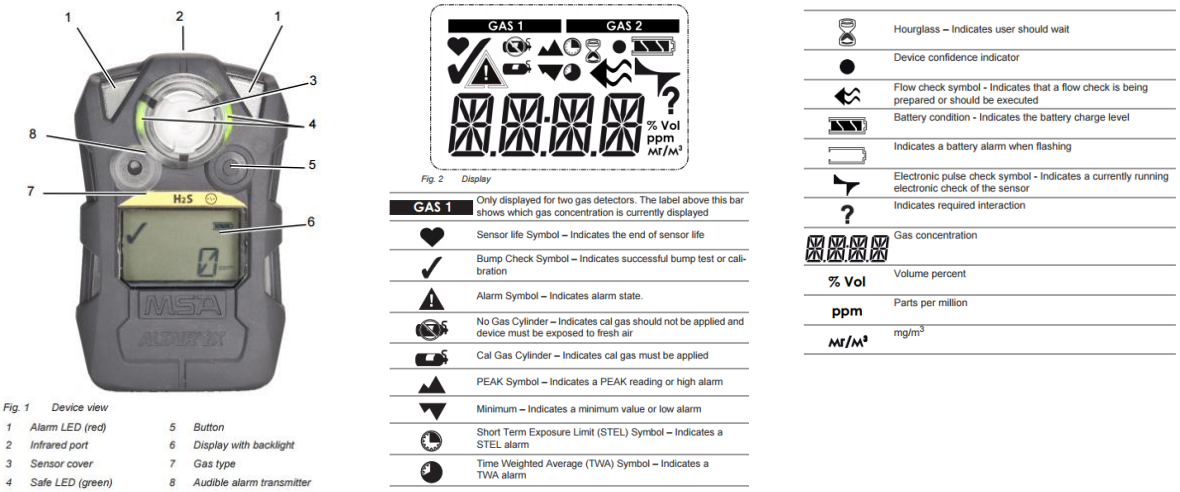
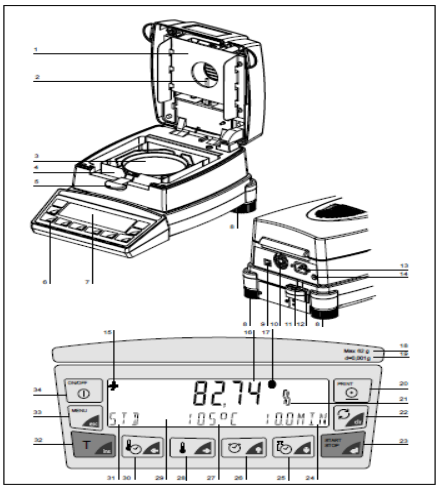


Figura 127: Ficha técnica sensor portátil de gases (MSA, 2016)

10.9. Termobalanza



N°	Descripción
1	Radiador halógeno
2	Sensor de temperatura PT100
3	Plato
4	Paraviento
5	Soporte de plato
6	Teclado de membrana de 10 teclas
7	Display
8	Pies de altura ajustable
9	Interfaz serial. jack RJ45
10	Ventilador
11	Nivel de burbuja
12	Protección mecánica antirrobo
13	Jack de conexión a red
14	Cortacircuito de red
15	Visualización signo
16	Visualización valor de lectura
17	Pesada
18	Pesada mínima
19	Precisión
20	Tecla imprimir
21	Visualización unidades
22	Tecla cambiar
23	Tecla start / stop
24	Visualización tiempo de secado
25	Tecla modo parada
26	Tecla tiempo
27	Visualización temperatura
28	Tecla temperatura
29	Barra de datos
30	Tecla modo calefactor
31	Visualización modo calefactor
32	Tecla tara
33	Tecla menú
34	Tecla ON/OFF

