



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

ESTUDIO Y MODELACIÓN DEL BIOSECADO DE LODOS, PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS, EN UNA PLANTA PILOTO DE SECADO EN INVERNADERO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

HUGO ESTEBAN ALARCÓN TRONCOSO

PROFESOR GUÍA:

FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JOSE CRISTIAN SALGADO HERRERA

BORIS TRUMPER SILBERMAN

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Aguas Andinas S.A.

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil Químico
POR: Hugo Alarcón Troncoso
FECHA: Junio, 2018
PROFESOR GUÍA: Felipe Díaz Alvarado

ESTUDIO Y MODELACIÓN DEL BIOSECADO DE LODOS, PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS, EN UNA PLANTA PILOTO DE SECADO EN INVERNADERO

El consumo de agua potable por parte de la población produce aguas servidas, conformadas principalmente de agua y materia orgánica. En el tratamiento de éstas se producen lodos que deben estabilizarse para su reutilización. Aguas Andinas, proveedor de agua de la región metropolitana, creó en 2009 el Centro de Gestión Integral de Biosólidos CGIB, para estabilizar lodos mediante la disminución de humedad como lo estipula el Decreto 4 de 2009.

Se modeló el secado biológico dentro de un invernadero piloto en el CGIB. Para ello, en primera instancia se realizaron pruebas experimentales por 5 meses entre mayo y septiembre.

Asumiendo actividad biológica constante, geometría cilíndrica y propiedades físicas constantes en el tiempo y utilizando los datos de una pila se determinaron valores para la difusión de agua en el biosólido, coeficiente de transferencia de masa y el coeficiente de transferencia de calor por convección. Con los parámetros encontrados se realizó la simulación del resto de las pilas estudiadas, lográndose una simulación cercana a los datos experimentales.

Durante el periodo experimental se suspendió una pila por irregularidades en el volteo. Se simuló una pila sin volteo y se comprobó que la ausencia de este procedimiento deriva en una menor transferencia de masa y, por ende, en un mayor tiempo de secado requerido.

El modelo realizado puede integrar nuevos módulos con el fin de realizar una simulación que se ajuste aún más, para ello se recomienda realizar un análisis biológico, que permita conocer de forma exacta la energía producida por periodos. Esto permitiría que el modelo describiera de mejor manera el secado para el corto plazo desde iniciado el proceso.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1.	Ciclo urbano del agua	1
1.2.	Tratamiento de aguas servidas	1
1.3.	Manejo de lodos provenientes de aguas servidas	2
1.4.	Aguas Andinas	3
1.5.	Centro de gestión integral de biosólidos	3
1.5.1.	Humedad objetivo.....	3
1.5.2.	Tipos de operaciones de secado	3
1.6.	Descripción del proyecto	5
1.7.	Objetivos	7
1.7.1.	Objetivo general.....	7
1.7.2.	Objetivos específicos.....	7
1.8.	Alcances.....	7
2.	Marco teórico	9
2.1.	Transferencia de calor.....	9
2.2.	Secado de sólidos.....	10
2.3.	Biosecado de sólidos	12
2.4.	Biosecado en invernadero.....	13
2.5.	Balance de masa	14
2.5.1.	Balance de masa en la pila.....	14
2.5.2.	Balance de masa en el invernadero	15
2.6.	Balance de energía	16
2.6.1.	Balance de energía en la pila	16
2.6.2.	Balance de energía en el invernadero	17

2.7.	Método de diferencias finitas.....	18
3.	Operación del biosecado.....	19
3.1.	Metodología de realización del secado en pila.....	19
3.2.	Metodología de medición	20
3.3.	Resultados experimentales	23
4.	Construcción del modelo.....	26
4.1.	Variables y parámetros	26
4.2.	Pila	33
4.2.1.	Transferencia de masa	33
4.2.2.	Transferencia de calor	33
4.3.	Invernadero	33
4.3.1.	Balance de agua en el invernadero	33
4.3.2.	Balance de energía en el invernadero	34
5.	Resultados de la modelación	35
6.	Discusiones.....	41
7.	Recomendaciones	43
8.	Conclusiones.....	44
9.	Bibliografía	45
10.	Anexos	48
10.1.	Anexo 1: Resultados mediciones experimentales.....	48
10.2.	Anexo 2: Resultados mediciones de sensores	55
10.3.	Anexo 3: Proporción de humedad en aire seco, X	76
10.4.	Anexo 4: Calor específico de la pila, c_{pp}	78
10.5.	Anexo 5: Diferencias finitas: Concentración en la pila	78
10.6.	Anexo 6: Diferencias finitas: Temperatura de la pila	79

10.7.	Anexo 7: Balance de agua en el invernadero	80
10.8.	Anexo 8: Balance de energía en el invernadero	82
10.9.	Anexo 9: Planilla excel.....	83
10.9.1.	Hoja Operación	83
10.9.2.	Parámetros.....	84
10.9.3.	Sequedad de la pila.....	85
10.9.4.	Temperatura de la pila.....	86
10.9.5.	Solver	87
10.9.6.	Humedad relativa y temperatura	88
10.9.7.	Datos meteorológicos.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Mezcla de biosólido	19
Tabla 2: Sensores en el invernadero.....	22
Tabla 3: Resumen de resultados experimentales	23
Tabla 4: Resumen emisiones pila 1	25
Tabla 5: Dimensiones del invernadero piloto.....	27
Tabla 6: Dimensiones consideradas para la pila en invernadero	28
Tabla 7: Coeficiente global de transferencia del policarbonato alveolar [28].....	28
Tabla 8: Generación de energía por la degradación de sólido	31
Tabla 9: Parámetros flujo de energía por radiación [18] [28].....	31
Tabla 10: Parámetros ajustados mediante modelo	35
Tabla 11: Resultados para pila 1	35
Tabla 12: Resultados para pila 2.....	37
Tabla 13: Sequedad al cabo de 21 días, diferente HR	40
Tabla 14: Mediciones pila 1	48
Tabla 15: Mediciones pila 2.....	50
Tabla 16: Mediciones pila 3.....	52
Tabla 17: Mediciones pila 4.....	53
Tabla 18: Coeficientes para el cálculo de la presión de saturación.....	77
Tabla 19: Hoja Operación.....	83
Tabla 20: Hoja: Parámetros.....	84
Tabla 21: Hoja: Seq (pila).....	85
Tabla 22: Hoja: Tem (Pila).....	86
Tabla 23: Hoja, Solver.....	87
Tabla 24: Hoja: HR y T (Inv).....	88

Tabla 25: Hoja: Meteo 89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama del proceso de tratamiento de aguas servidas	2
Figura 2: Volteo de lodo: a) secado solar, b) biosecado	5
Figura 3: Disposición para el secado solar.....	5
Figura 4: Localidades cercanas al CGIB	6
Figura 5: Velocidad de secado en el tiempo, Traducido de [13].....	11
Figura 6: Curva típica de secado [14].....	12
Figura 7: Volumen de control, en gris, del balance de masa: A) Invernadero, B) Pila	14
Figura 8: Flujos de masa en la pila.....	15
Figura 9: Flujos BM Invernadero	16
Figura 10: Flujos BE Invernadero.....	18
Figura 11: Volteadora Backus 21.50	20
Figura 12: Pila fuera del invernadero tapada.....	20
Figura 13: Pila 1, Medición de temperatura en invernadero y exterior	24
Figura 14: Pila 1, Medición humedad relativa en invernadero.....	25
Figura 15: Estructura del invernadero piloto.....	26
Figura 16: Pila de lodo en invernadero durante volteo	27
Figura 17: Perfil del policarbonato alveolar	28
Figura 18: Modelación Pila 1	36
Figura 19: Modelación pila 2	37
Figura 20: Sequedad calculada, pila 2	38
Figura 21: Simulación sin volteo, primeros 5 días	39
Figura 22: Pila 1: Temperatura en el tiempo	49
Figura 23: Pila 1, Sequedad en el tiempo	49

Figura 24: Pila 2, Temperatura en el tiempo	50
Figura 25: Pila 2, Sequedad en el tiempo	51
Figura 26: Pila 3, Temperatura en el tiempo	52
Figura 27: Pila 3, Sequedad en el tiempo	53
Figura 28: Pila 4, temperatura en el tiempo.....	54
Figura 29: Pila 4, Sequedad en el tiempo	54
Figura 30: Pila 1, Medición COV invernadero	55
Figura 31: Pila 1, Medición COV flujo de salida	55
Figura 32: Pila 1, Medición H2S invernadero	56
Figura 33: Pila 1, Medición H2S Flujo de salida.....	56
Figura 34: Pila 1, medición NH3 flujo de salida	57
Figura 35: Pila 1, Medición humedad relativa 1, en invernadero.....	57
Figura 36: Pila 1, Medición humedad relativa 2, en invernadero.....	58
Figura 37: Pila 1, Medición humedad relativa en flujo de salida.....	58
Figura 38: Pila 1, Medición de temperatura 1, en invernadero	59
Figura 39: Pila 1, Medición de temperatura 2, en invernadero	59
Figura 40: Pila 1, Medición de temperatura en flujo de salida	60
Figura 41: Pila 2, Medición COV invernadero	60
Figura 42: Pila 2, Medición COV flujo de salida	61
Figura 43: Pila 2, Medición H2S invernadero	61
Figura 44: Pila 2, Medición H2S Flujo de salida.....	62
Figura 45: Pila 2, medición NH3 flujo de salida	62
Figura 46: Pila 2, Medición humedad relativa 1, en invernadero.....	63
Figura 47: Pila 2, Medición humedad relativa 2, en invernadero.....	63
Figura 48: Pila 2, Medición humedad relativa en flujo de salida.....	64

Figura 49: Pila 2, Medición de temperatura 1, en invernadero	64
Figura 50: Pila 2, Medición de temperatura 2, en invernadero	65
Figura 51: Pila 2, Medición de temperatura en flujo de salida	65
Figura 52: Pila 3, Medición COV invernadero	66
Figura 53: Pila 3, Medición COV flujo de salida	66
Figura 54: Pila 3, Medición H ₂ S invernadero	67
Figura 55: Pila 3, Medición H ₂ S Flujo de salida	67
Figura 56: Pila 3, medición NH ₃ flujo de salida	68
Figura 57: Pila 3, Medición humedad relativa 1, en invernadero.....	68
Figura 58: Pila 3, Medición humedad relativa 2, en invernadero.....	69
Figura 59: Pila 3, Medición humedad relativa en flujo de salida.....	69
Figura 60: Pila 3, Medición de temperatura 1, en invernadero	70
Figura 61: Pila 3, Medición de temperatura 2, en invernadero	70
Figura 62: Pila 3, Medición de temperatura en flujo de salida	71
Figura 63: Pila 4, Medición COV invernadero	71
Figura 64: Pila 4, Medición COV flujo de salida	72
Figura 65: Pila 4, Medición H ₂ S invernadero	72
Figura 66: Pila 4, Medición H ₂ S Flujo de salida	73
Figura 67: Pila 4, medición NH ₃ flujo de salida	73
Figura 68: Pila 4, Medición humedad relativa 1, en invernadero.....	74
Figura 69: Pila 4, Medición humedad relativa 2, en invernadero.....	74
Figura 70: Pila 4, Medición humedad relativa en flujo de salida.....	75
Figura 71: Pila 4, Medición de temperatura 1, en invernadero	75
Figura 72: Pila 4, Medición de temperatura 2, en invernadero	76
Figura 73: Pila 4, Medición de temperatura en flujo de salida	76

Nomenclatura

Símbolo	Concepto	Unidad
A	Área	$[m^2]$
\mathcal{A}	Coefficiente de ecuación	$[-]$
B	Coefficiente de ecuación	$[-]$
C	Concentración de agua	$[kg/m^3]$
\mathcal{C}	Coefficiente de ecuación	$[-]$
c_p	Calor específico	$[J/(kg \cdot K)]$
D	Coefficiente de difusión	$[m^2/s]$
F	Flujo másico de entrada	$[kg/s]$
F_v	Flujo volumétrico de entrada	$[m^3/s]$
F_{evap}	Flujo de agua transferida desde la pila	$[kg/s]$
H	Entalpía másica de entrada	$[J/kg]$
H_H	Humedad en base húmeda	$[-]$
HR	Humedad relativa	$[-]$
h	Coef. transferencia de calor por convección	$[W/(K \cdot m^2)]$
I	Intensidad de radiación solar	$[W/m^2]$
J	Flujo de transferencia de	$[kg/(m^2 \cdot s)]$
K	Coefficiente de transferencia de masa	$[m/s]$
k	Conductividad térmica	$[W/(K \cdot m)]$
MM	Masa molar	$[kg/mol]$
m	Masa del aire dentro del invernadero	$[kg]$
P	Presión	$[Pa]$
P_{sat}	Presión de saturación	$[Pa]$

\dot{q}	Flujo de calor	[W]
r	Radio en coordenadas cilíndricas	[m]
R	Radio de la pila	[m]
S	Sequedad en base húmeda	[-]
T	Temperatura	[K]
t	Tiempo	[s]
U	Coefficiente global de transferencia de calor	[W/(m ² · K)]
V	Volumen	[m ³]
X	Relación entre la masa de agua y aire seco	[kg _w /kg _{aa}]
γ	Porcentaje radiación retenida en invernadero	[-]
$\Delta(_)$	Diferencia entre dos puntos de (_)	[-]
ρ	Densidad	[kg/m ³]
τ	Transparencia del policarbonato	[-]
$\nabla^2(_)$	Laplaciano de (_)	[-]

SUBÍNDICES ADICIONALES:

Símbolo Concepto

<i>Cond</i>	Conducción
<i>Conv</i>	Convección
<i>i</i>	Invernadero
<i>e</i>	Entrada
<i>s</i>	Salida
<i>rad</i>	Radiación
<i>a</i>	Aire húmedo

<i>da</i>	Aire seco
<i>gen</i>	Generación
<i>w</i>	Agua
<i>p</i>	Pila
<i>bh</i>	Biosólido húmedo
<i>bs</i>	Biosólido seco
<i>es</i>	Estructurante
<i>PC</i>	Polycarbonato

1. INTRODUCCIÓN

Diariamente se consumen alrededor de 150 litros de agua por habitante en las comunas abastecidas por la empresa Aguas Andinas [1]. Para su consumo y posterior reinserción al medio ambiente se requiere de múltiples procesos de separación y desinfección además de instalaciones para su distribución y colección.

1.1. CICLO URBANO DEL AGUA

El ciclo urbano del agua es un proceso por medio del cual se satisfacen las necesidades hídricas de la población, minimizando el impacto en el medio ambiente. Consta de las siguientes etapas:

1. Captación del agua desde fuentes naturales
2. Producción de agua potable
3. Distribución del agua entre los consumidores
4. Consumo y utilización de agua
5. Recolección del agua utilizada, llamada 'agua servida'
6. Tratamiento de aguas servidas
7. Restauración al ambiente

1.2. TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

Se llama agua servidas al fluido captado por las redes de alcantarillados correspondiente al agua utilizada por los consumidores mezclada a materia orgánica. Las aguas servidas albergan una amplia gama de microorganismos que degradan aeróbicamente la materia orgánica [2]. Producto del alto contenido de virus y bacterias es necesario tratar las aguas servidas para disminuir su carga biológica, para evitar la contaminación de los cauces de aguas naturales. Por otro lado, el agua tratada puede utilizarse para regadío, razón por la cual el tratamiento incluye etapas de eliminación de vida bacteriana.

En la Figura 1 se presenta un diagrama resumen del proceso de tratamiento de aguas servidas. Para tratar el agua servida se comienza con un tratamiento preliminar en el cual se extraen los sólidos de gran tamaño, así como también grasas y aceites. El agua luego se dirige al tratamiento primario en el cual se extraen los sólidos en suspensión mediante su sedimentación. El agua, ya clarificada, se dirige al tratamiento secundario donde se

extraen los sólidos no sedimentados previamente mediante el uso de filtros. Finalmente, el agua libre de sólidos se desinfecta y se devuelve a cauces naturales [3].

Los lodos generados en el tratamiento primario se digieren para producir biogás. La porción no digerida de sólidos se espesa y se secan para disponer de ellos en un relleno sanitario, monorelleno o para su utilización como relleno de suelos o fertilizante.

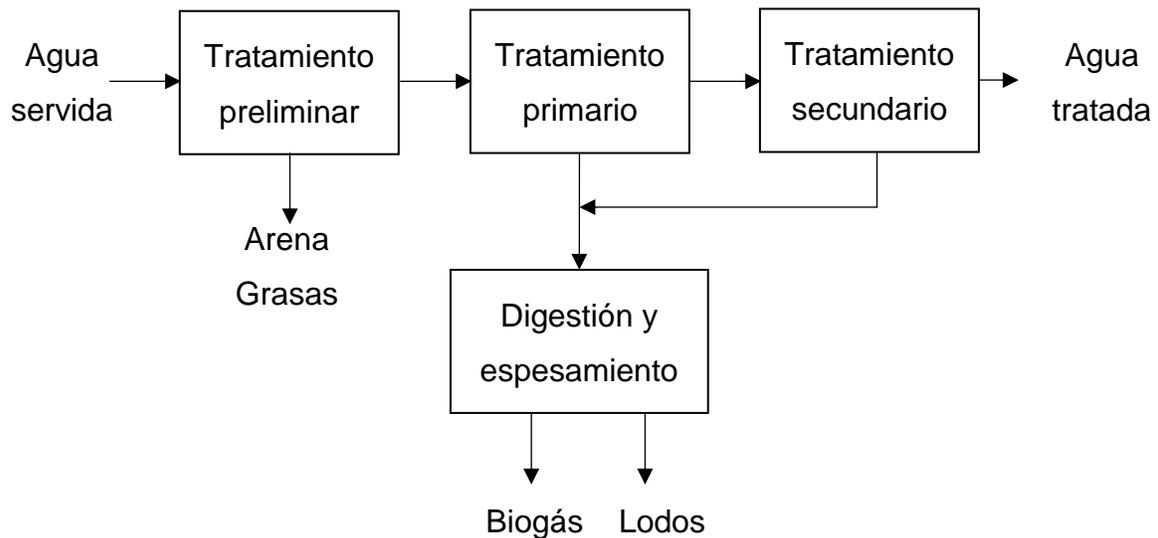


FIGURA 1: DIAGRAMA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

1.3. MANEJO DE LODOS PROVENIENTES DE AGUAS SERVIDAS

Los lodos provenientes del proceso de digestión presentan alta carga biológica por lo que su disposición directa presenta un riesgo biológico, tanto para el suelo, como para las personas, pudiendo ser fuente de enfermedades como el tifus, tétanos, hepatitis, entre otras [4] [5]. La disposición de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas está regulada por ley y debe obedecer la normativa expuesta en el Decreto 4 del 2009 [6].

El Decreto 4 de 2009 de la Secretaría General de la Presidencia, establece que para la disposición o utilización de lodos estos deben estar estabilizados. Se plantean múltiples formas de estabilización, entre las cuales se encuentra la estabilización mediante la disminución de humedad [6]. Para este propósito se debe realizar una operación de secado en la cual el lodo, luego de ser procesado, alcance la humedad requerida.

1.4. AGUAS ANDINAS

Aguas Andinas es una empresa dedicada a la captación, potabilización, distribución, recaptación y tratamiento de aguas, incluyendo todo el ciclo urbano del agua en sus procesos. Abastece a gran parte de los consumidores de la región Metropolitana [1]. Para el tratamiento de agua servidas, la empresa cuenta con 2 plantas de tratamiento de gran capacidad además de 13 plantas en localidades periféricas que, a pesar de devolver el agua tratada en óptimas condiciones al ambiente, generan altas cantidades de lodo, llegando a una producción 321903 toneladas de lodos el año 2015 [7].

1.5. CENTRO DE GESTIÓN INTEGRAL DE BIOSÓLIDOS

Para la estabilización del lodo generado, Aguas Andinas creó, en el año 2009, el Centro de Gestión Integral de Biosólidos (CGIB) en el fundo 'El Rutal', ubicado en el km. 59 de la ruta 5N, en las cercanías de las localidades de Montenegro y Runge.

El CGIB contempla varias etapas. De acuerdo con la proyección final, el centro llegará a tener 781.000 metros cuadrados de superficie, de los cuales el 34% se emplearía para el secado del biosólido y 51% para monorellenos de biosólido para su disposición final, tratando 1.000 toneladas por día [8].

1.5.1. HUMEDAD OBJETIVO

La resolución sanitaria realizada el 2009 indica que el lodo debe ser llevado a un 40% de humedad en peso para su estabilización, para su reutilización silvoagrícola, pasivos ambientales y áreas verdes o para su disposición final en relleno sanitario externo o en el mono relleno del CGIB [8].

1.5.2. TIPOS DE OPERACIONES DE SECADO

A lo largo del año se llevan a cabo dos tipos de operaciones para el secado del biosólido: secado solar y biosecado.

SECADO SOLAR

En el secado solar el biosólido se dispone en las canchas de secado en una capa de aproximadamente 50 centímetros de altura, que puede abarcar un área de 35 metros de ancho y 150 de largo.

El biosólido se seca producto del contacto con el ambiente. Para ello es transferencia de masa desde el lodo al ambiente, la cual se ve afectada por las condiciones meteorológicas. Por otro lado, la energía necesaria para la evaporación del agua se obtiene a través de la radiación solar. Por lo anterior, la eficiencia del secado solar se ve afectada por las condiciones meteorológicas: radiación, humedad relativa, viento, temperatura, entre otras.

Se realizan operaciones de secado solar desde septiembre a abril. Se homogeneiza periódicamente mediante el paso de una volteadora, Figura 2.

BIOSECADO

En el biosecado el biosólido se dispone en pilas. Cada pila posee alrededor de 5 metros de ancho de base, 1,5 metros de altura y un largo que depende del tamaño de la cancha de secado.

El biosecado aprovecha la energía producida por la digestión de la materia orgánica, se utiliza desde mayo a agosto, pudiéndose extender hasta septiembre bajo condiciones meteorológicas favorables. Se emplea este método debido a la baja temperatura ambiental y las altas humedades. Desde un punto operacional también presenta ventaja en caso de lluvia, ya que de haber precipitaciones cada pila se recubre con un material impermeable para evitar que aumente su humedad, lo que no se puede realizar en el secado solar producto de la amplia área que utiliza, Figura 3. Al igual que en el secado solar, la pila se homogeneiza mediante el paso de una volteadora como se aprecia en la Figura 2.



FIGURA 2: VOLTEO DE LODO: A) SECADO SOLAR, B) BIOSECADO



FIGURA 3: DISPOSICIÓN PARA EL SECADO SOLAR

1.6. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Durante el periodo de otoño invierno, mientras se realiza el biosecado, y producto de éste, aumenta la emisión de malos olores del CGIB. Producto de lo anterior los habitantes de las comunidades de Rungue y Montenegro, Figura 4, perciben el mal olor causando un perjuicio en la salud de las personas. Por otro lado, durante días de precipitaciones se detiene el proceso de secado producto del uso de la cubierta impermeable en las pilas,

que impide la transferencia de agua desde el biosólido al ambiente. Al descubrirse las pilas, es necesario realizar el volteo de estas para su homogeneización, al realizarse múltiples volteos en un corto periodo de tiempo las emisiones aumentan y con ello el malestar de los habitantes de las comunidades aledañas.

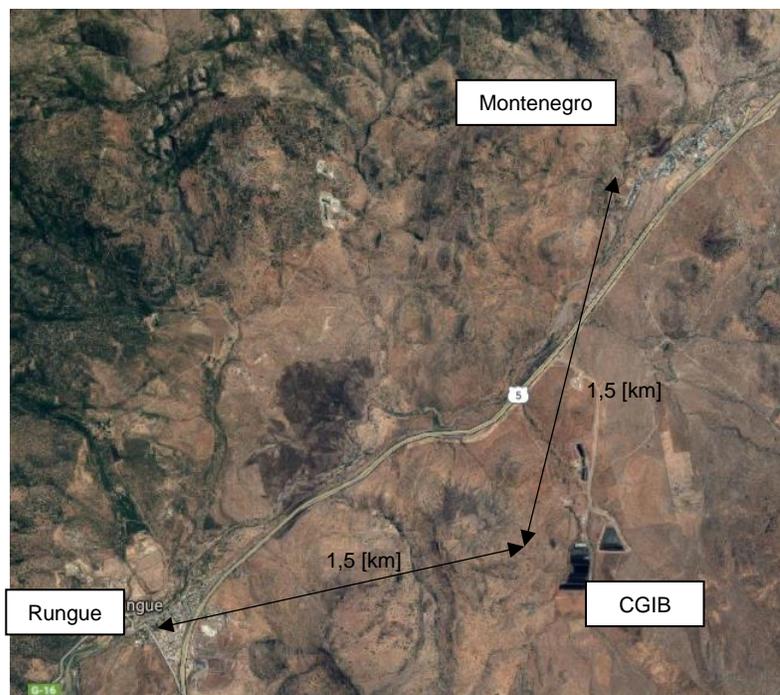


FIGURA 4: LOCALIDADES CERCANAS AL CGIB

Como una posible solución para los problemas expuestos, en 2016 se construyó un invernadero piloto para realizar el biosecado dentro de este, bajo la hipótesis de que realizar el proceso en un ambiente confinado permitiría la recolección de todas las emisiones de la pila para luego realizar su dispersión mediante una chimenea, evitando la dispersión de olores a baja altura. Esta hipótesis fue confirmada por parte de la empresa, mediante mediciones de olor por parte de personal calificado [9] [10]. Por otra parte, se plantea la hipótesis de que el invernadero aumenta la eficiencia del proceso en comparación al exterior, al proporcionar un ambiente con ventilación, agitación constante, mayor temperatura y sin precipitaciones.

herramienta para un futuro escalamiento del invernadero en el Centro de Gestión Integral de Biosólidos de Aguas Andinas.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los aspectos más relevantes para el desarrollo del trabajo de memoria. Enfocándose en el proceso de secado y la transferencia de masa y calor que se dan durante la operación.

2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de energía en forma de calor entre dos cuerpos se produce por una diferencia de temperaturas entre estos y se puede realizar mediante tres mecanismos [11]:

CONDUCCIÓN

Transferencia de calor por interacción molecular. Está definido por la siguiente ecuación [11]:

$$\dot{q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde A es el área normal a la dirección del flujo \dot{q}_{cond} , T es la temperatura y x la coordenada espacial. El coeficiente k es la conductividad térmica y depende del material por el que fluye la energía.

CONVECCIÓN

Transferencia de calor por medio de la acción de un fluido. Está definido por la siguiente ecuación [11]:

$$\dot{q}_{conv} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura entre la superficie del sólido que está en contacto con el fluido. El coeficiente h es el coeficiente de transferencia de calor por convección y depende tanto de las propiedades del fluido como de la geometría de los cuerpos en contacto.

RADIACIÓN

La radiación es un fenómeno de transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas, por lo que no requiere de medio material para su transmisión.

En el presente trabajo se considerarán flujos de energía por conducción, convección y radiación solar.

2.2. SECADO DE SÓLIDOS

El secado es una operación en la que se evaporan sustancias volátiles desde un material para obtener un sólido seco [12]. Se rige por medio la transferencia de la sustancia volátil desde el material a secar hacia el ambiente, para la evaporación es necesario calor, por lo cual el proceso se acopla a una transferencia de calor entre el material a secar y el medio que lo rodea. Los requerimientos energéticos dependen del tipo de material a secar y la sustancia volátil a evaporar. En el caso del agua, su alto calor latente de vaporización deriva en un alto requerimiento energético para removerla desde un sólido [12].

La remoción de agua se lleva a cabo a través de dos procesos simultáneos [13].

1. Difusión del agua desde el seno del sólido hasta la superficie.
2. Transferencia por convección desde la superficie del sólido al ambiente.

La difusión de agua en el sólido está definida por la segunda Ley de Fick [14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \mathcal{D}\nabla^2 C \quad (3)$$

Donde C , representa la concentración de agua en el sólido, la cual depende de la interacción entre el fluido y el sólido que lo soporta, mediante el coeficiente de difusión \mathcal{D} .

Por otro lado, la transferencia por convección de un *flux* J en la superficie está definida por la diferencia de concentración entre la pila y el ambiente:

$$J = K(C_{sólido} - C_{ambiente}) \quad (4)$$

Dependiendo de las condiciones externas como humedad, temperatura, presión, flujo de aire, entre otras, mediante el coeficiente de transferencia de masa por convección K y la concentración ambiente.

Para condiciones constantes de secado los procesos simultáneos derivan en la segmentación del proceso de secado en tres etapas [13]:

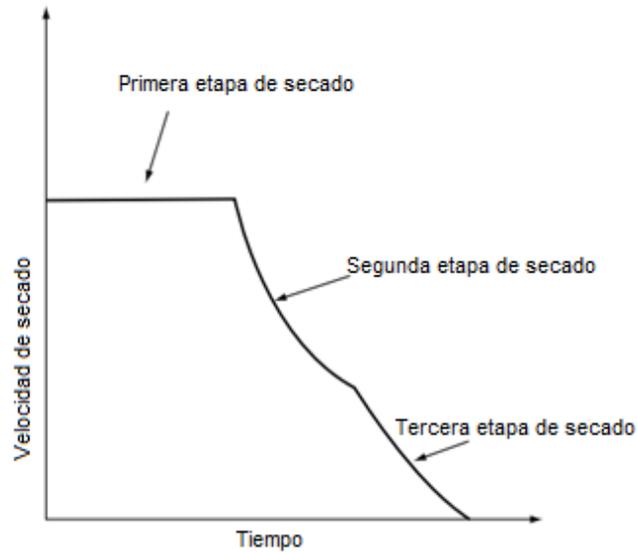


FIGURA 5: VELOCIDAD DE SECADO EN EL TIEMPO, TRADUCIDO DE [13]

Durante la primera etapa se mantiene una velocidad constante de secado, debido a que la humedad está uniformemente distribuida, una vez comienza a secarse la superficie del sólido se pasa a la segunda etapa del secado, en la cual la velocidad de secado va disminuyendo paulatinamente debido a la presencia de lugares secos en la superficie, disminuyendo el área de transferencia. Finalmente, en la tercera etapa la velocidad continúa disminuyendo, pero la superficie del sólido ya se encuentra casi completamente seca [13].

Lo anterior, se aprecia también en la Figura 6, donde a partir de un punto A se llega a estado estacionario al llegar a B, donde comienza la primera etapa de secado con una velocidad constante de remoción de humedad, para luego descender desde el punto C en la segunda etapa de secado. La tercera etapa comienza en el punto D hasta llegar al punto E donde la velocidad de secado es nula.

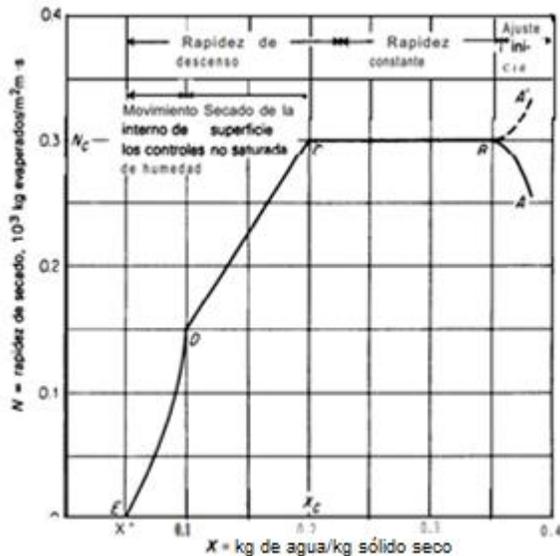


FIGURA 6: CURVA TÍPICA DE SECADO [14]

2.3. BIOSECADO DE SÓLIDOS

Existem diversas formas de processar o lodo gerado no tratamento de águas e existe um interesse crescente em desenvolver novas tecnologias que permitam diminuir os custos associados ao seu manejo e disposição, já que o custo associado a essas tarefas pode ascender até 50% do custo de operação de uma planta de tratamento [15].

Entre as técnicas para dispor dos lodos destaca o secado por ação do calor gerado pela digestão bacteriana da matéria orgânica presente no lodo. A cinética de degradação da matéria orgânica é complexa devido à ampla gama de bactérias alojadas no fluido, as quais, além disso, podem variar dependendo do origem das águas servidas [16].

Durante o processo de biosecado se identificam três etapas [16]:

1. Etapa mesofílica
2. Etapa termofílica
3. Etapa de resfriamento

Em cada etapa predomina a ação bacteriana de diferentes microrganismos, dependendo da afinidade que possuam com a temperatura do sólido. Durante a primeira etapa predominam bactérias aeróbicas do gênero *Acinetobacter*, *Tepidimicrobium* e *Comamonas* que podem reduzir nitratos, degradar lignina, diesel e

otros compuestos orgánicos complejos [16]. Durante la etapa termofílica bacterias aeróbicas del género *Acinetobacter*, *Bacillus* y *Pseudomonas* predominan y pueden degradar lignina, diesel, proteínas, almidón, entre otros compuestos orgánicos [16].

En un ciclo sin intervención de biosecado la mayor velocidad de evaporación de agua se alcanza durante la etapa termofílica donde la temperatura del sólido puede llegar a los 70[°C] [16]. Esta etapa se puede mantener en el tiempo evitando la etapa de enfriamiento, para ello el sólido puede homogeneizar mediante un 'volteo', esto permite sostener una alta velocidad de secado en el tiempo proporcionando condiciones constantes para la mantención de la vida bacteriana predominante de la etapa, incluyendo la oxigenación del sólido para la degradación aeróbica por medio de las bacterias [17].

Por otro lado, el volteo también permite mantener la primera etapa del secado, mencionada anteriormente junto a la Figura 5, evitando las etapas posteriores manteniendo la superficie del sólido húmeda y junto a ello maximizando la diferencia de concentración de agua entre el sólido y el ambiente que lo rodea lo que deriva en una máxima transferencia de masa de acuerdo a la Ecuación (4).

2.4. BIOSECADO EN INVERNADERO

Los invernaderos tienen vasto uso en la agricultura para mantener condiciones óptimas para el crecimiento y mantención de plantas. Adicional a esto permiten mantener un ambiente controlado protegiendo el interior de viento, lluvia, nieve, entre otros factores ambientales [18].

Las condiciones de humedad y temperatura dentro de un invernadero dependen de múltiples factores externos, como la humedad, temperatura ambiental, la velocidad del viento y la radiación solar, así como también de factores internos tales como material de construcción del invernadero, ventilación, agitación, generación o consumo de energía [18] [19] [20] [21]. Por esta razón las condiciones para el secado dentro de un invernadero no siempre permanecen constantes y, por ende, el comportamiento la velocidad de secado no presenta un comportamiento como el presentado en las Figura 5 y Figura 6.

Para evitar lo anterior, es posible controlar las variables del invernadero mediante la adecuada instrumentación: extractores de aire, intercambiadores de calor, ventiladores,

etc. [21], sin embargo, un mayor control de estas variables representa un mayor costo de inversión y operación.

2.5. BALANCE DE MASA

A continuación, se presenta los balances realizados. El sistema se dividirá en dos partes: la pila y el invernadero, ambos subsistemas interactúan mediante la frontera que los divide, intercambiando masa y energía entre sí. En la Figura 7 se presenta el volumen de control de cada subsistema.

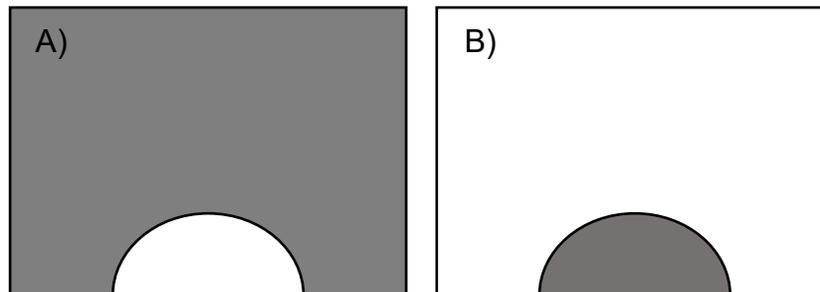


FIGURA 7: VOLUMEN DE CONTROL, EN GRIS, DEL BALANCE DE MASA: A) INVERNADERO, B) PILA

2.5.1. BALANCE DE MASA EN LA PILA

A partir de la ley de Fick y las condiciones de transferencia de masa en la superficie de la pila expuestas en las Ecuaciones (3) y (4), se puede determinar que la ecuación que define la transferencia de masa en la pila es [12]:

$$\frac{\partial C(r, t)}{\partial t} = D\nabla^2 C(r, t) \quad 0 < r < R ; \quad t > 0 \quad (5)$$

Donde $C(r, t)$ representa la concentración de agua a un radio r del centro en un tiempo t .

Con la condición inicial de que la concentración inicial, C_0 , es uniforme en todo el lodo y está dada por la humedad con la que comienza el secado:

$$C(r, 0) = C_0 \quad \forall r \quad (6)$$

Y las condiciones de borde, que representa la transferencia de masa por convección en la superficie de la pila:

$$-D \frac{\partial C}{\partial t} \Big|_{r=R} = K(C_i(t) - C(R, t)) \quad (7)$$

Donde C_i representa la concentración de agua dentro del invernadero

$$-D \frac{\partial C}{\partial t} \Big|_{r=0} = 0 \quad (8)$$

En la Figura 8 se presentan los flujos anteriormente descritos:

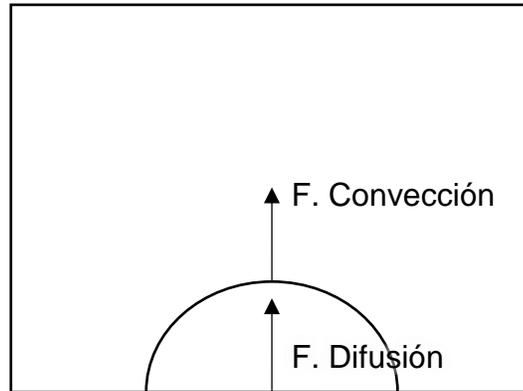


FIGURA 8: FLUJOS DE MASA EN LA PILA

2.5.2. BALANCE DE MASA EN EL INVERNADERO

El foco de atención en el proceso de secado es la extracción del agua desde el sólido al ambiente, dado que la velocidad de secado depende de la concentración de agua dentro del invernadero se realizará el balance de masa dentro de este. Para este balance se considerará el volumen de aire comprendido entre las paredes internas del invernadero y la superficie superior de la pila.

$$Acumulación = Entrada - Salida + Generación - Consumo \quad (9)$$

Con

$$Acumulación = V_i \frac{dC_i}{dt} \quad (10)$$

$$Entrada = F_{v,e} \cdot C_e \quad (11)$$

$$Salida = F_{v,s} \cdot C_s \quad (12)$$

$$\text{Generación} = F_{evap} \quad (13)$$

$$\text{Consumo} = 0 \quad (14)$$

La acumulación está dada por el volumen del invernadero, V_i , ponderado por la variación de la concentración de agua al interior del invernadero, C_i , respecto al tiempo.

La entrada está dada por la cantidad de aire que ingrese desde el ambiente exterior al invernadero (flujo volumétrico F_v), así como también por su humedad relativa y temperatura, que definen la concentración de agua presente en dicho flujo, C_e . La salida depende de las condiciones dentro del invernadero que repercuten sobre la concentración de agua dentro de este, C_s , y del flujo de extracción de aire desde dentro del invernadero, $F_{v,s}$. La generación está dada por el flujo de agua evaporada desde la pila al ambiente al interior del invernadero, F_{evap} . Por último, no existe un consumo de agua dentro del invernadero durante la operación del biosecado. Los flujos se esquematizan en la Figura 9:

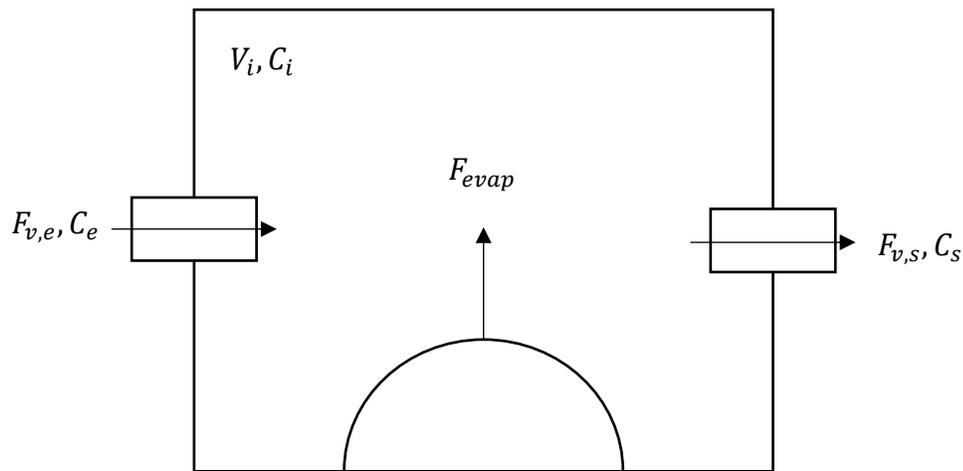


FIGURA 9: FLUJOS BM INVERNADERO

2.6. BALANCE DE ENERGÍA

2.6.1. BALANCE DE ENERGÍA EN LA PILA

A continuación, se presenta la ecuación de transferencia de calor para un sólido con generación [22]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\dot{q}_{gen}}{\rho \cdot c_p} + \frac{k}{\rho \cdot c_p} \cdot \nabla^2 T \quad (15)$$

Donde T representa la temperatura, \dot{q}_{gen} el calor generado por las bacterias, ρ la densidad del biosólido, c_p el calor específico del biosólido y k su conductividad.

Con la siguiente condición inicial que indica que la temperatura inicial es uniforme y está dada por la temperatura de la mezcla de lodo a secar:

$$T(r, 0) = T_0 \quad \forall r \quad (16)$$

Y las condiciones de borde, dada por la convección en la capa exterior de la pila

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{r=R} = h(T_i(t) - T(R, t)) \quad (17)$$

Donde T_i representa la temperatura dentro del invernadero

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{r=0} = 0 \quad (18)$$

2.6.2. BALANCE DE ENERGÍA EN EL INVERNADERO

El balance de energía dentro del invernadero está dado por

$$Acumulación = Entrada - Salida + Generación - Consumo \quad (19)$$

Con

$$Acumulación = m_i \cdot c_p \cdot \frac{dT_i}{dt} \quad (20)$$

$$Entrada = F_e \cdot H_e + F_{evap} \cdot H_{evap} + \dot{q}_{rad} \quad (21)$$

$$Salida = F_s \cdot H_s + \dot{q}_{pérdidas} \quad (22)$$

$$Generación - Consumo = \dot{q}_{pila} \quad (23)$$

La acumulación de energía está dada por la energía empleada para producir cambios en la masa de aire dentro del invernadero.

La entrada corresponde a los flujos de aire húmedo, desde el exterior del invernadero, y saturado, correspondiente a la evaporación de agua desde la pila, cada uno ponderado por la entalpía asociada, H . Existe otra entrada de energía correspondiente a la ganancia de calor a partir de la radiación solar, \dot{q}_{rad} . La salida está dada por la entalpía del flujo de

salida y las pérdidas de calor desde el invernadero al exterior. Se considerará como generación y consumo de calor al calor transferido desde la pila al ambiente del invernadero, o viceversa dependiendo de las temperaturas en el invernadero y la pila. Los flujos se esquematizan en la Figura 10.

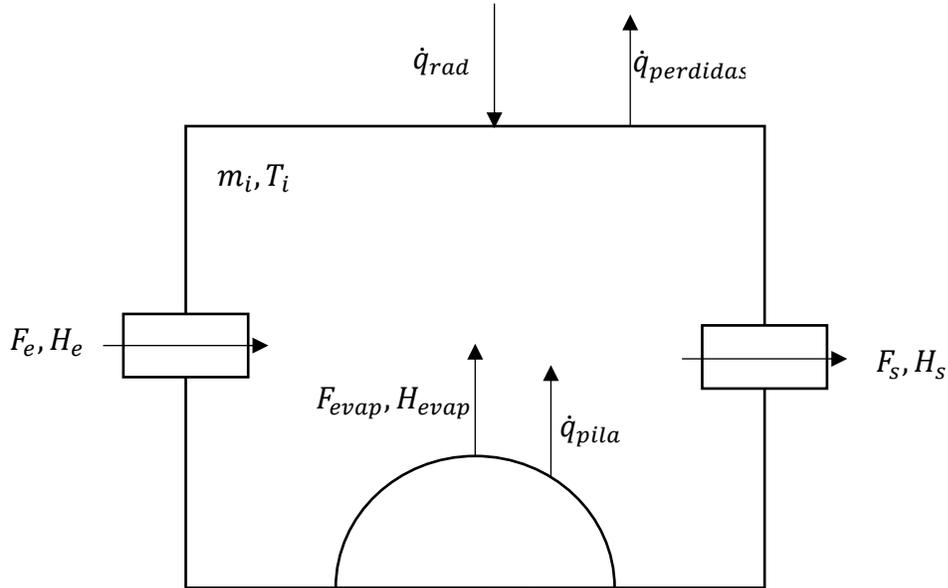


FIGURA 10: FLUJOS BE INVERNADERO

2.7. MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

El método de diferencias finitas es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales [23] [24]. Las expresiones para la resolución están dadas por las siguientes ecuaciones [23] [24]:

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \sim \frac{f(x + \Delta x, t) - f(x, t)}{\Delta x} \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \sim \frac{f(x + \Delta x, t) - 2 \cdot f(x, t) + f(x - \Delta x, t)}{\Delta x^2} \quad (25)$$

3. OPERACIÓN DEL BIOSECADO

Para la obtención de datos experimentales se realizaron pruebas en el invernadero piloto levantando una pila de biosólido dentro de éste, idéntica en composición a las pilas usadas en la operación del CGIB. Se realizaron mediciones de las variables de interés durante el periodo de operación que comprendió entre mayo de 2017 y septiembre de 2017. La obtención de estos datos permitirá realizar un modelo del secado de sólidos, utilizándose para realizar un ajuste de parámetros y, por otro lado, para la validación posterior del modelo a realizar.