Tecla(s)	Símbolo	Funcion en servicio de pesaje
	«⇦», «⇨»	• Pasar de la ruta principal del menú a las sub-rutas y viceversa.
	«⇧» «⇩»	• Subir/bajar dentro de la ruta principal resp. secundaria. • Modificar los parámetros seleccionados.
START STOP	«⏎»	• Selección de parámetros • Guarda los parámetros modificados.
MENU esc	«esc»	• Cancela la introducción de datos. • Salir del menú.
T ins	«ins»	• Situar puntero de inserción (en modo de introducción de texto).
clr	«clr»	• Borrar introducción (en modo de introducción de texto).
PRINT	«PRINT»	• Introducir un punto (en modo de introducción de texto).

Figura 128: Ficha técnica de termobalanza para la medición de sólidos totales (PRECISA, 2016)

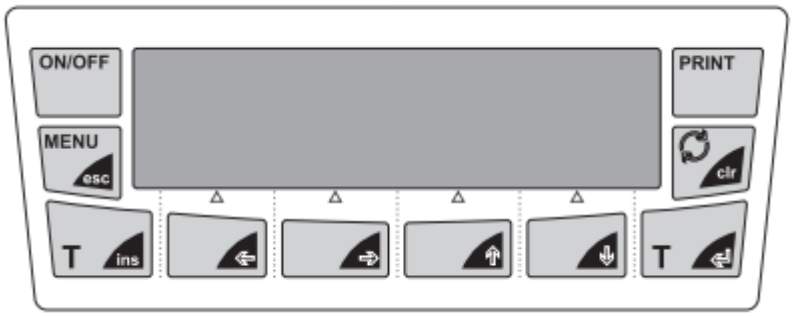
10.10. pH-metro

Specifications

pH	**Range**	-2.00 to 16.00
	Resolution	0.1, 0.01
	Relative Accuracy	±0.01
	pH Calibration Points	Up to 3
mV	**Range – mV**	±1600.0 mV
	Range – RmV	±1999.9 mV
	Resolution	0.1
	Relative Accuracy	±0.2 mV or ±0.05 % of reading whichever is greater
	Relative mV Calibration	Yes
Temperature	**Range**	-5 to 105 °C
	Resolution	0.1
	Relative Accuracy	±0.1
	Temperature Compensation	Automatic or manual
	Temperature Offset Calibration	Yes
Datalogging	**Number of Points**	50
	Log Function	Manual, Automatic with AUTO-READ™
	Log Edit	Delete last reading or all
Inputs	**pH Electrode**	BNC
	ATC Probe	8-pin mini-DIN
Power	**AC Adapter**	Optional – universal, 100-240 VAC
	Battery Power	Included – 4 AAs
	Battery Life	2000 hrs

Figura 129: Datasheet de pH-metro de laboratorio (Thermo Fisher Scientific, 2016)

10.11. Balanza digital



	Name	Function during weighing
ON/OFF	«ON/OFF»	• Switching the balance on and off
MENU esc	«MENU»	• Calling up the Configuration Menu and the Application Menu
T T	«T»	• Initiate Tare Function and/or Calibration Function
clr	«⟲»	• Switches between the Basic program and the chosen application
PRINT	«PRINT»	• Start print function
	«⇧» «⇦» «⇨» «⇩»	• Function keys. Start the functions in the info-line (see Chapter 4.5.5 "Info-line and function keys").

Key(s)	Name	Function during weighing
	«⇦», «⇨»	• Changes from menu main path into sub-paths and back
	«⇧» «⇩»	• Up/Down movements within the main and sub-paths • Changes selected parameters
T	«⏎»	• Selects parameters • Stores the changed parameters
MENU esc	«esc»	• Interrupts an input • Leaves the menu
T	«ins»	• Places insert marker (in text entry)
clr	«clr»	• Deletes input (in text entry)
PRINT	«PRINT»	• Inputs a point (in text entry)

Figura 130: Descripción funcionamiento de la balanza digital de laboratorio (PRECISA, 2016)