A continuación, se presentan los principales resultados experimentales.

3.1. METODOLOGÍA DE REALIZACIÓN DEL SECADO EN PILA

Para preparar el biosólido se mezclan tres partes volumétricas iguales de lodo fresco proveniente de las plantas de tratamiento de aguas servidas, lodo seco del CGIB y material estructurante (cuesco de durazno), en la Tabla 1 se presentan las cantidades para cada mezcla, la cantidad total está dada por la capacidad de la mezcladora. La mezcla de biosólido se vierte sobre el asfalto mediante el uso de camiones tolva, luego se le da forma mediante el paso de la máquina volteadora, las dimensiones de la pila están dadas por la geometría de la volteadora Backus 21.50, mostrada en la Figura 11. El largo de la pila está dado por el largo de la cancha de secado en la que se realice el secado. Para el caso del invernadero el largo de la pila es de 30 metros.

En adición a la pila dentro del invernadero se levanta pila al exterior de este, de similares dimensiones, con el fin de realizar una comparación experimental del comportamiento dentro y fuera del invernadero del biosecado bajo mismas condiciones meteorológicas.

TABLA 1: MEZCLA DE BIOSÓLIDO

	Volumen	Densidad	Masa
Lodo fresco	400 [m ³]	1 [t/m ³]	400 [t]
Lodo seco	400 [m ³]	0,8 [t/m ³]	320 [t]
Cuesco de durazno	400 [m ³]	0,35 [t/m ³]	140 [t]



FIGURA 11: VOLTEADORA BACKUS 21.50

Las pilas se voltean día por medio de lunes a viernes. En caso de haber pronóstico de lluvia para un algún día, la pila fuera del invernadero se recubre con una cubierta impermeable, como en la Figura 12, durante la tarde del día anterior y se mantiene cubierta por el periodo de precipitaciones.



FIGURA 12: PILA FUERA DEL INVERNADERO TAPADA

3.2. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

El invernadero piloto está equipado con sensores de humedad, temperatura, amoníaco, compuestos orgánicos volátiles ubicados dentro del invernadero y en el flujo de salida del invernadero, el detalle de los equipos se presenta en la

Tabla 2.

Los sensores registran las mediciones cada 10 minutos, guardando la información mediante un dispositivo de almacenamiento USB en el PCL del invernadero.

TABLA 2: SENSORES EN EL INVERNADERO

Sensor	Modelo
Humedad relativa y temperatura	Veto A6041928
Humedad relativa y temperatura	Veto A604190
Compuestos orgánicos volátiles	Dräger Polytron 7000
Sulfuro de hidrógeno	Dräger Polytron 7000
Amoniaco	Dräger Polytron 7000

Por otro lado, en la pila de biosólido se mide su temperatura y humedad, para ello la toma de muestras se realiza al menos dos veces por semana, siendo lo óptimo un muestreo día por medio de lunes a viernes.

El muestreo de la pila consiste en la extracción de una porción de biosólido desde el interior de la pila a una profundidad aproximada de 40 centímetros, junto a ello se emplea una termocupla para la medición de la temperatura en la zona de muestreo a la misma profundidad en que fue tomada la muestra. Las muestras se extraen desde tres puntos en cada pila: en el centro y en los extremos, a 8 metros del centro.

La medición de humedad se realiza mediante la siguiente metodología:

1. Se extrae de la muestra de biosólido el material estructurante
2. Se homogeneiza la muestra
3. Se registra la masa del portamuestras (m_1) mediante el uso de una balanza analítica.
4. Se dispone de la muestra sobre el portamuestras y se registra su masa húmeda (m_2)
5. Se seca en un horno a 105 [°C] por 72 horas
6. Se registra su masa seca (m_3)
7. La humedad en base húmeda estará dada por la Ecuación (26), mientras que la sequedad estará dada por la Ecuación (27):

$$H_H = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\% \quad (26)$$

$$S = 100\% - H_H \quad (27)$$

3.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el periodo de operación se realizó el secado de 4 pilas de biosólido, de ellas se suspendió la operación de la pila 3 debido a irregularidades en la frecuencia de volteo. Del resto de las pilas, las secadas en invernadero requirieron un menor tiempo de secado con disminuciones porcentuales entre 17% y 39%. En la Tabla 3 se presenta el resumen de los resultados experimentales obtenidos mediante el muestreo de las pilas. El detalle de las mediciones se encuentra en el Anexo 1.

TABLA 3: RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

	Pila 1 - 2017		Pila 2 - 2017		Pila 3 - 2017		Pila 4 - 2017	
Lugar de secado	Inv.	Ext.	Inv.	Ext.	Inv.	Ext.	Inv.	Ext.
Fecha de inicio	5 May		2 Jun		18 Jul		18 Ago	
Fecha de término	25 May	7 Jun	29 Jun	14 Jul	8 Ago	8 Ago	7 Sep	11 Sep
Tiempo de secado	20	33	27	42	21	21	20	24
Disminución tiempo [d]	13		15		0		4	
Disminución porcentual [%]	39%		36%		0%		17%	

A continuación, se presenta las principales mediciones obtenidas mediante los sensores del invernadero en el periodo de operación de la pila 1, la información obtenida para el resto de las pilas se presenta en el

Anexo 2. En la Figura 13 se presenta la temperatura en ambiente al interior y al exterior del invernadero.

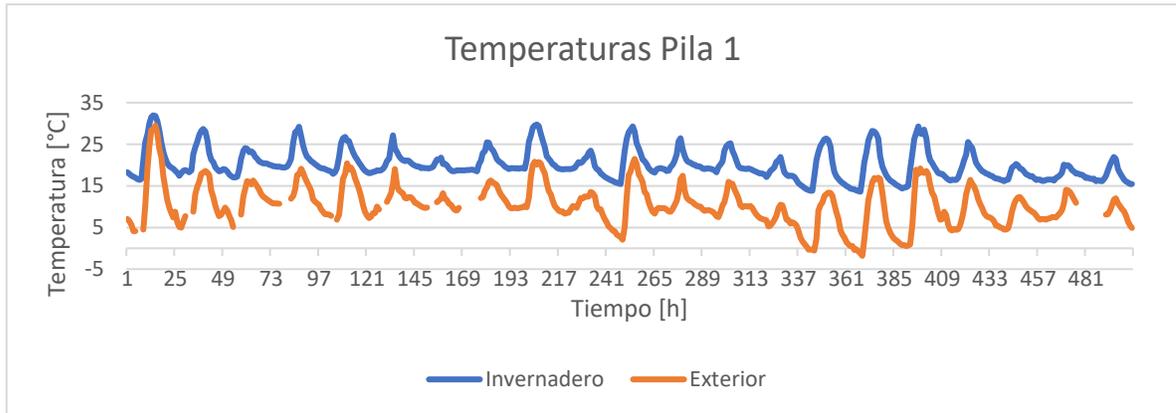


FIGURA 13: PILA 1, MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN INVERNADERO Y EXTERIOR

En el invernadero se registra una temperatura promedio mayor en 9 [°C] a la temperatura promedio registrado fuera de este. Siguiendo el mismo perfil diario, registrando una temperatura máxima alrededor de las 2pm y una temperatura mínima que se registra antes del amanecer alrededor de las 7am. Al estar a una temperatura mayor, el aire dentro del invernadero puede llevar una mayor concentración de agua, así como también, disminuye la pérdida de calor en la pila, sin embargo, sin la correcta extracción el invernadero puede saturarse y disminuir el gradiente de concentración que promueve la transferencia de masa desde la pila. A continuación, se presenta la humedad relativa en el invernadero durante el periodo de operación de la pila 1.

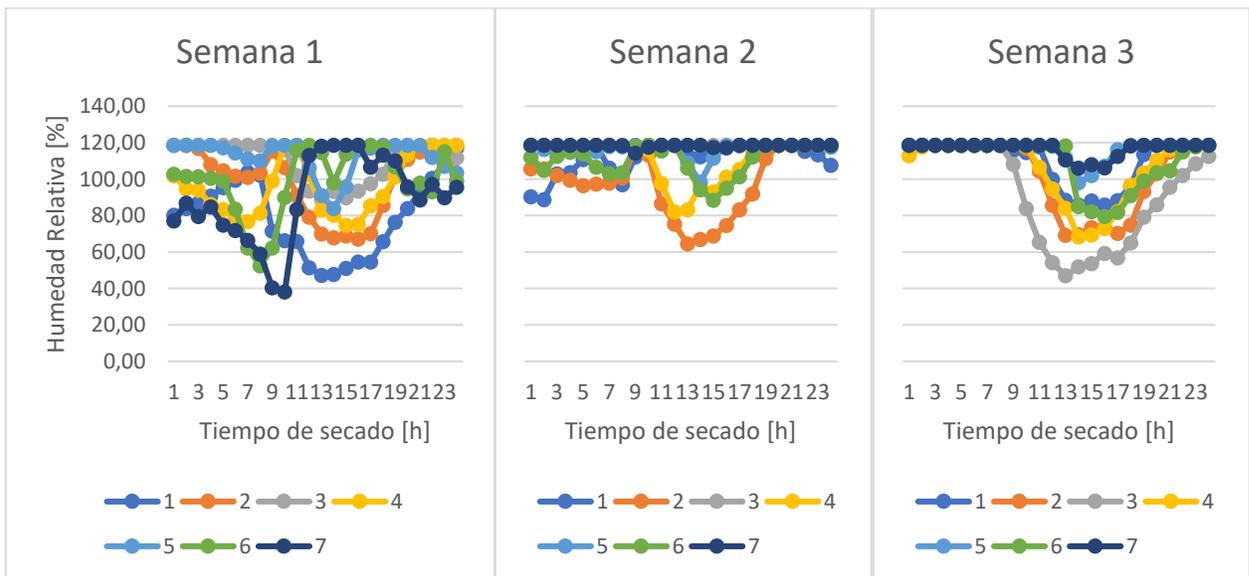


FIGURA 14: PILA 1, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA EN INVERNADERO

Producto de problemas en los sensores, se registra la humedad de saturación (100% de humedad relativa) se alcanza a 120%, a pesar de esto es posible identificar que, a excepción de los 5 primeros días de operación, la mayor parte del tiempo, entre las 7pm y las 8am, se opera en la humedad de saturación. En el caso de las pilas 3 y 4 se aprecia que se opera mayor tiempo a la humedad de saturación, esto podría explicar la similitud en el comportamiento de secado entre la pila al interior y la exterior del invernadero.

En la Tabla 4 se presentan las concentraciones para las emisiones de gases para el periodo de operación de la pila 1.

TABLA 4: RESUMEN EMISIONES PILA 1

Compuesto	Concentración promedio de emisión	Concentración máxima de emisión
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	0,14 [ppm]	0,22 [ppm]
Amoniaco (NH_3)	2,93 [ppm]	30,45 [ppm]
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	0,64 [ppm]	6,70 [ppm]

De los gases medidos la concentración, tanto el amoniaco como los compuestos orgánicos no volátiles no está normada [25]. Para los COV las industrias que empleen solventes en sus procesos deben declarar su emisión [26]. Por otro lado, para la evaluación de la emisión de sulfuro de hidrógeno se emplea el Decreto 167 de 2000 de la Secretaría General de Gobierno, que norma la emisión de sulfuro de hidrógeno en la producción de pulpa además de otros compuestos odorantes, que, si bien no aplica en el proceso de estudio, permite establecer un precedente para la evaluación de la emisión de este compuesto. La concentración máxima representa un 1% de la concentración máxima permitida en la emisión estipulada en el Decreto 167 de 2000 [27].

4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

A continuación, se presenta la construcción del modelo del proceso de biosecado, este es de carácter teórico y se empleará datos experimentales para el ajuste de algunos parámetros. En primer lugar, se identifican las variables y parámetros que están presentes en la modelación:

4.1. VARIABLES Y PARÁMETROS

PARÁMETROS FÍSICOS

1. Dimensiones y material de construcción del invernadero

El invernadero está construido en policarbonato alveolar (PC) de 8 [mm] de espesor, sobre un muro de hormigón de 1,5 [m] de alto, como se aprecia en la Figura 15. Sus dimensiones se presentan en la Tabla 5.

Está equipado con cuatro ventiladores en el techo, dirigiendo su flujo de forma perpendicular a la cima de la pila con el fin de mejorar la transferencia por convección sobre esta.

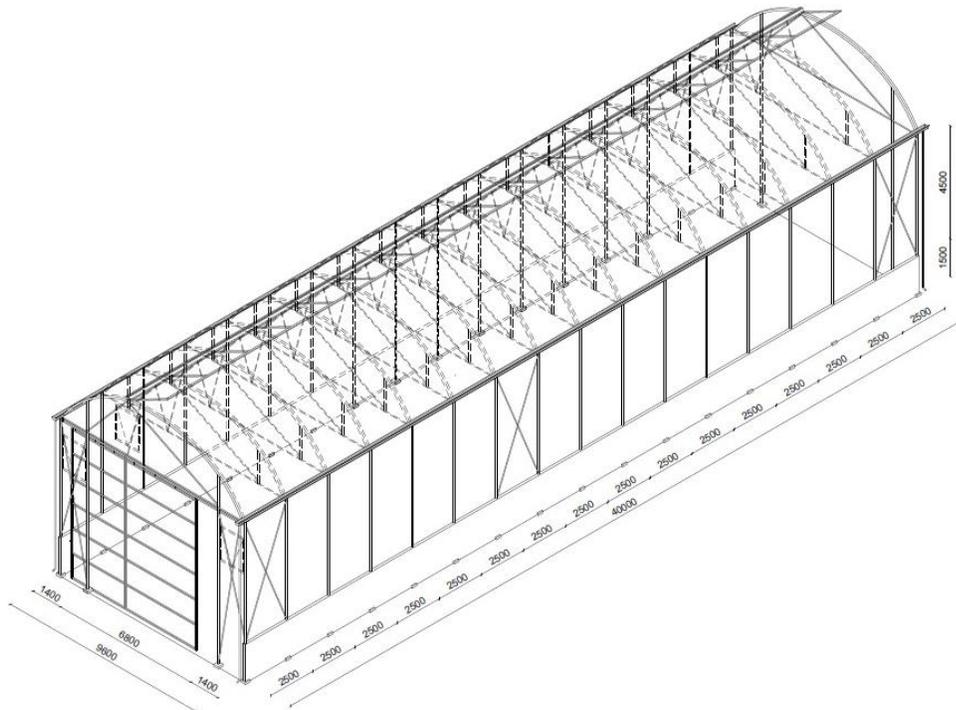


FIGURA 15: ESTRUCTURA DEL INVERNADERO PILOTO

TABLA 5: DIMENSIONES DEL INVERNADERO PILOTO

Alto	6 [m]
Ancho	15 [m]
Largo	40 [m]
Área techo	600[m ²]
Área lateral (PC)	360[m ²]

2. Dimensiones y conformación de la pila de biosólido

Para la confección de una pila se mezclan tres componentes: biosólido seco, biosólido fresco y cuescos de durazno en una proporción volumétrica 1:1:1. Los componentes se mezclan, se cargan en camiones y se descargan sobre las canchas de secado.

Las dimensiones de la pila pueden variar en su realización, pero usualmente varían entre 4,5 y 5,5 metros de base entre 1,5 y 2 metros de altura, como se aprecia en la Figura 16. Las dimensiones consideradas se presentan en la Tabla 6



FIGURA 16: PILA DE LODO EN INVERNADERO DURANTE VOLTEO

TABLA 6: DIMENSIONES CONSIDERADAS PARA LA PILA EN INVERNADERO

Alto	1,5 [m]
Ancho	5 [m]
Largo	30 [m]

PROPIEDADES FÍSICAS

1. Coeficientes de transferencia de calor de los materiales de construcción del invernadero

El policarbonato alveolar es una estructura de doble pared de policarbonato que alberga aire en su interior, como se aprecia en la Figura 17. Producto de esto la transferencia de calor a través involucra conducción directa, a través de las uniones entre ambas paredes, y conducción, convección y conducción en serie, en los sectores que poseen las cavidades de aire. Por esta razón el material posee un coeficiente global de transferencia U :

TABLA 7: COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DEL POLICARBONATO ALVEOLAR [28]

Coeficiente global de transferencia	3,18 [W/(m² · K)]
--	-------------------------------------



FIGURA 17: PERFIL DEL POLICARBONATO ALVEOLAR

2. Densidad del aire húmedo

La densidad del aire húmedo depende de su contenido de humedad, así como también de la presión y temperatura a la que se encuentre. Para su cálculo se empleará la Ecuación (28) [30]

$$\rho_a = \rho_{da} \cdot \frac{1 + X}{1 + 1,609 \cdot X} \quad (28)$$

Donde ρ_a es la densidad de aire húmedo, ρ_{da} la densidad del aire seco y X es la proporción entre la masa de agua y la masa de aire seco.

La densidad del aire seco se calcula asumiendo el comportamiento de gas ideal

$$P_{da} \cdot V_{da} = n_{da} \cdot R \cdot T_{da} \quad (29)$$

Donde P es la presión, V volumen, n el número de moles, R la constante de gases ideales y T la temperatura. A partir de la ecuación anterior se puede determinar la densidad como se muestra en la Ecuación

$$\rho_{da} = \frac{n_{da}}{V_{da}} \cdot MM_{da} = \frac{P_{da}}{R \cdot T_{da}} \cdot MM_{da} \quad (30)$$

Donde MM_{da} es la masa molar del aire seco.

Por otro lado, para determinar la proporción de humedad en aire seco se empleará la siguiente expresión

$$X = \frac{\exp\left(A + \frac{B}{C + T}\right)}{R \cdot T} \cdot HR \cdot MM_w}{\rho_{da}} \quad (31)$$

Donde A, B y C son coeficientes de la ecuación, HR es la humedad relativa y MM_w la masa molar del agua. La deducción de la ecuación para la proporción de agua en aire seco se encuentra en el Anexo 3.

3. Entalpía del aire húmedo

La entalpía del aire húmedo depende fuertemente de la cantidad de humedad que posee, debido al alto calor específico y de formación del agua. Se puede aproximar según la Ecuación (40) [31]:

$$H = 1,006 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \cdot T_a + X \cdot \left(1,84 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \cdot T_a + 2501 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \right) \quad (32)$$

Donde H es la entalpía del aire húmedo, función de la temperatura del aire, T_a , y la proporción de humedad, X .

4. Calor específico del aire húmedo

El calor específico de una mezcla de gases está dada por la suma de los calores específicos de los componentes ponderados por la fracción másica [22]. De esta manera, el calor específico del aire húmedo está dado por:

$$c_{pa} = \frac{1}{1+X} c_{pda} + \frac{X}{1+X} c_{pw} \quad (33)$$

Donde c_p es el calor específico, del aire (a), del aire seco (da) y del agua (w).

5. Calor específico de la pila

El calor específico del biosólido se determina de forma análoga al del aire húmedo, la siguiente expresión se determina en base a la composición del biosólido:

$$c_{pp} = \frac{20}{43} c_{pbh} + \frac{16}{43} c_{pbs} + \frac{7}{43} c_{pe} \quad (34)$$

Donde los subíndices indican pila (p), biosólido húmedo (bh), biosólido seco (bs) y estructurante, cuesco de durazno (es). El detalle del cálculo del calor específico de la pila se encuentra en el Anexo 4.

6. Coeficiente de difusión del agua en el biosólido

Debido a la compleja composición del biosólido y disposición física, el coeficiente de difusión de agua en el sólido no está reportado. Por esta razón este parámetro se ajustará desde un valor inicial equivalente al coeficiente de difusión de agua en lodo puro, sin estructurante.

7. Coeficiente de transferencia de masa por convección en la superficie del sólido

De igual manera al coeficiente de difusión este parámetro se ajustará en el modelo.

FLUJOS

1. Flujo de energía por la generación de la digestión de materia orgánica

La generación de energía a través de la digestión de la materia orgánica depende de la composición de la materia orgánica y de la vida bacteriana que lleva a cabo la

degradación de esta. Los valores reportados varían entre 15 y 23 [MJ] por kilogramo de sólido degradado [32].

El valor empleado por la empresa se encuentra en la Tabla 8 :

TABLA 8: GENERACIÓN DE ENERGÍA POR LA DEGRADACIÓN DE SÓLIDO

Generación por unidad de masa	15 [MJ/kg]
Potencia por unidad de volumen	256 [W/m³]

2. Flujo de energía asociada a la radiación solar

El flujo de calor proveniente de la radiación solar se aproximará a la siguiente expresión válida para invernaderos [18]:

$$\dot{q}_{rad}(t) = I(t) \cdot \tau \cdot \gamma \cdot A_i \quad (35)$$

Donde $I(t)$ representa la intensidad de la radiación, τ representa el porcentaje de transparencia del material del invernadero, γ es el porcentaje de energía retenida en el invernadero que varía entre 40% y 70% y A_i es el área del invernadero que recibe la radiación solar.

La intensidad de radiación durante el periodo de estudio se obtiene mediante dos estaciones meteorológicas ubicadas en las inmediaciones de la planta de tratamiento de biosólido. Los parámetros por utilizar se encuentran tabulados en la Tabla 9:

TABLA 9: PARÁMETROS FLUJO DE ENERGÍA POR RADIACIÓN [18] [28]

Intensidad de radiación	0 – 700[W/m²]
Potencia por unidad de volumen	82 [%]
Radiación retenida	40 – 70 [%]

3. Flujo de masa extraído desde el invernadero

El invernadero está equipado con tres extractores que en conjunto extraen un flujo de 15000 metros cúbicos por hora.

VARIABLES CONOCIDAS

1. Humedad del ambiente exterior al invernadero

La humedad ambiente se obtiene a partir de la información de dos estaciones meteorológicas ubicadas en el CGIB.

2. Temperatura del ambiente exterior al invernadero

Al igual que la humedad ambiente, la temperatura se obtiene a partir de la información de dos estaciones meteorológicas ubicadas en el CGIB.

3. Radiación solar

La intensidad de radiación solar se obtiene a partir de la información de dos estaciones meteorológicas ubicadas en el CGIB.

VARIABLES POR DETERMINAR

Las salidas del modelo son las siguientes variables, correspondiente a humedad y temperatura dentro del sólido y en el ambiente interior del invernadero:

1. Perfil de temperaturas en la pila
2. Perfil de concentración de agua en la pila
3. Temperatura en el invernadero
4. Concentración de agua en el invernadero

4.2. PILA

A continuación, se presentan los supuestos y el método de resolución de las ecuaciones presentadas anteriormente.

La geometría adoptada para la pila consiste en un semi cilindro del largo de la pila en invernadero. El radio escogido para el cilindro es de $R = 1,82[m]$, ya que para este radio se mantiene la masa que ingresa por pila al invernadero.

4.2.1. TRANSFERENCIA DE MASA

Para resolver la Ecuación (5) se utilizará el método de diferencias finitas utilizando las expresiones de las Ecuaciones (24) y (25). De esta manera la ecuación algebraica por resolver está dada por la Ecuación (40) el detalle de la deducción de esta ecuación se encuentra en el Anexo 5:

$$C_{t+\Delta t}^r = C_t^r + \frac{D \cdot \Delta t}{r} \left[\frac{C_t^{r+\Delta r} - C_t^r}{\Delta x} + r \frac{C_t^{r+\Delta r} - 2C_t^r + C_t^{r-\Delta r}}{\Delta x^2} \right] \quad (36)$$

Para resolver esta ecuación se supone un coeficiente de difusión constante en el tiempo y que el sólido mantiene su volumen [9].

4.2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR

La Ecuación (15) se resuelve de forma análoga a la Ecuación (5) y el detalle de su deducción se encuentra en el Anexo 6:

$$T_{t+\Delta t}^r = T_t^r + \frac{\Delta t}{\rho c_p} \left(\dot{q}_{gen} + \frac{k}{r} \cdot \left[\frac{T_t^{r+\Delta r} - T_t^r}{\Delta t} + r \frac{T_t^{r+\Delta r} - 2T_t^r + T_t^{r-\Delta r}}{\Delta t^2} \right] \right) \quad (37)$$

Para resolver esta ecuación se supone que las propiedades del lodo se mantienen constantes durante el proceso de secado.

4.3. INVERNADERO

4.3.1. BALANCE DE AGUA EN EL INVERNADERO

El balance de agua está dado por la Ecuaciones (9) a (14). Para su resolución se considerará que los ventiladores dentro del invernadero mantienen el interior perfectamente agitado, con lo que la concentración de salida C_s de agua será igual a la

concentración dentro del invernadero C_i se puede determinar la expresión para la concentración de agua dentro del invernadero:

$$C_{i_{t+\Delta t}} = C_{i_t} + \frac{\Delta t}{V_i} (F_e \cdot C_{e_t} - F_s \cdot C_{s_t} + F_{evap_t}) \quad (38)$$

4.3.2. BALANCE DE ENERGÍA EN EL INVERNADERO

A partir del balance de energía de la Ecuación (19) se deduce la siguiente expresión para la determinación de la temperatura dentro del invernadero a partir de condiciones en un periodo anterior:

$$T_{i_{t+\Delta t}} = T_{i_t} + \frac{\Delta t}{m \cdot c_p} [F_{e_t} \cdot H_{e_t} + F_{evap_t} \cdot H_{evap_t} - F_{s_t} \cdot H_{s_t} + I_t \cdot \tau \cdot \gamma \cdot A - U \cdot A_{inv} \cdot (T_{i_t} - T_{e_t}) + h_i \cdot A_{pila} \cdot (T_{pila_t} - T_{i_t})] \quad (39)$$

5. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Se modeló la primera pila realizada durante el periodo de operación realizándose los ajustes de parámetros obteniéndose los siguientes valores:

TABLA 10: PARÁMETROS AJUSTADOS MEDIANTE MODELO

Coefficiente de difusión	$8,5 \cdot 10^{-8} [m^2/s]$
Coefficiente de transferencia de masa	4,24 [m/s]
Coefficiente de transferencia de calor por convección	37,81 [W/m ² K]

De los valores obtenidos, el coeficiente de difusión se eleva por un orden de magnitud al orden típico de difusión en sólidos, sin embargo, el sólido estudiado es un sólido compuesto, no homogéneo con cavidades de aire en su interior producto del material estructurante, que pueden derivar en un mayor coeficiente de difusión respecto a la sustancia pura [12]. Por otro lado, el coeficiente de calor por convección está dentro del rango típico para una transferencia por convección forzada [29].

En la Tabla 11, se presentan los resultados para la pila 1. Mientras que

TABLA 11: RESULTADOS PARA PILA 1

	Sequedad		Temperatura	
	Muestra	Modelo	Muestra	Modelo
3	50,0%	41%	37,2	37,44
5	52,6%	45%	42,2	39,86
7	53,0%	48%	45,4	45,46
12	53,3%	55%	49,7	48,62
15	55,8%	58%	52,0	53,29
17	58,7%	59%	50,9	53,38
20	62,6%	63%		

El modelo se ajusta correctamente para el comportamiento medido en la temperatura, sin embargo, para la sequedad se aprecia que no predice el comportamiento medido correctamente para el inicio de la pila, presentando errores de hasta 11% en la sequedad.

Lo anterior se explica en base a la suposición de una actividad biológica constante, siendo que, en el comportamiento real, la degradación es mayor al comienzo del proceso, disminuyendo paulatinamente hasta reactivarse en el siguiente volteo [16]. Esto derivaría en una mayor transferencia al inicio del proceso para luego ir mermando a medida que transcurre el tiempo. Sin perjuicio de lo anterior, el modelo logra predecir a largo plazo el tiempo de secado de la pila, fijándose éste en el día 18, que coincide con el tiempo de secado medido experimental fijado entre 17 y 20 días.

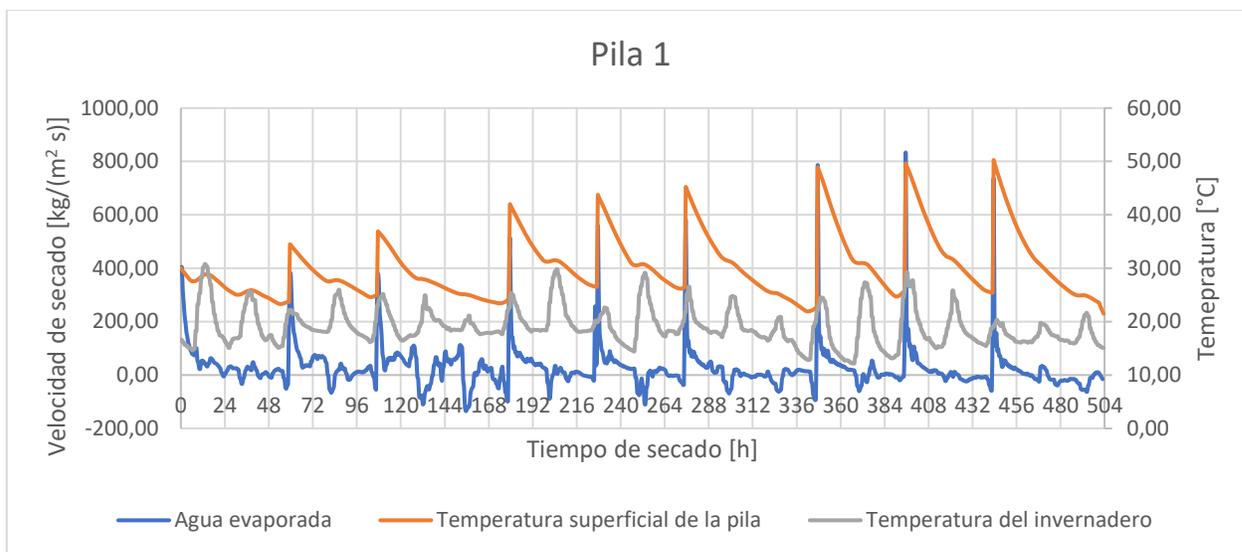


FIGURA 18: MODELACIÓN PILA 1

En la Figura 18 se grafica la tasa de evaporación junto a la temperatura superficial de la pila y la temperatura dentro del invernadero, que definen la transferencia de masa desde la pila. A medida que transcurre el tiempo de secado se observa que disminuye paulatinamente la velocidad de secado. Los volteos, junto con evaporar una gran cantidad de agua en un corto periodo de tiempo, aumentan temperatura superficial de la pila aumentando con ello la transferencia de masa. Por otro lado, y debido a la alta humedad registrada dentro del invernadero, la velocidad de secado es negativa, es decir, la pila capta humedad desde el ambiente, esto se da generalmente durante la noche por la alta humedad que se registra dentro del invernadero.

En la Tabla 12, se presentan los resultados de la modelación para la segunda pila realizada. Se observa que, al igual que para la pila 1, se ajusta correctamente al comportamiento esperado para la temperatura de la pila y que, nuevamente, no se logra

predecir correctamente a corto plazo. Se establece el tiempo de secado en 20 días, a dos días de diferencia del tiempo registrado experimentalmente (22 días).

TABLA 12: RESULTADOS PARA PILA 2

	Sequedad		Temperatura	
	Muestra	Modelo	Muestra	Modelo
3	40,1%	31%	27,1	28,05
5	47,1%	38%	31,3	31,42
7	46,8%	43%	37,5	37,37
12	47,0%	53%	42,3	42,39
14	48,8%	56%	50,5	47,83
19	55,0%	57%	48,7	48,64
21	59,1%	62%		

Para la pila 2 se observa, en la Figura 19, una mayor transferencia del ambiente a la pila, el efecto de esta transferencia se puede apreciar en la Figura 20, donde se aprecia que la sequedad no posee un perfil de aumento continuo, sino que en ocasiones disminuye por la ganancia de agua desde el ambiente, este comportamiento también se observa, en menor medida, en los datos experimentales, en la Figura 25.

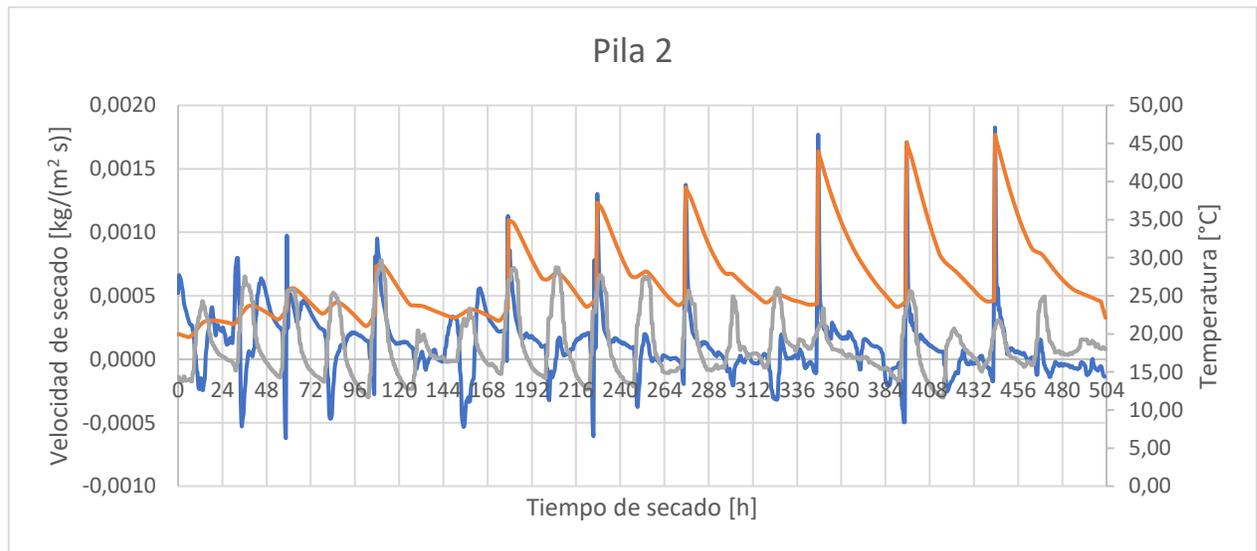


FIGURA 19: MODELACIÓN PILA 2



FIGURA 20: SEQUEDAD CALCULADA, PILA 2

Por otro lado, se realizó la simulación para un escenario sin volteos, del cual se pudo concluir que la transferencia de masa desde la pila disminuye. Para el comienzo del sexto día, la pila sin voltear tendría una sequedad de 44% mientras que con volteo tendría un 50% de sequedad. En la

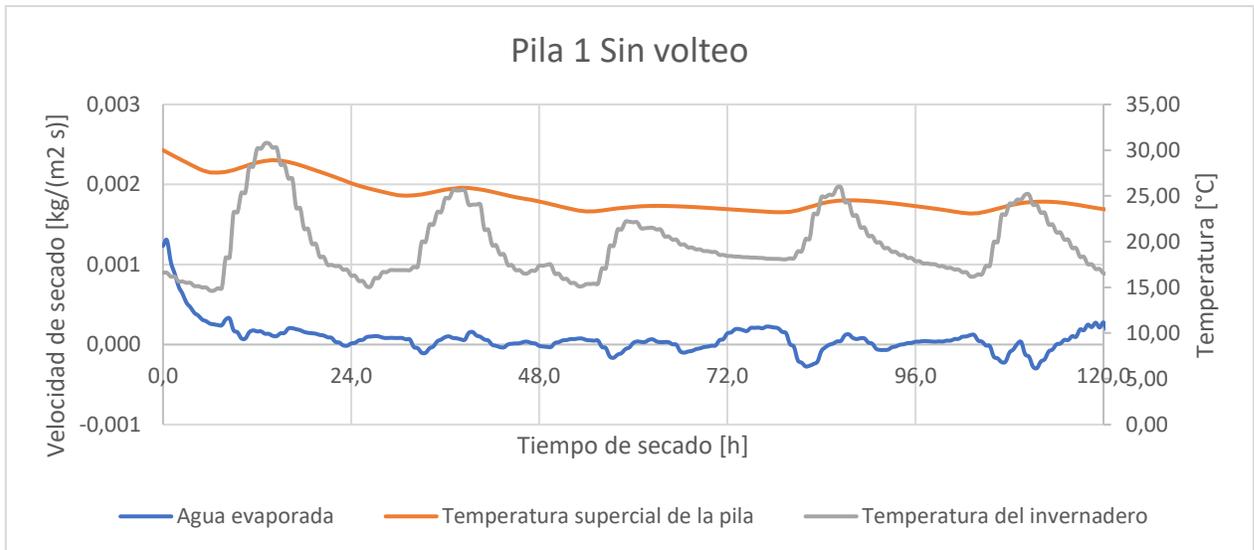


Figura 21 se grafica el resultado de esta simulación.

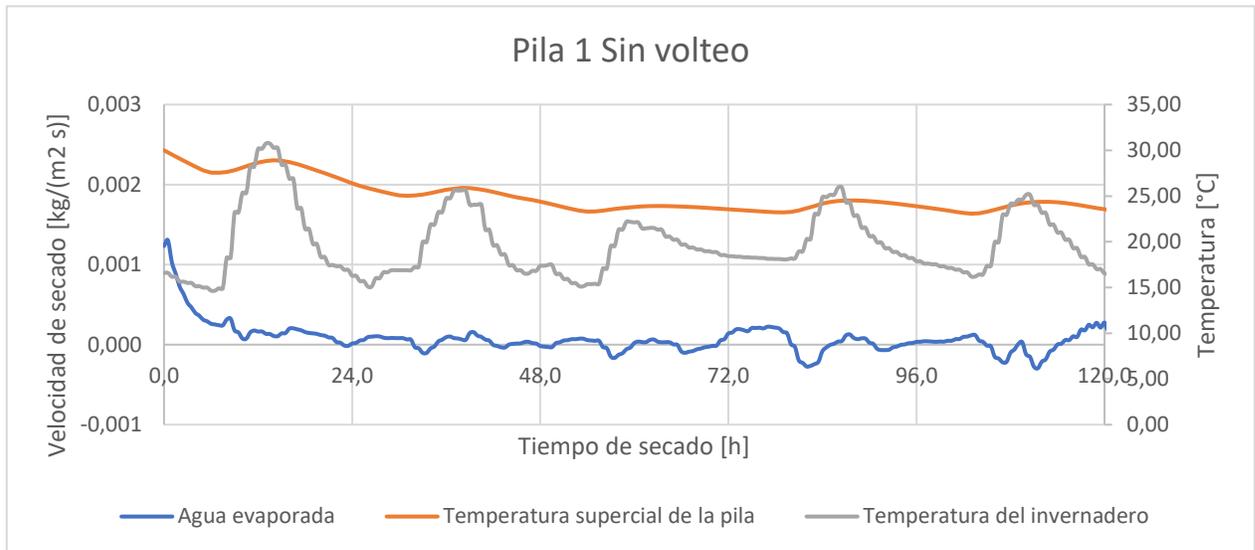


FIGURA 21: SIMULACIÓN SIN VOLTEO, PRIMEROS 5 DÍAS

Finalmente, se realizó una simulación bajo una humedad relativa constante dentro del invernadero. Con el fin de estimar la sequedad a la que se podría llegar en el mismo periodo de tiempo que con el sistema de extracción actual.

TABLA 13: SEQUEDAD AL CABO DE 21 DÍAS, DIFERENTE HR

Humedad relativa	Sequedad al cabo de 21 días
0	0,79
0,1	0,75
0,2	0,72
0,3	0,70
0,4	0,68
0,5	0,67
0,6	0,66
0,7	0,65
0,8	0,64
0,9	0,63
1	0,62

Como se aprecia en la tabla, al disminuir la humedad relativa aumenta la sequedad, es decir la velocidad de secado. Sin embargo, mediante extracción no es posible alcanzar humedades relativas menores a la humedad relativa del flujo de entrada, es decir, del ambiente exterior al invernadero.

Realizando una simulación en la menor humedad relativa posible se logró determinar que el secado de la pila 1, que se realizó en 21 días, podría llevarse a cabo en 14 días, sin embargo, una mayor extracción podría significar una disminución de la temperatura dentro del invernadero.

6. DISCUSIONES

Para la realización se realizaron diversos supuestos para aproximar el proceso real. Éstos tienen diversas repercusiones en los resultados, que se analizan a continuación.

En primer lugar, respecto a los supuestos realizados en la transferencia de masa. se utilizó la geometría de un semicilindro para modelar la pila, si bien el radio escogido el área superficial de la pila, que incide sobre la cantidad de agua evaporada, existe una fuente una fuente de error producto de esta aproximación. La pila se aplana producto de los volteos, por esta razón la distancia de difusión de agua dentro de la pila está sobreestimada en el modelo. Esta aproximación puede derivar en que el tiempo de secado esté sobreestimado respecto al comportamiento real.

Por otro lado, para el proceso de transferencia de agua dentro de la pila se consideró únicamente difusión por un medio homogéneo, sin embargo, la transferencia también involucra transferencia capilaridad, ya que el medio es poroso y no homogéneo. A pesar de lo anterior, el coeficiente difusión efectiva calculado aproxima la transferencia de masa de manera que los resultados obtenidos se condicen con los resultados experimentales medidos.

Finalmente, respecto a la transferencia de agua desde la pila al aire, se consideró como área de transferencia la superficie de la pila lisa, en la realidad el lodo presenta múltiples irregularidades en su superficie que aumentan el área de transferencia para la evaporación del agua. Sin embargo, esta diferencia de área de transferencia puede considerarse como un factor incluido en el coeficiente de transferencia calculado.

Respecto a la generación de energía se asumió que ésta se generaba de manera constante y uniforme en la pila. Sin embargo, este comportamiento no se ajusta a la realidad, ya que el metabolismo de las bacterias se ve afectado por la temperatura y concentración de oxígeno de su entorno, de esta manera la generación de energía no debería ser uniforme en la pila. Por otro lado, la concentración de oxígeno en el ambiente que rodea a las bacterias va disminuyendo constantemente hasta el siguiente volteo, momento en el cual se oxigena nuevamente el lodo. La consideración de estos factores permitiría estudiar en mayor detalle el impacto del volteo y la frecuencia de su realización.

Las interacciones entre cuerpos y emisiones de calor mediante radiación fueron simplificadas a un término según la expresión de la Ecuación 35. Esta ecuación representa la energía neta que se acumula en el invernadero mediante radiación y se expresa como una fracción de la radiación solar incidente sobre el invernadero. Esta aproximación puede perfeccionarse mediante un análisis en mayor detalle de los flujos de calor por radiación, perfeccionar el modelo en este aspecto podría derivar la predicción de la temperatura dentro del invernadero, haciendo, de esta forma, el modelo independiente de valores experimentales.

7. RECOMENDACIONES

Desde un punto operacional, es necesario destacar la importancia del uso de los elementos de protección personal para cualquier persona involucrada en labores dentro del invernadero, debido a las altas concentraciones de amoníaco que pueden exceder los 100ppm junto a la pila. Se debe considerar que, en el caso de escalar la operación de biosecado en invernadero, se mantendrían múltiples pilas en una misma estructura que, de no ser de un volumen adecuado, podría concentrar este gas.

Por otro lado, es necesario destacar la importancia del volteo de las pilas durante el biosecado. Mediante el volteo se elimina una gran cantidad de agua desde la pila, pero, aún más importante, favorece la transferencia de masa mediante el aumento de la temperatura superficial de la pila y la homogeneización del sólido, lo que permite evitar la tercera etapa del secado expuesta en la sección 2.2. Secado de sólidos.

El presente trabajo constituye un punto de partida para continuar hacia una modelación más completa del proceso. En primer lugar, mediante un estudio biológico, y un muestreo de mayor frecuencia, podría estimarse la generación energética periodo a periodo. Esto permitiría evitar los errores del modelo para el corto plazo de secado.

Por otra parte, la adición de flujos energéticos no considerados en el balance de energía permitiría estimar las condiciones dentro del invernadero para cada periodo. A modo de necesitar únicamente las condiciones meteorológicas de un lugar para realizar un análisis preliminar de factibilidad para el biosecado en invernadero.

Finalmente, y con la información anterior, se podría estimar la pérdida de temperatura dentro del invernadero producto de la extracción de aire. Con ello sería posible estimar un punto óptimo de operación en el cual se favorezca la transferencia manteniendo una humedad relativa baja, sin disminuir la temperatura del aire dentro del invernadero.

8. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un modelo fenomenológico para el biosecado en invernadero, usando la información de una pila para el ajuste de parámetros. Lográndose predecir los tiempos de secado de las pilas restantes.

Se determinó el coeficiente de difusión de agua en el biosólido, el coeficiente de transferencia de masa y de transferencia de calor por convección para el sistema empleado por Aguas Andinas en la planta piloto. Los valores determinados, se encuentran dentro de los rangos esperados y permiten la correcta simulación de las pilas.

El modelo, si bien predice el tiempo de secado, no se ajusta de manera correcta en el corto plazo de secado. Para mejorar este aspecto es necesario conocer de mejor manera la producción de energía por parte de la vida bacteriana, dentro de la pila.

El modelo se ajusta correctamente para la predicción del perfil de temperatura dentro de la pila.

A partir de datos experimentales, se concluye que el invernadero permite secar el biosólido en un menor tiempo, aproximadamente, el 70% del tiempo empleado fuera de este.

El volteo favorece condiciones óptimas para la transferencia de masa desde la pila al invernadero. Además de eliminar una gran cantidad de agua y energía durante el proceso.

La frecuencia de volteo influye en el tiempo de secado. En un periodo de 5 días, no realizar volteo derivó en la disminución de 5% en la sequedad de la pila.

La alta humedad nocturna merma la transferencia de masa desde la pila al ambiente. Operar gran parte del tiempo en la humedad de saturación, deriva en un mayor tiempo requerido para lograr la humedad recomendada para la estabilización del sólido.

Una mayor extracción permitiría operar fuera del punto de saturación de vapor, sin embargo, podría conllevar una disminución de la temperatura dentro del ambiente del invernadero.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Superintendencia de Servicios Sanitarios, "Estudio de consumo 2009", Santiago, Chile, 2009.
- [2] M. Espigares García, R. Gálvez and J. Pérez López, *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Granada: [Universidad, Servicio de Publicaciones], 1986.
- [3] S. Muñoz, "Alternativa energética para el biogás producido en planta de tratamiento de aguas servidas Talagante. Evaluación técnica, económica y ambiental", Universidad Técnica Federico Santa María, 2012.
- [4] A. Murray, A. Horvath and K. Nelson, "Hybrid Life-Cycle Environmental and Cost Inventory of Sewage Sludge Treatment and End-Use Scenarios: A Case Study from China", *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 9, pp. 3163-3169, 2008.
- [5] A. Hospido, M. Carballa, M. Moreira, F. Omil, J. Lema and G. Feijoo, "Environmental assessment of anaerobically digested sludge reuse in agriculture: Potential impacts of emerging micropollutants", *Water Research*, vol. 44, no. 10, pp. 3225-3233, 2010.
- [6] *Decreto 4*. Santiago, Chile: Secretaría General de la Presidencia, 2009.
- [7] Aguas Andinas S.A., "Reporte de Sustentabilidad", 2015.
- [8] Comisión regional del medio ambiente de la región Metropolitana de Santiago, "Resolución Sanitaria", Santiago, Chile, 2009.
- [9] Ekométrica, "Proyecto 4970B, Medición de olor al aire ambiente, Evaluación de trazador de olor – El Rotal", Santiago, Chile, 2016.
- [10] Gerencia de Asistencia Técnica, Aguas Andinas, "Evaluación de la dispersión de olor mediante modelo matemático", Santiago, Chile, 2016.
- [11] R. Bird, W. Stewart and E. Lightfoot, *Fenómenos de transporte (2a. ed.)*. Grupo Gen - LTC, 2000.
- [12] D. Green and R. Perry, *PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK*, 8th ed. [S.I.]: MCGRAW-HILL EDUCATION, 2007, pp. 12-26.

- [13] C. Hall, *Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition*, 4th ed. CRC Press Inc, 2014, p. Cap. 1.
- [14] R. Treybal, *Mass-transfer operations*, 2nd ed. New York [u.a.]: McGraw-Hill, 2004.
- [15] R. Davis and J. Hall, "Production, tratment and disposal of wastewater sludge in Europe from a UK perspective", *European Water Pollution Control*, 1997.
- [16] L. Cai, T. Chen, D. Gao and J. Yu, "Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge", *Water Research*, vol. 90, pp. 44-51, 2016.
- [17] C. Huiliñir and M. Villegas, "Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge", *Water Research*, vol. 82, pp. 118-128, 2015.
- [18] A. Druma, "Dynamic climate model of a greenhouse", The United Nations University, 1998.
- [19] G. Pita, M. Pontes and A. Vargues, "MEDITERRANEAN GREENHOUSE ENERGY BALANCE", *Acta Horticulturae*, no. 456, pp. 375-382, 1998.
- [20] B. Ciprian and G. Bracutu, "Theoretical overall energy balance in a greenhouse for flowers", Brasov, Romania, 2014.
- [21] B. Kimball, "Simulation of the energy balance of a greenhouse", *Agricultural Meteorology*, vol. 11, pp. 243-260, 1973.
- [22] Y. Cengel and M. Boles, *Theomodynamics*. Boston: McGraw-Hill, 2002.
- [23] F. Díaz, "Apunte: Diferencias Finitas con generación", 2014.
- [24] R. LeVeque, *Finite difference methods for ordinary and partial differential equations*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.
- [25] R. O'Ryan and L. Larraguibel, "CONTAMINACION DEL AIRE EN SANTIAGO: ESTADO ACTUAL Y SOLUCIONES", *Perspectivas en política, economía y gestión*, vol. 4, no. 1, 2018.
- [26] *Resolución 2662*, Santiago de Chile, Ministerio de salud, subsecretaría de Salud pública, Enero, 2012.
- [27] *Decreto 167*, Santiago de Chile, Secretaría general de la Presidencia, Abril 2000

- [28] Catalogo: *Macrolux, Multi-wall polycarbonate panels*. CO-EX Corporation, Wallingford Ct, USA. 2008.
- [29] "Convective Heat Transfer Coefficients Table Chart | Engineers Edge | www.engineersedge.com", *Engineersedge.com*, 2018. [Online]. Available: https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm. [Accessed: 20- Feb- 2018].
- [30] Engineering ToolBox, "Density of Moist Humid Air", Engineeringtoolbox.com, 2018. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/density-air-d_680.html. [Accessed: 04- Jan- 2018].
- [31] Engineering Toolbox, "Enthalpy of Moist Air", Engineeringtoolbox.com, 2018. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/enthalpy-moist-air-d_683.html. [Accessed: 21- Feb- 2018].
- [32] P. He, L. Zhao, W. Zheng, D. Wu and L. Shao, "Energy Balance of a Biodrying Process for Organic Wastes of High Moisture Content: A Review", *Drying Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 132-145, 2013.
- [33] P. Arlabosse, S. Chavez and C. Prevot, "Drying of municipal sewage sludge: from a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 227-232, 2005.

10. ANEXOS

10.1. ANEXO 1: RESULTADOS MEDICIONES EXPERIMENTALES

A continuación, se presentan las mediciones experimentales realizadas entre los meses de mayo y septiembre de 2016.

PILA 1

TABLA 14: MEDICIONES PILA 1

Día	Invernadero		Exterior	
	Seq [%]	Tem [°C]	Seq [%]	Tem [°C]
3	50,0%	37,2	46,5%	33,1
5	52,6%	42,2	47,0%	35,5
7	53,0%	45,4	47,1%	37,2
12	53,3%	49,7	47,0%	39,1
15	55,8%	52,0	47,3%	46,0
17	58,7%	50,9	46,8%	43,3
20	62,6%	68,5	51,7%	47,7
22			50,1%	42,3
24			50,5%	52,9
27			51,2%	58,5
29			55,0%	65,5
30			57,5%	55,5
33			61,0%	38,2

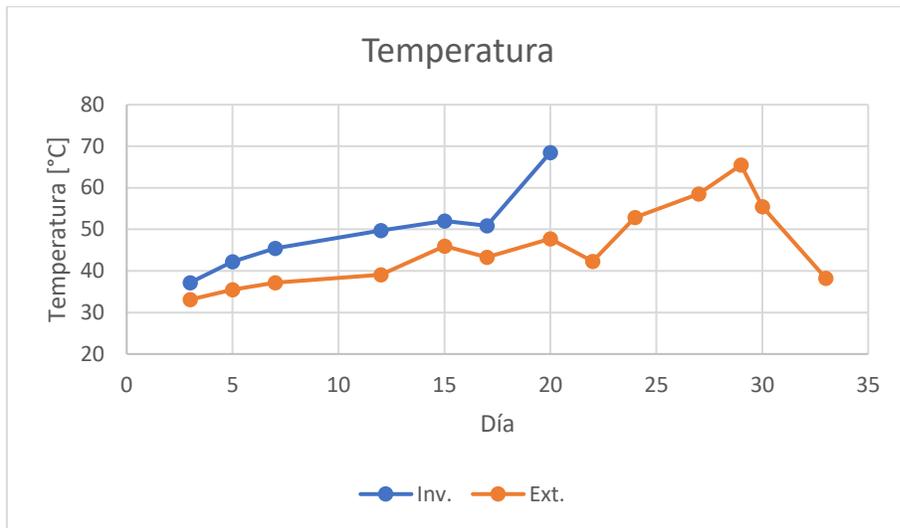


FIGURA 22: PILA 1: TEMPERATURA EN EL TIEMPO

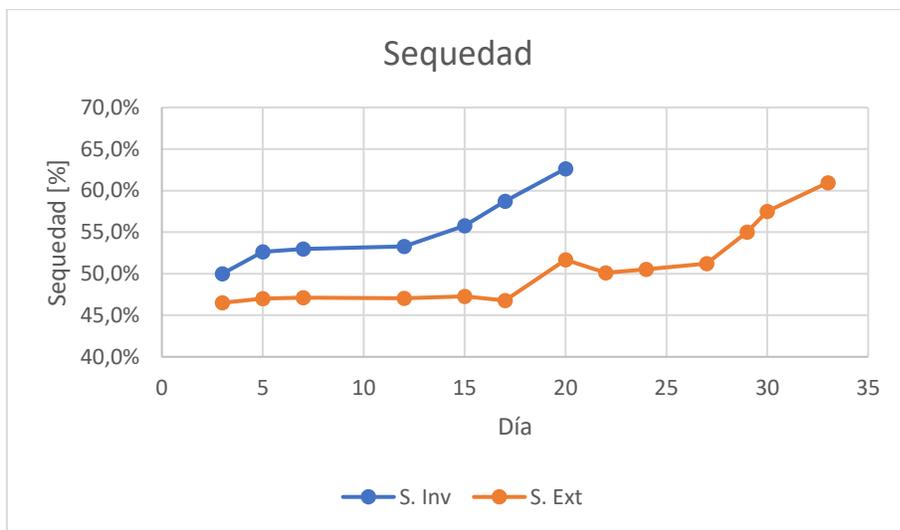


FIGURA 23: PILA 1, SEQUEDAD EN EL TIEMPO

PILA 2

TABLA 15: MEDICIONES PILA 2

Día	Invernadero		Exterior	
	Seq [%]	Tem [°C]	Seq [%]	Tem [°C]
3	40%	27,1	41%	27,3
5	47%	31,3	44%	31,5
7	47%	37,5	45%	35,5
12	47%	42,3	48%	33,4
14	49%	50,5	48%	48,8
19	55%	48,7	47%	42,5
21	59%	47,8	47%	36,2
25	56%	55,8	47%	42,1
27	62%	56,2	50%	39,2
38			54%	49,9
40			58%	52,9
42			61%	57,8

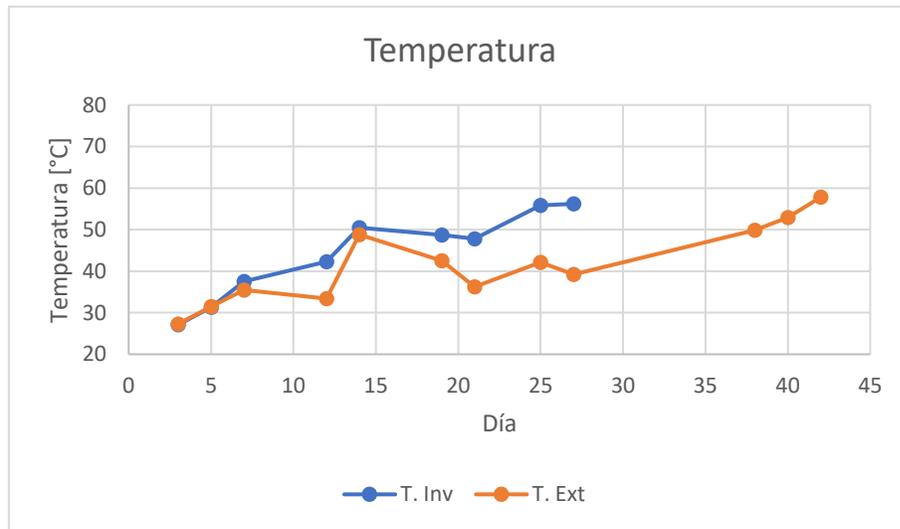


FIGURA 24: PILA 2, TEMPERATURA EN EL TIEMPO

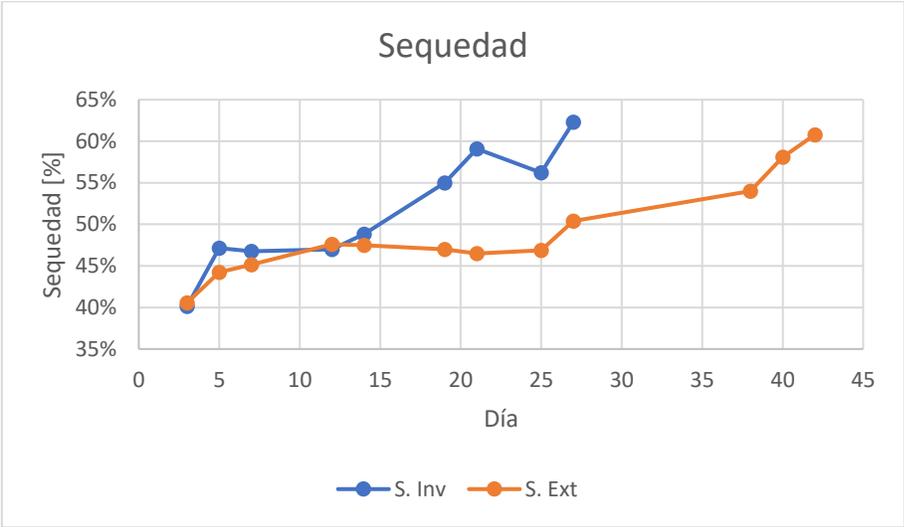


FIGURA 25: PILA 2, SEQUEDAD EN EL TIEMPO

PILA 3

TABLA 16: MEDICIONES PILA 3

Día	Invernadero		Exterior	
	Seq [%]	Tem [°C]	Seq [%]	Tem [°C]
0	40%	22,4	45%	23,1
2	44%	24,1	47%	23,5
6	44%	29,2	48%	27,5
8	48%	40,2	50%	38,1
10	48%	39,6	50%	45,1
13	48%	42,5	49%	42,6
15	52%	41,1	55%	43,8
17	51%	68,1	54%	57,3
21	50%	48,1	56%	57,9

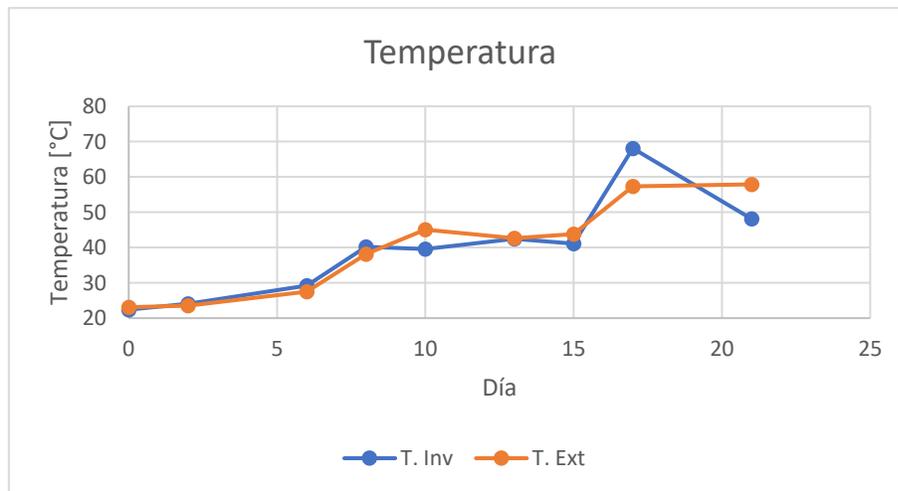


FIGURA 26: PILA 3, TEMPERATURA EN EL TIEMPO

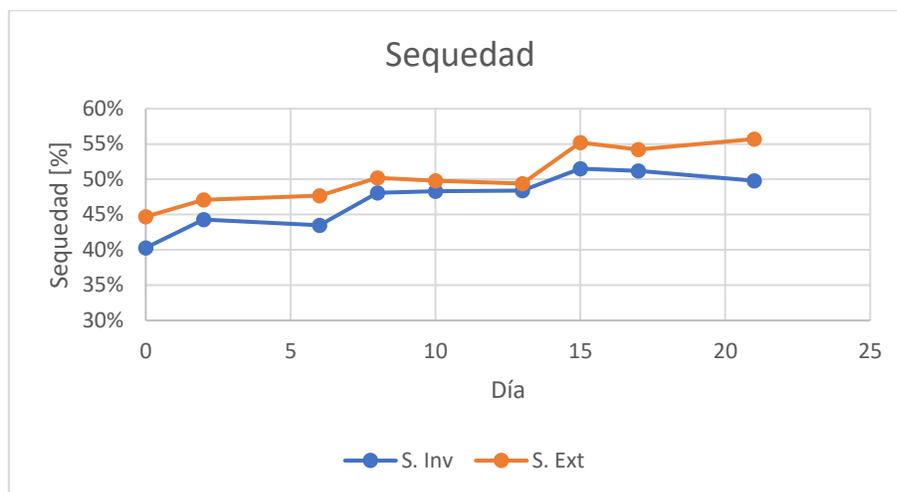


FIGURA 27: PILA 3, SEQUEDAD EN EL TIEMPO

PILA 4

TABLA 17: MEDICIONES PILA 4

Día	Invernadero		Exterior	
	Seq [%]	Tem [°C]	Seq [%]	Tem [°C]
3	45,4%	37	47,4%	38
5	45,1%	39,3	47,7%	38,6
7	48,5%	43,6	48,4%	39,5
10	50,8%	44,5	47,7%	42,2
12	52,1%	45,5	50,7%	44,4
14	56,7%	60,5	51,5%	49,8
17	57,3%	59,5	52,2%	55,3
19	59,5%	67,2	56,7%	53,5
21	61,5%	48,3	58,2%	46,5
24			60,2%	58,4

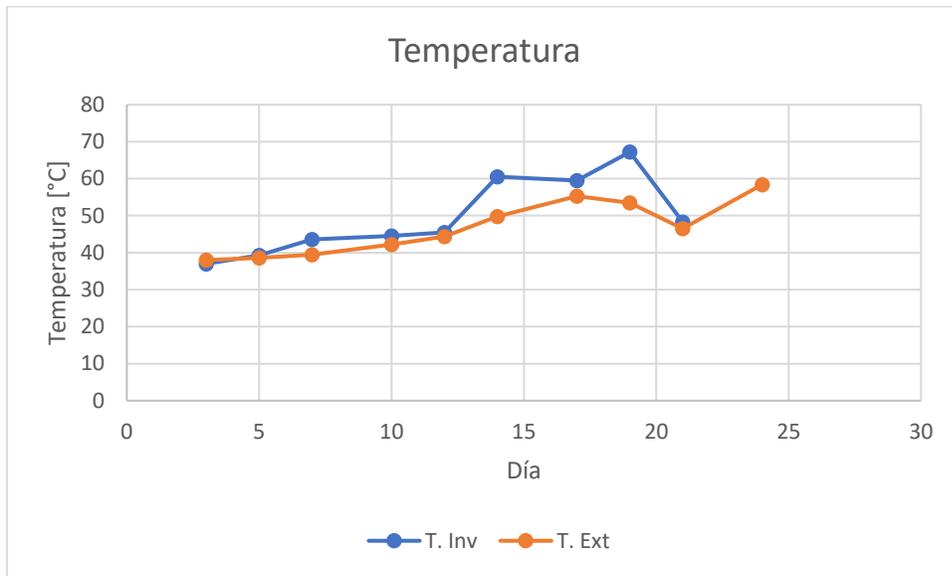


FIGURA 28: PILA 4, TEMPERATURA EN EL TIEMPO

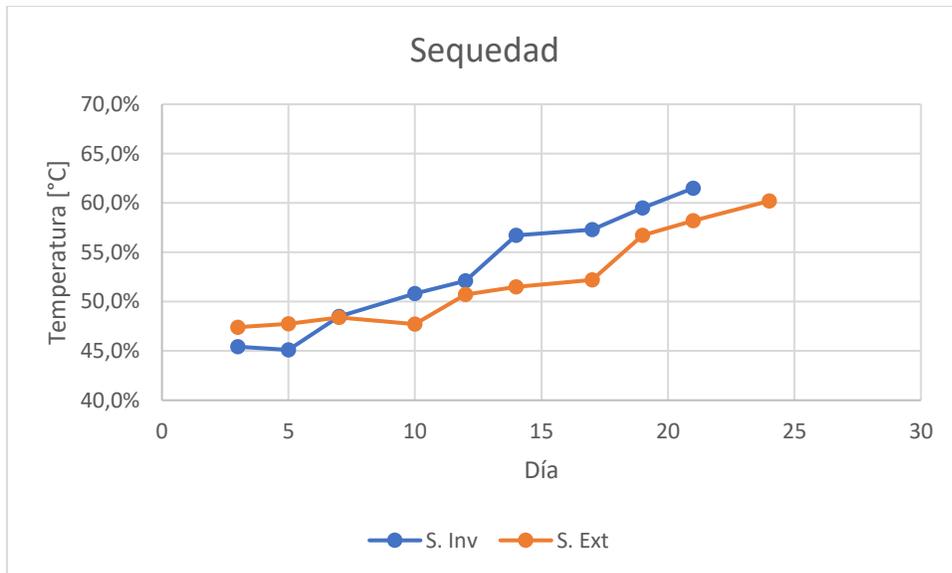


FIGURA 29: PILA 4, SEQUEDAD EN EL TIEMPO

10.2. ANEXO 2: RESULTADOS MEDICIONES DE SENSORES

A continuación, se presentan las mediciones realizadas por los sensores instalados en el invernadero para cada semana de operación. Los días de la semana para cada semana están representados con números desde 1 a 7.

PILA 1

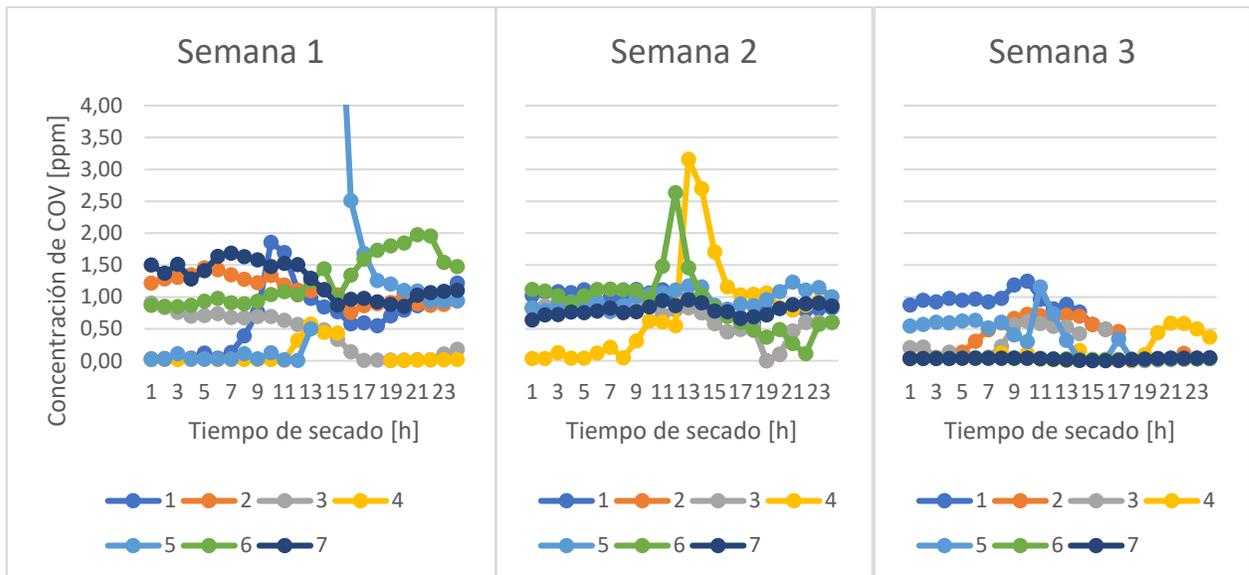


FIGURA 30: PILA 1, MEDICIÓN COV INVERNADERO

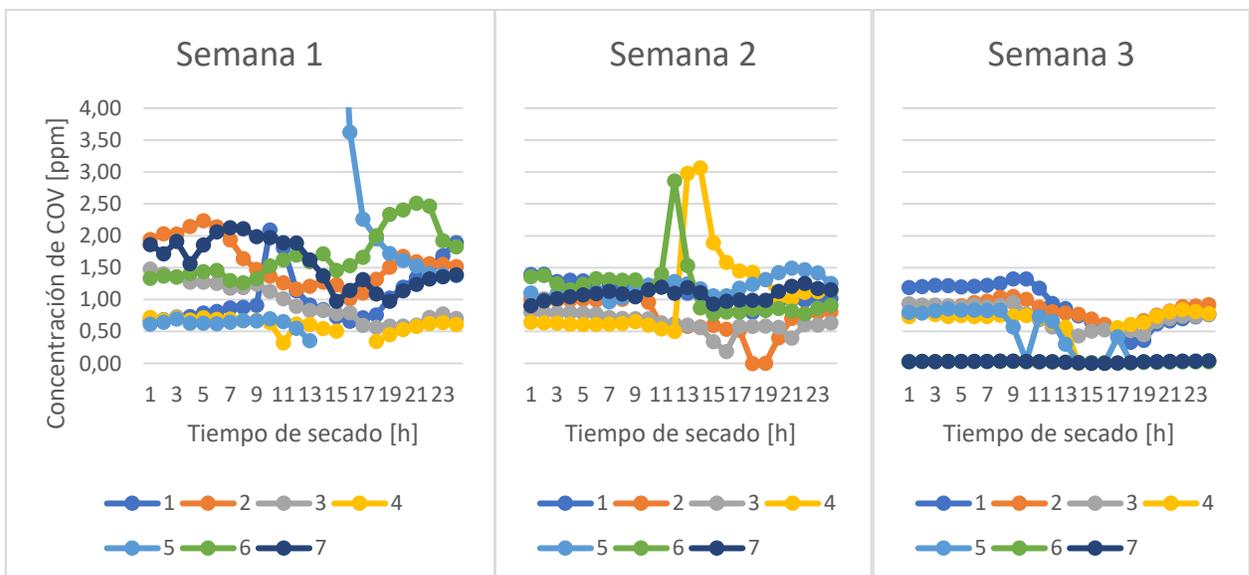


FIGURA 31: PILA 1, MEDICIÓN COV FLUJO DE SALIDA

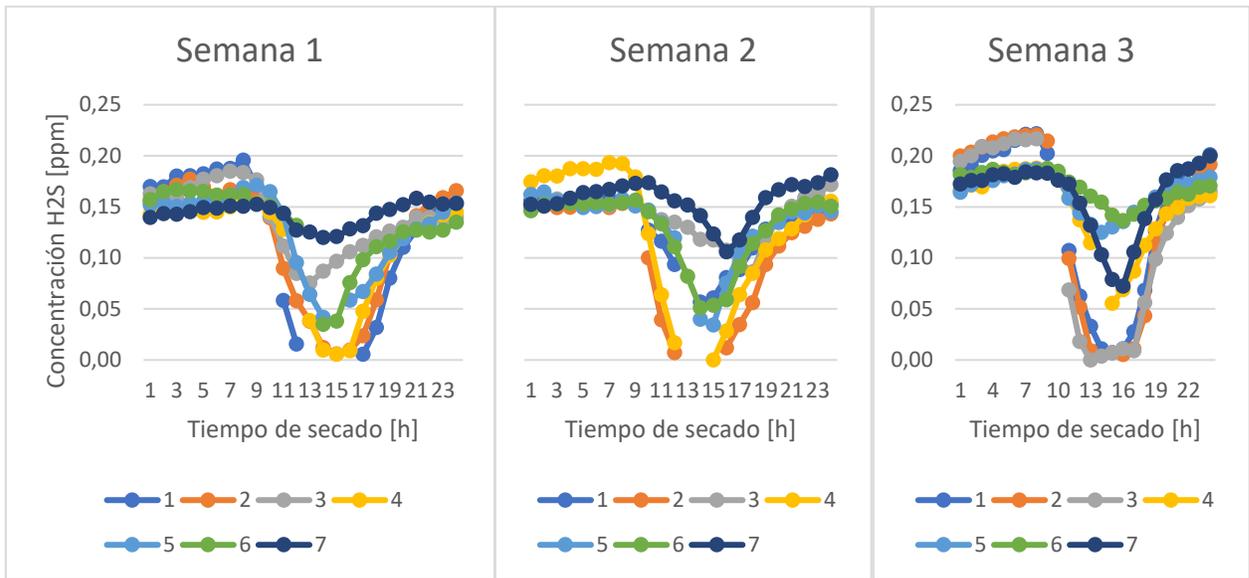


FIGURA 32: PILA 1, MEDICIÓN H2S INVERNADERO

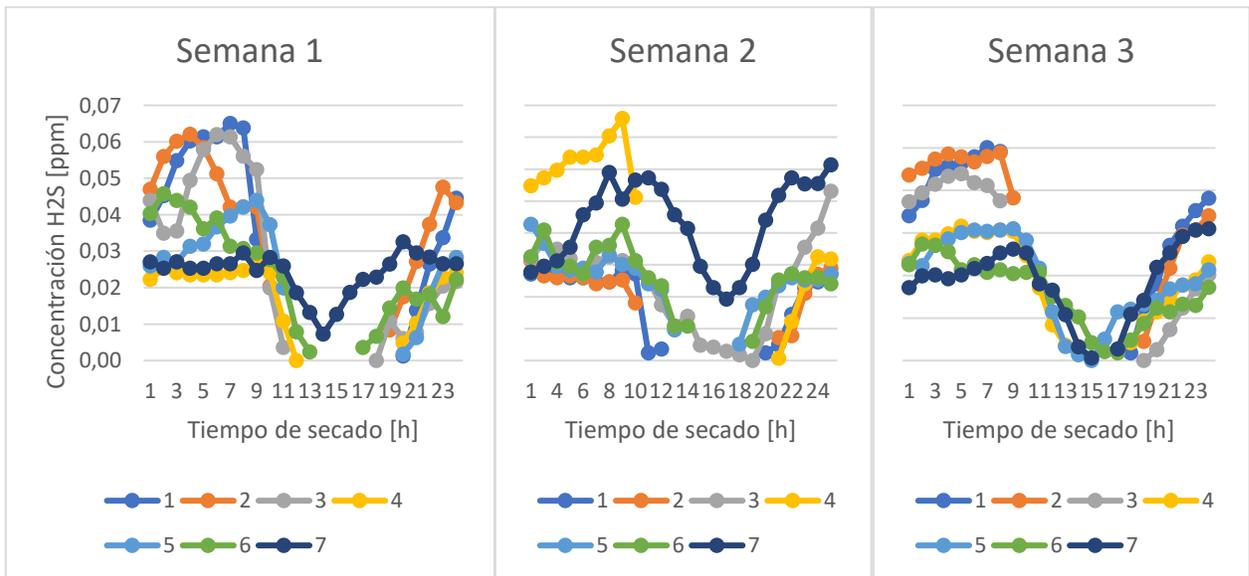


FIGURA 33: PILA 1, MEDICIÓN H2S FLUJO DE SALIDA

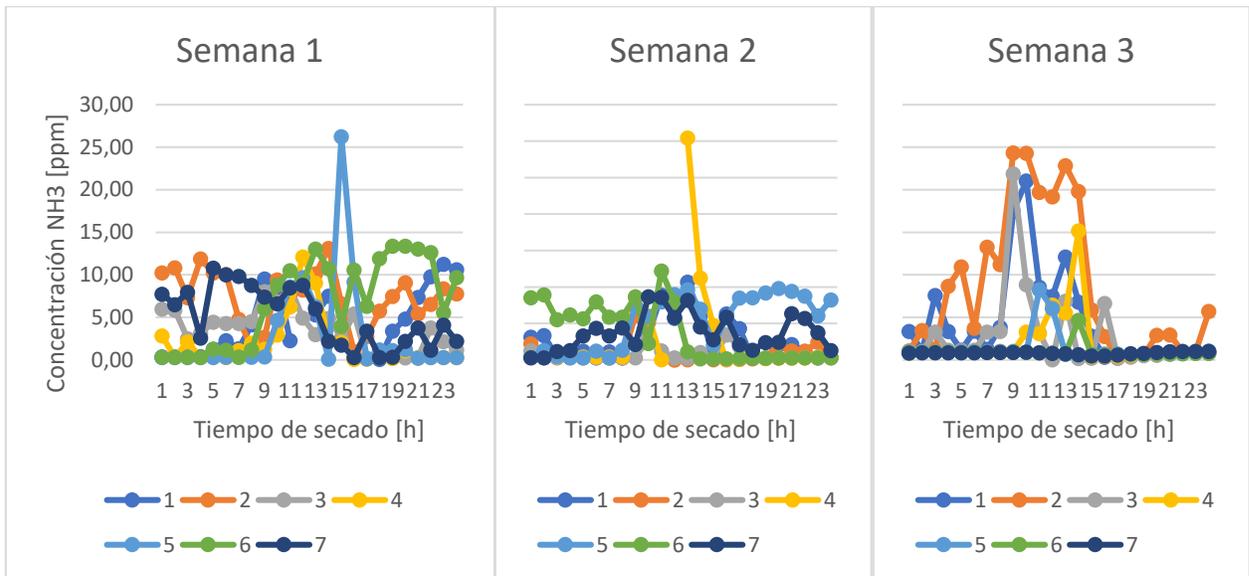


FIGURA 34: PILA 1, MEDICIÓN NH3 FLUJO DE SALIDA

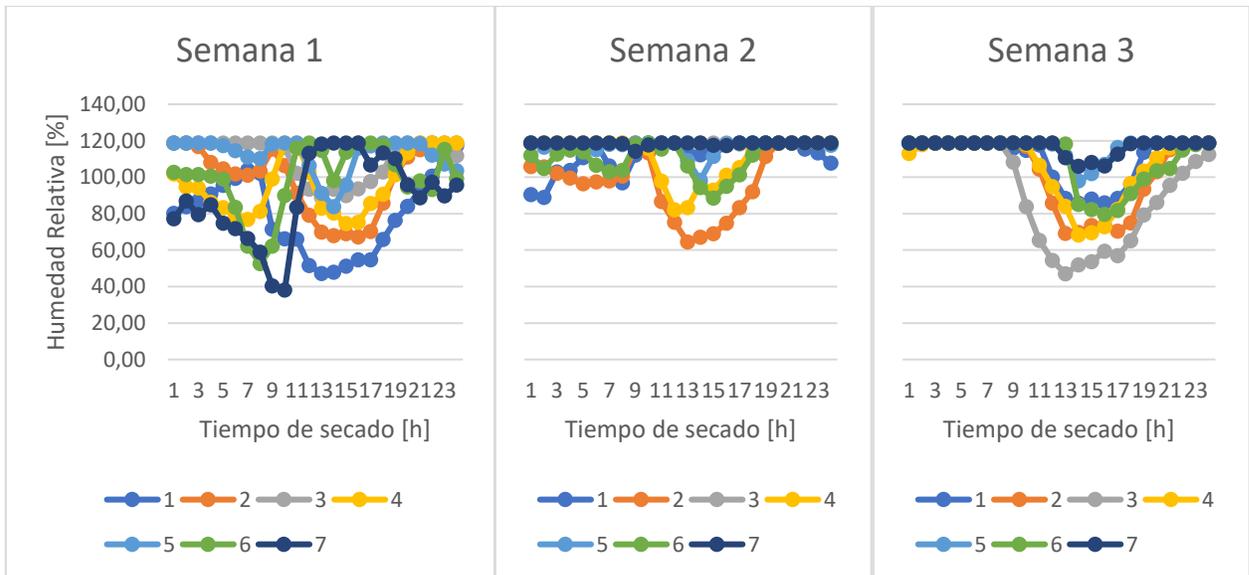


FIGURA 35: PILA 1, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA 1, EN INVERNADERO

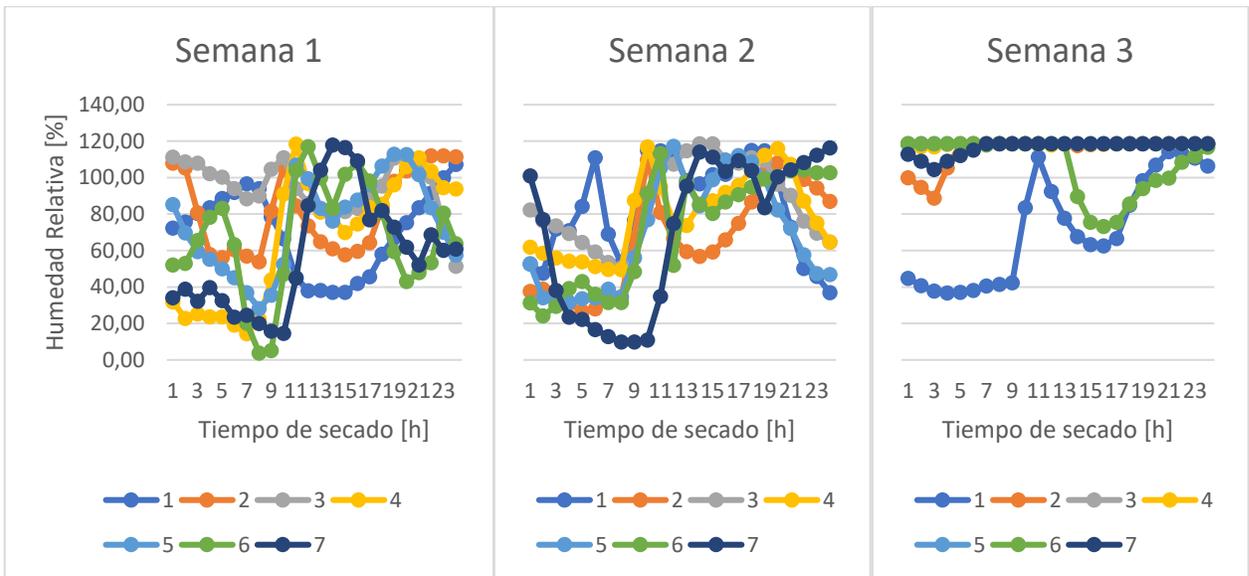


FIGURA 36: PILA 1, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA 2, EN INVERNADERO

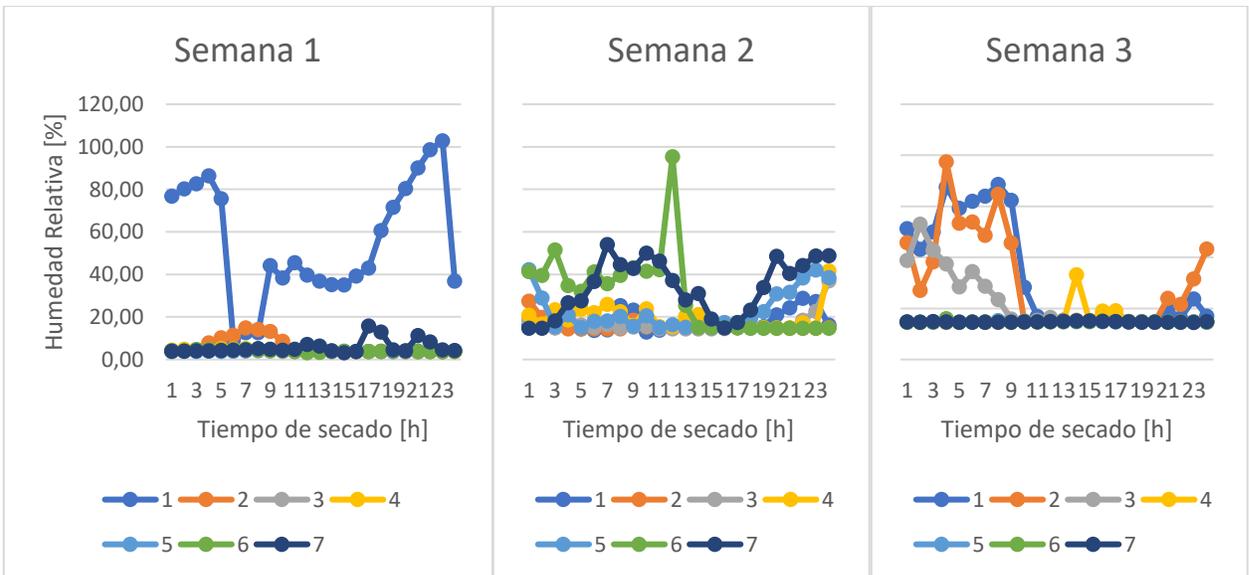


FIGURA 37: PILA 1, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA EN FLUJO DE SALIDA

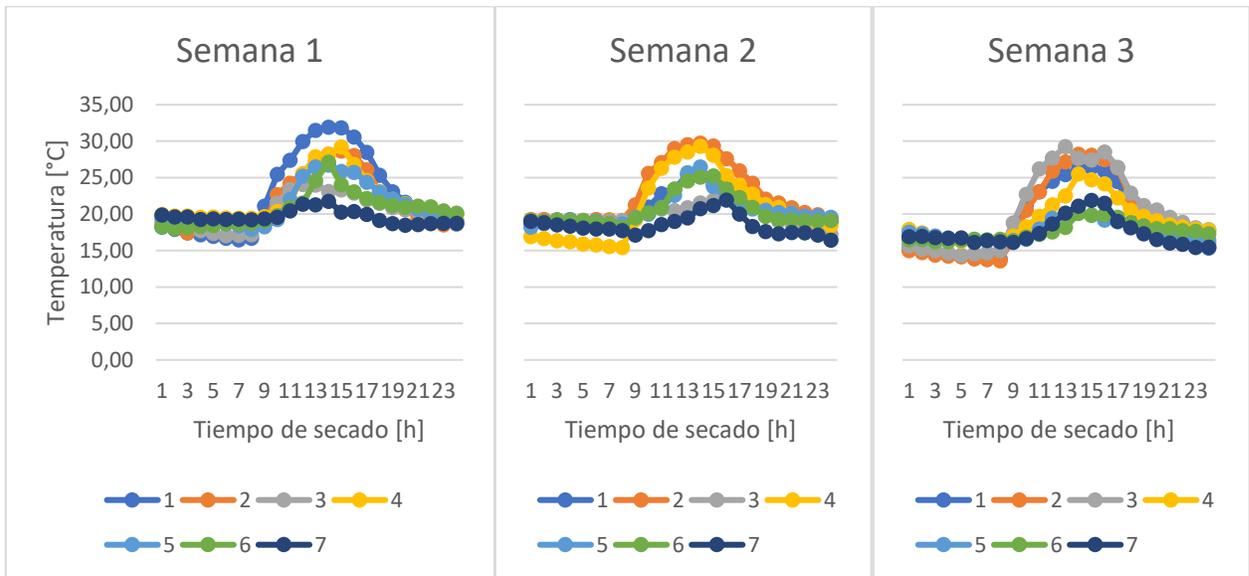


FIGURA 38: PILA 1, MEDICIÓN DE TEMPERATURA 1, EN INVERNADERO

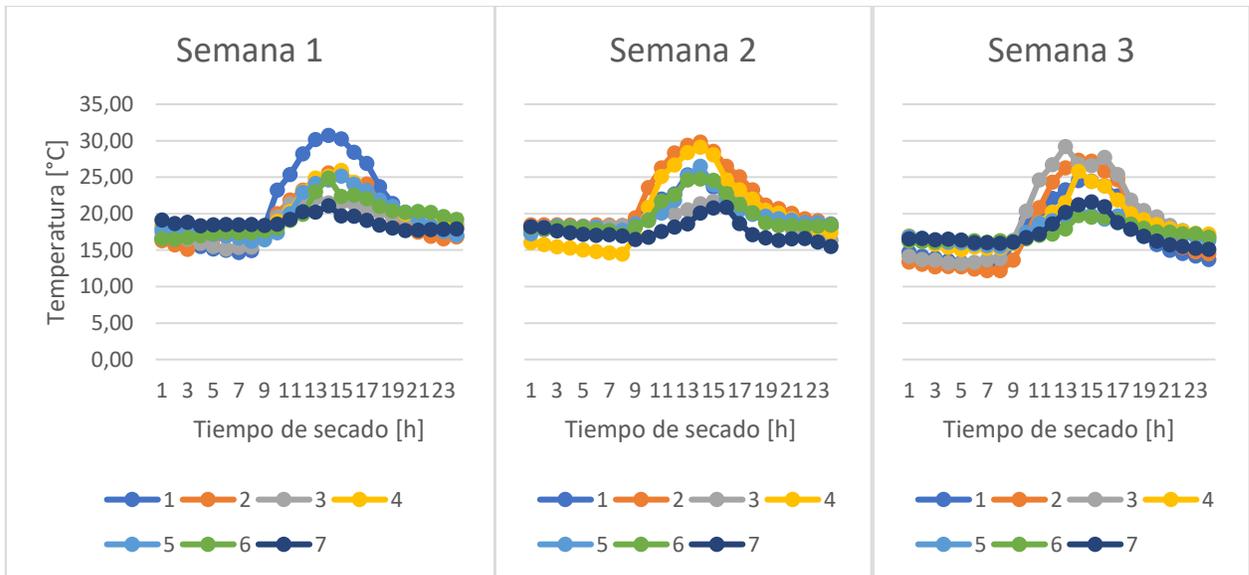


FIGURA 39: PILA 1, MEDICIÓN DE TEMPERATURA 2, EN INVERNADERO

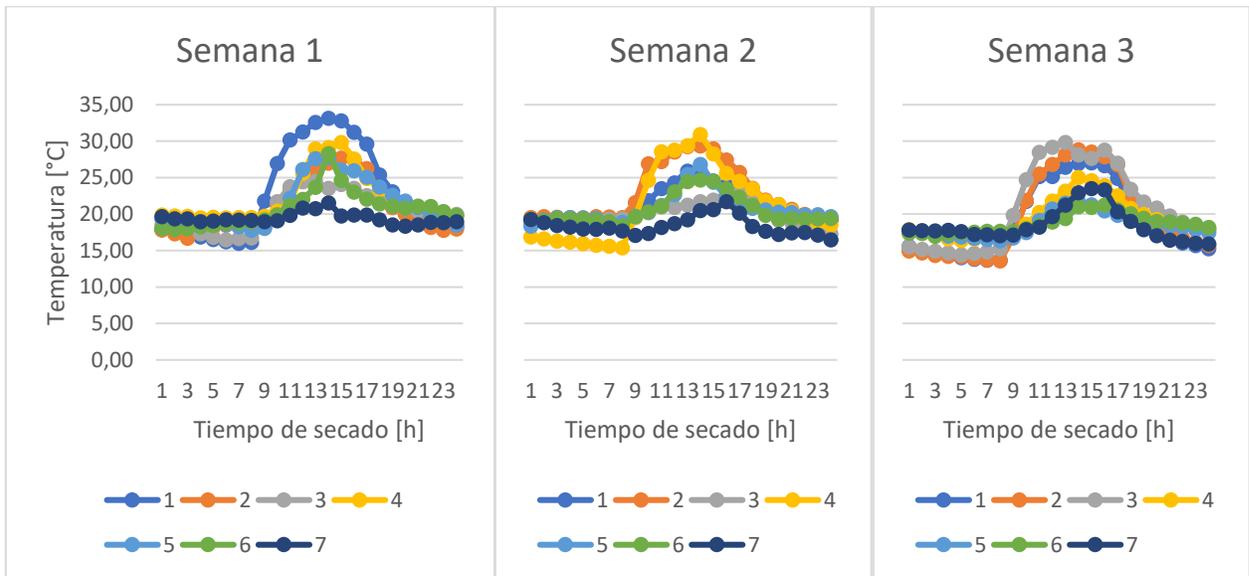


FIGURA 40: PILA 1, MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN FLUJO DE SALIDA

PILA 2

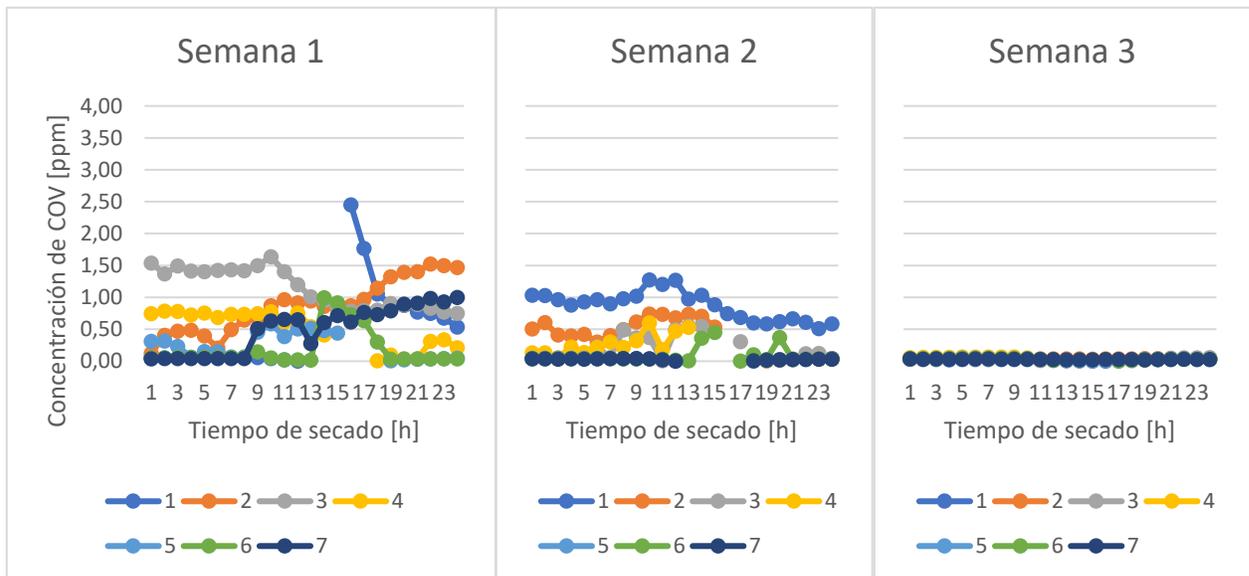


FIGURA 41: PILA 2, MEDICIÓN COV INVERNADERO

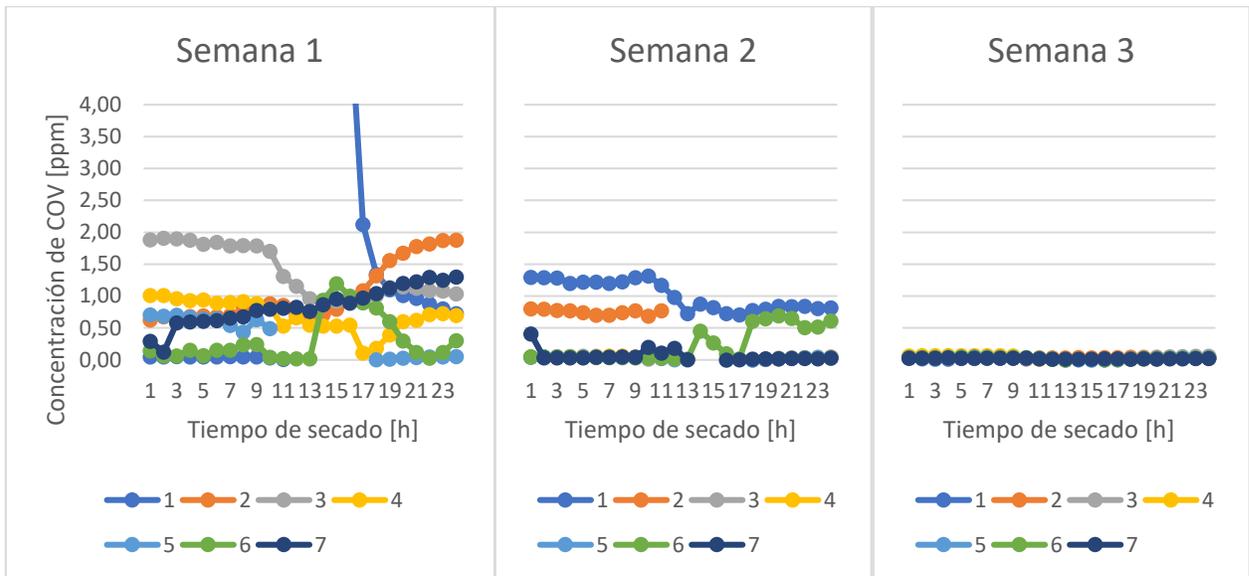


FIGURA 42: PILA 2, MEDICIÓN COV FLUJO DE SALIDA

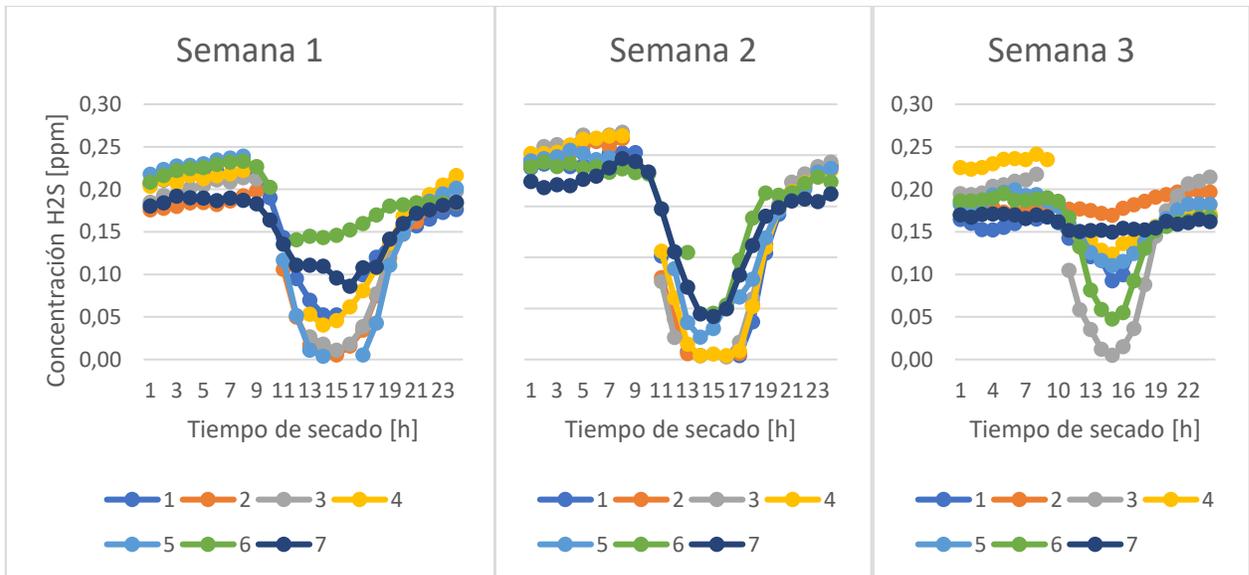


FIGURA 43: PILA 2, MEDICIÓN H2S INVERNADERO

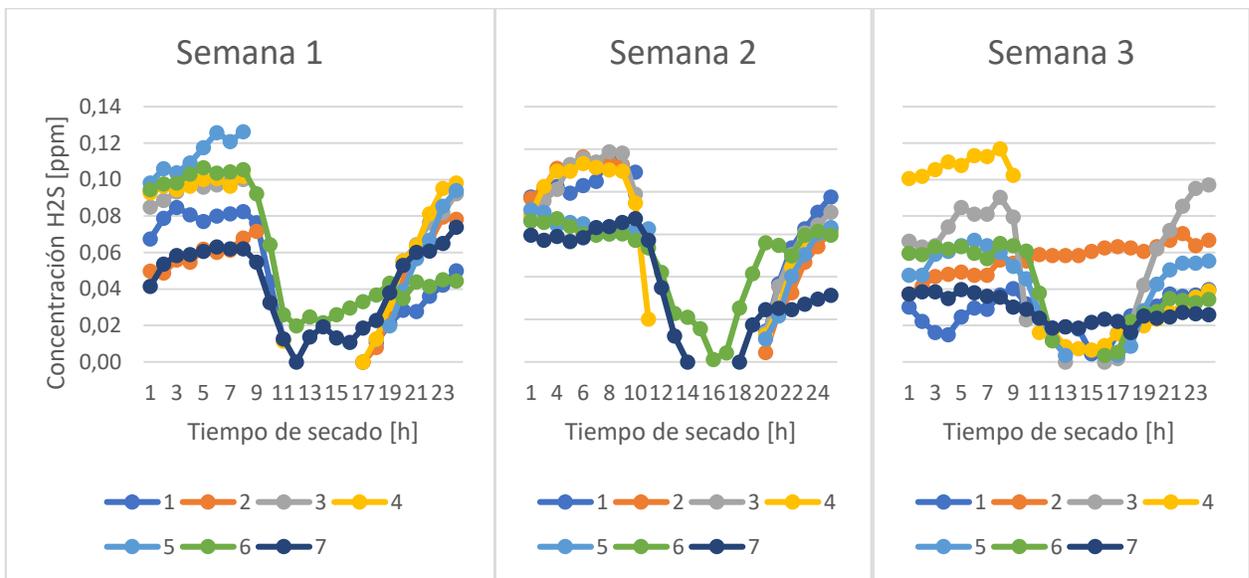


FIGURA 44: PILA 2, MEDICIÓN H2S FLUJO DE SALIDA

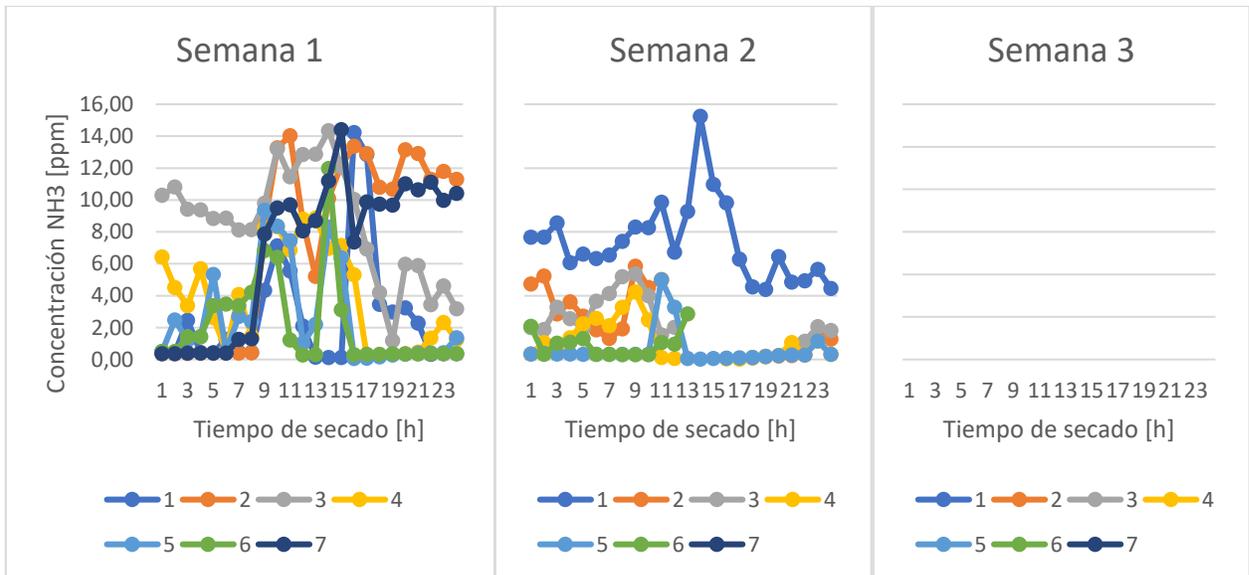


FIGURA 45: PILA 2, MEDICIÓN NH3 FLUJO DE SALIDA

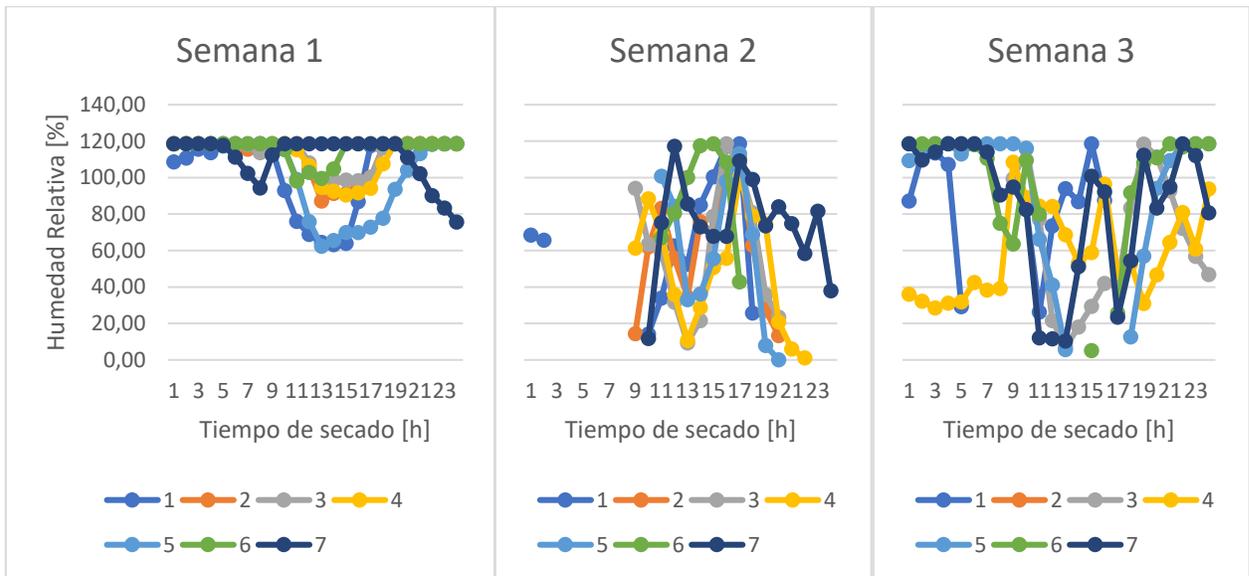


FIGURA 46: PILA 2, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA 1, EN INVERNADERO

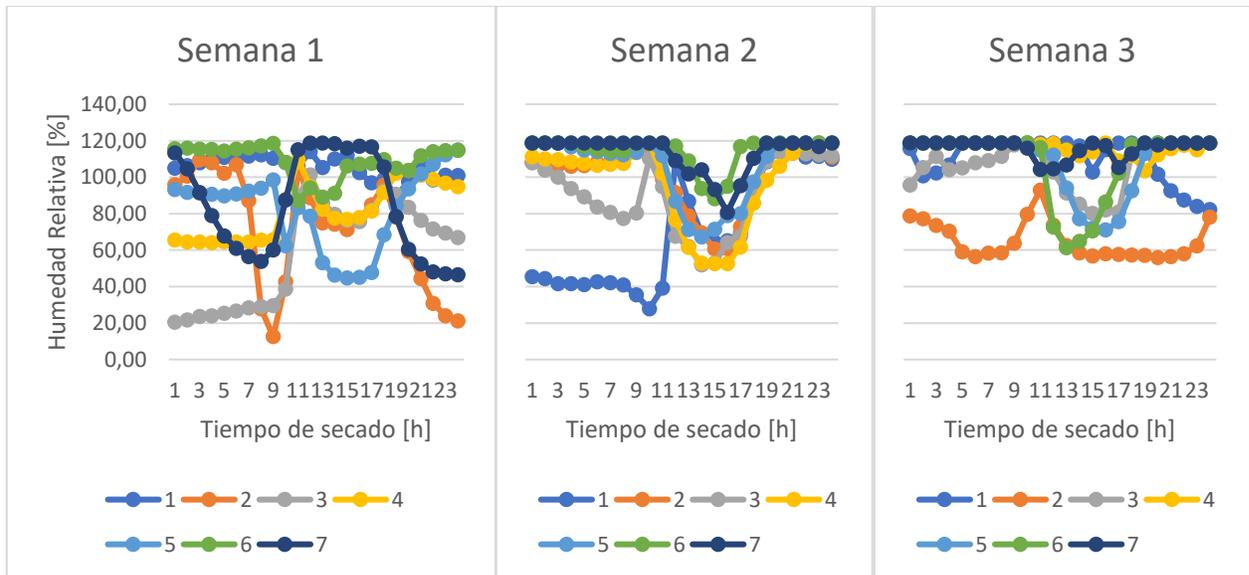


FIGURA 47: PILA 2, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA 2, EN INVERNADERO

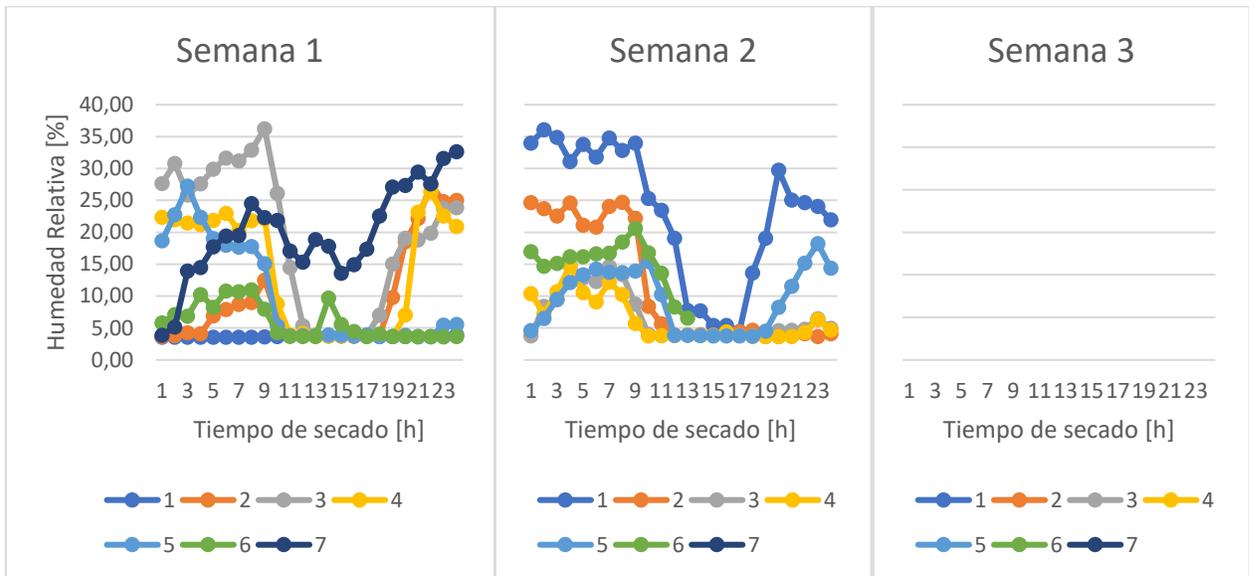


FIGURA 48: PILA 2, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA EN FLUJO DE SALIDA

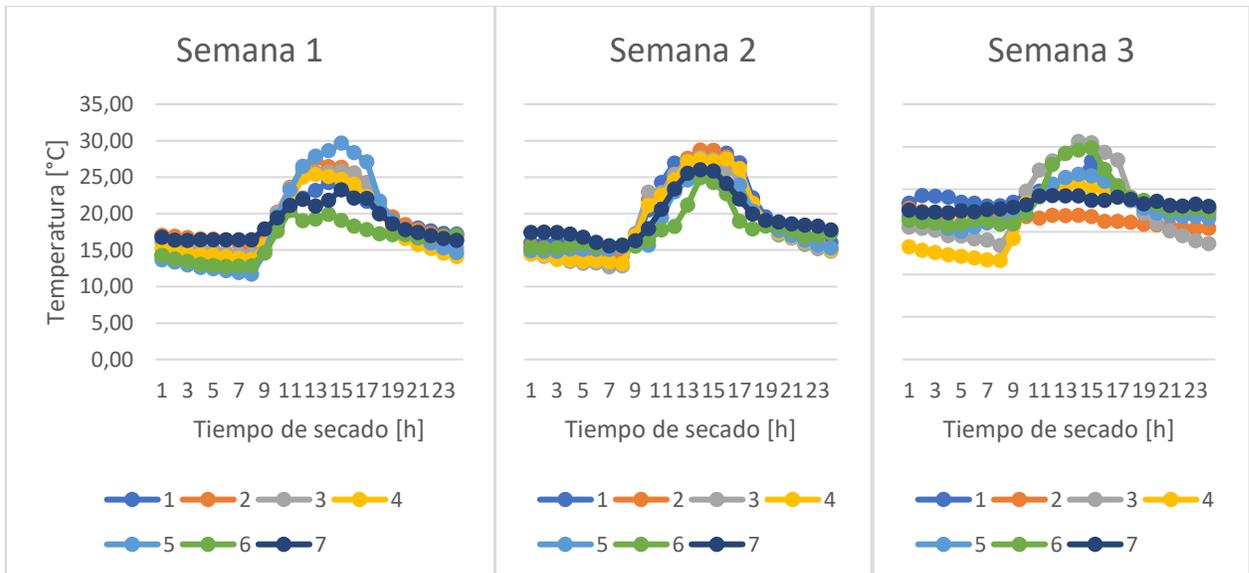


FIGURA 49: PILA 2, MEDICIÓN DE TEMPERATURA 1, EN INVERNADERO

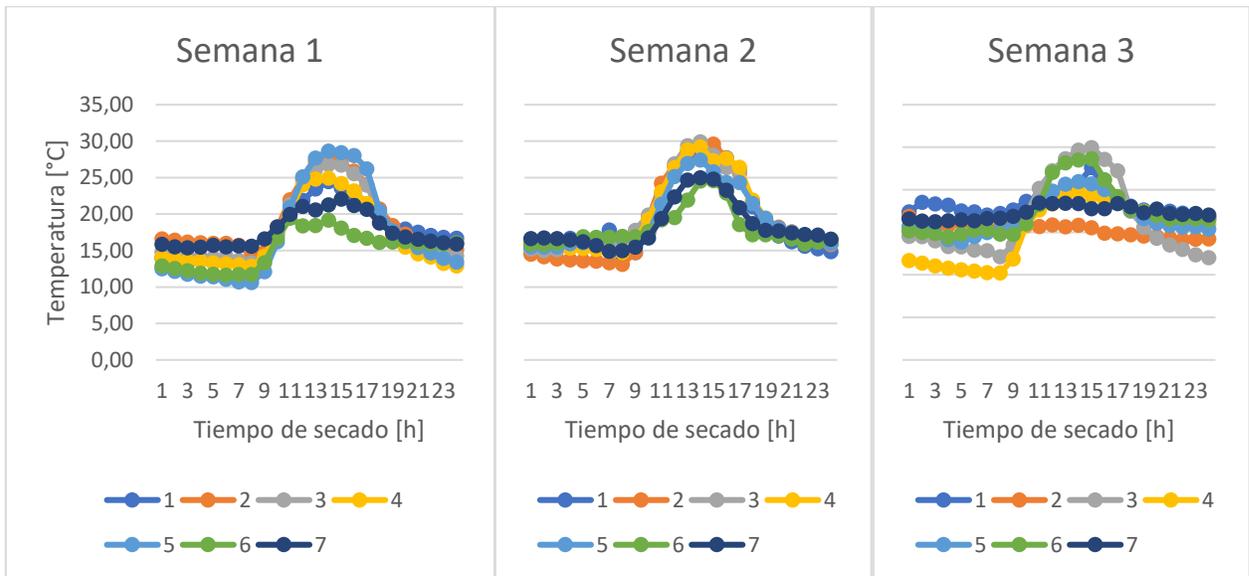


FIGURA 50: PILA 2, MEDICIÓN DE TEMPERATURA 2, EN INVERNADERO

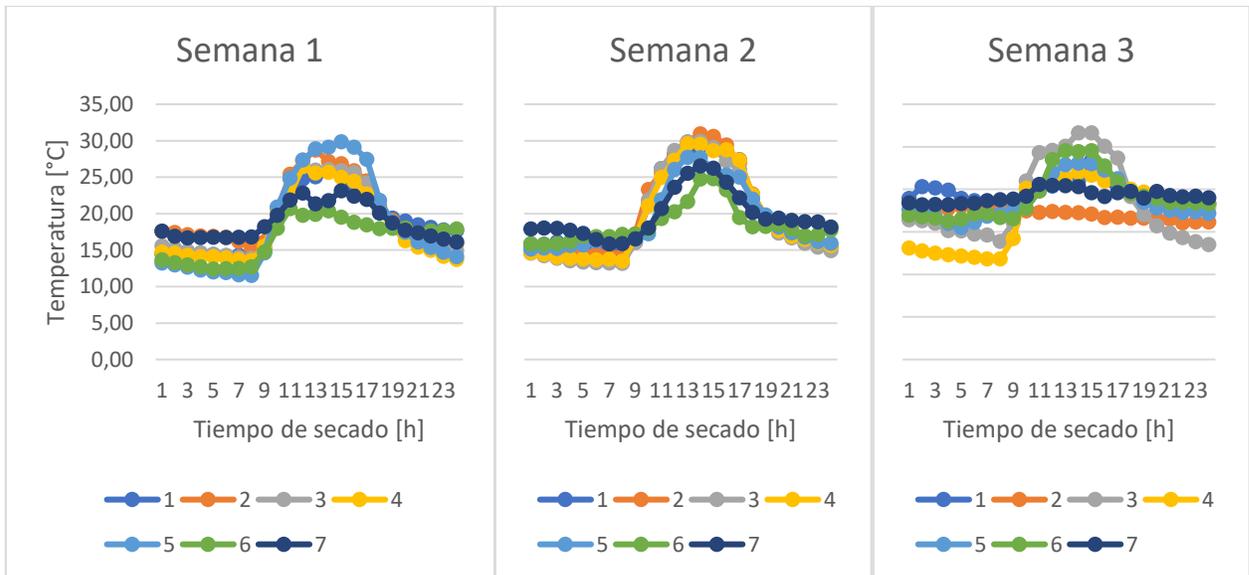


FIGURA 51: PILA 2, MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN FLUJO DE SALIDA

PILA 3

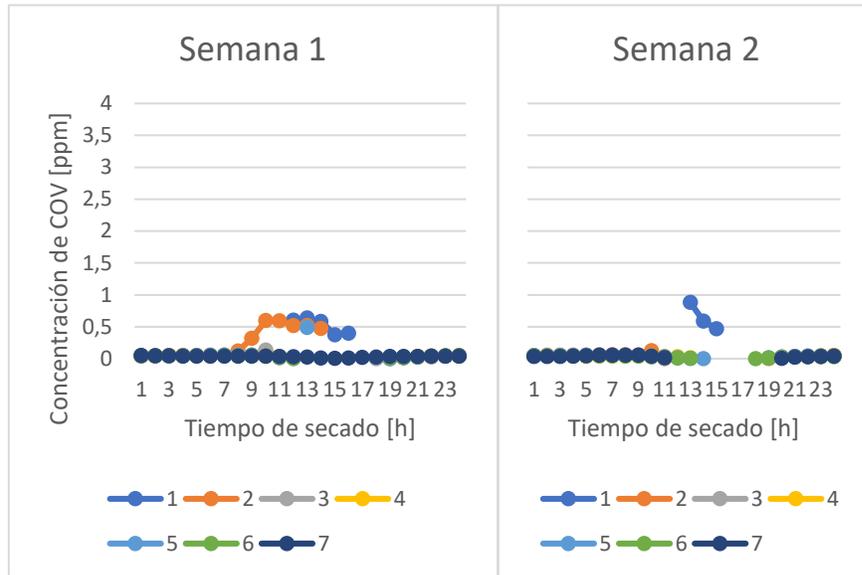


FIGURA 52: PILA 3, MEDICIÓN COV INVERNADERO

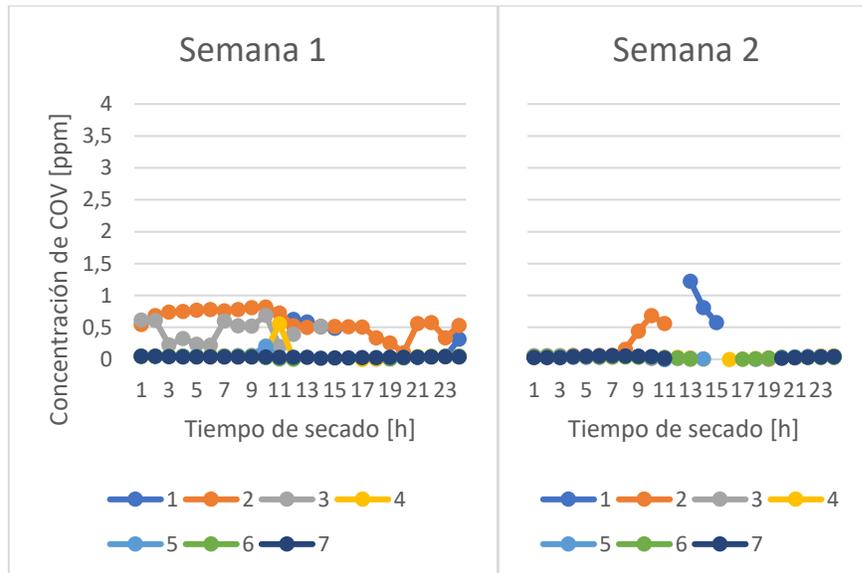


FIGURA 53: PILA 3, MEDICIÓN COV FLUJO DE SALIDA

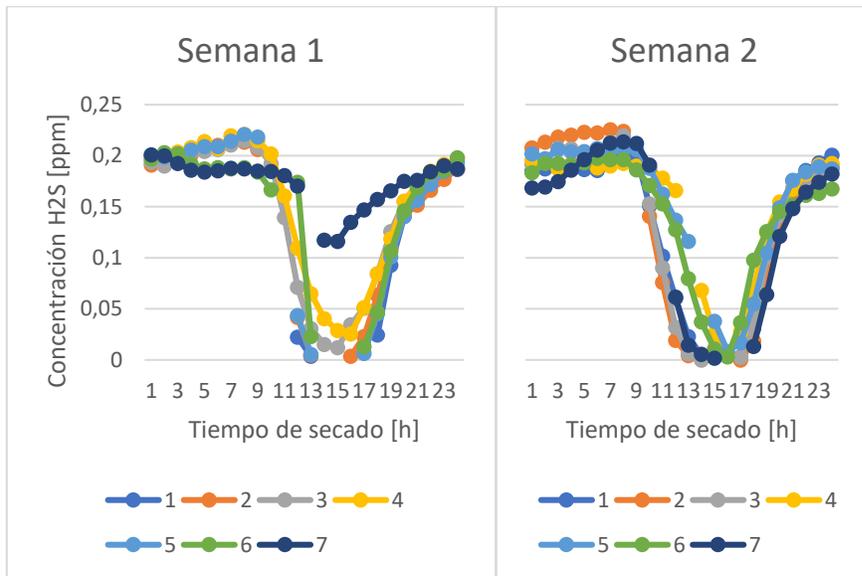


FIGURA 54: PILA 3, MEDICIÓN H₂S INVERNADERO

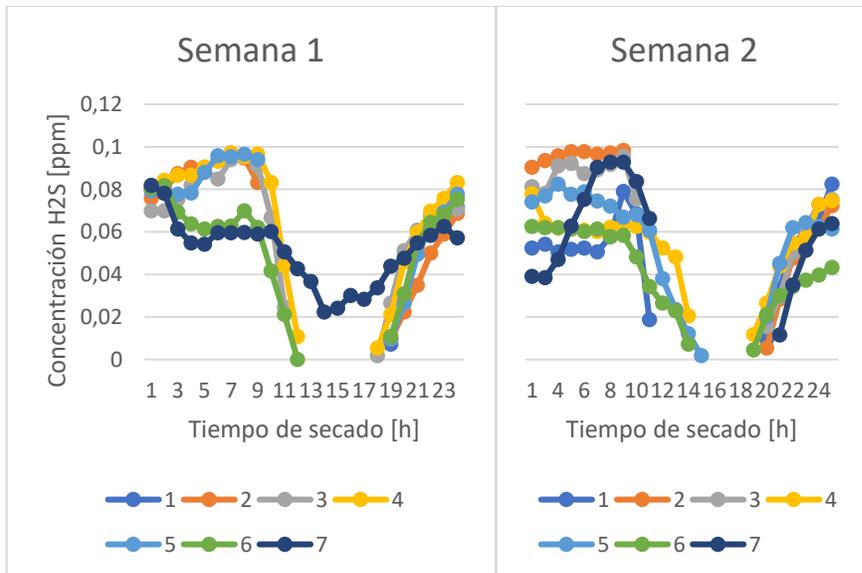


FIGURA 55: PILA 3, MEDICIÓN H₂S FLUJO DE SALIDA

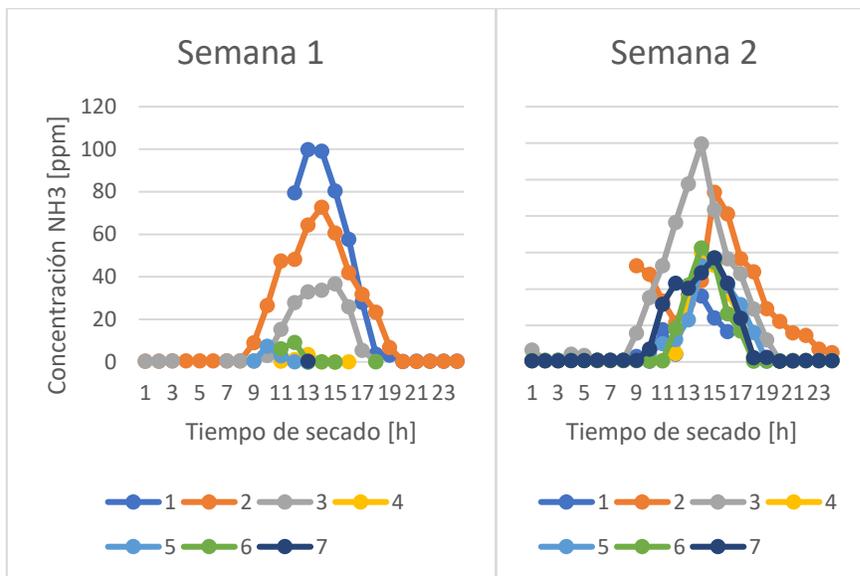


FIGURA 56: PILA 3, MEDICIÓN NH3 FLUJO DE SALIDA

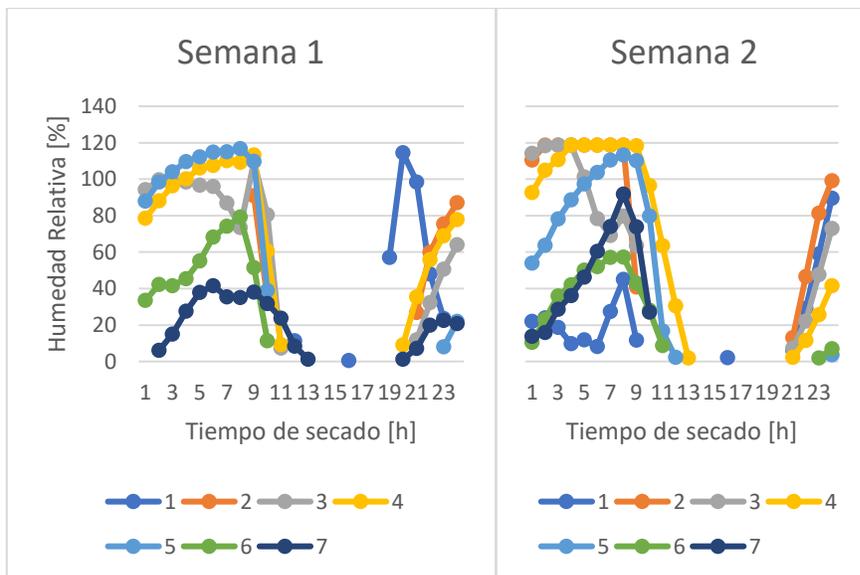


FIGURA 57: PILA 3, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA 1, EN INVERNADERO

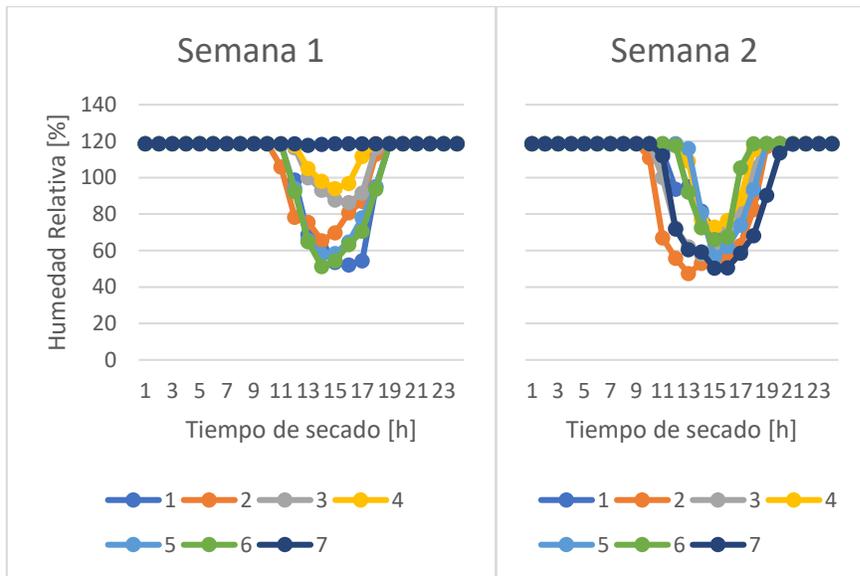


FIGURA 58: PILA 3, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA 2, EN INVERNADERO

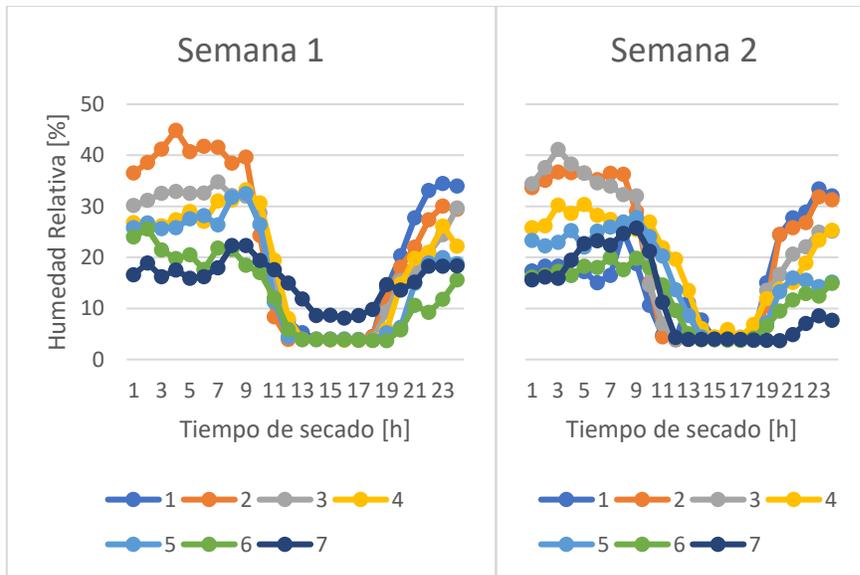


FIGURA 59: PILA 3, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA EN FLUJO DE SALIDA

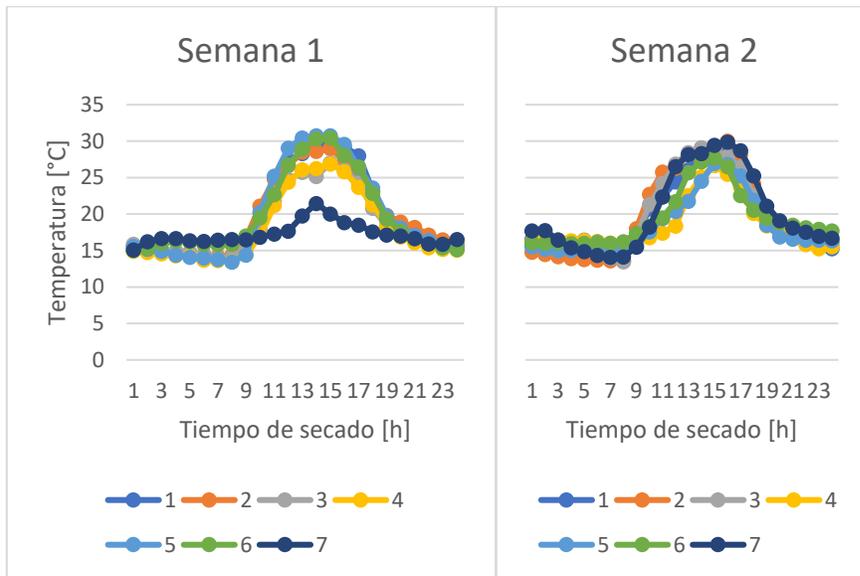


FIGURA 60: PILA 3, MEDICIÓN DE TEMPERATURA 1, EN INVERNADERO

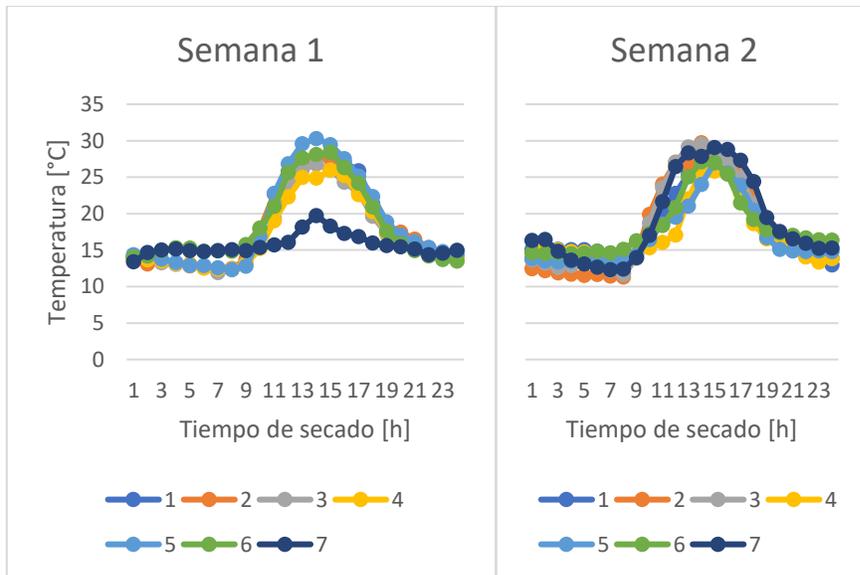


FIGURA 61: PILA 3, MEDICIÓN DE TEMPERATURA 2, EN INVERNADERO

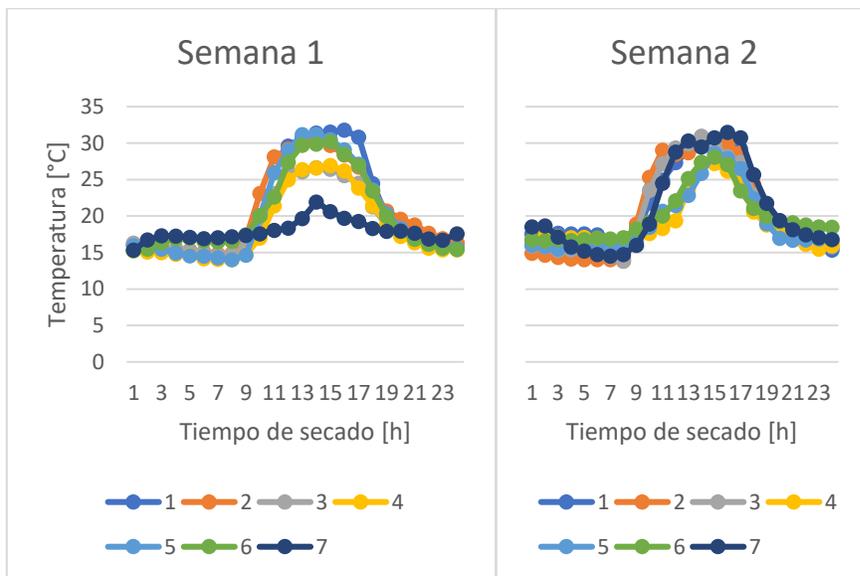


FIGURA 62: PILA 3, MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN FLUJO DE SALIDA

PILA 4

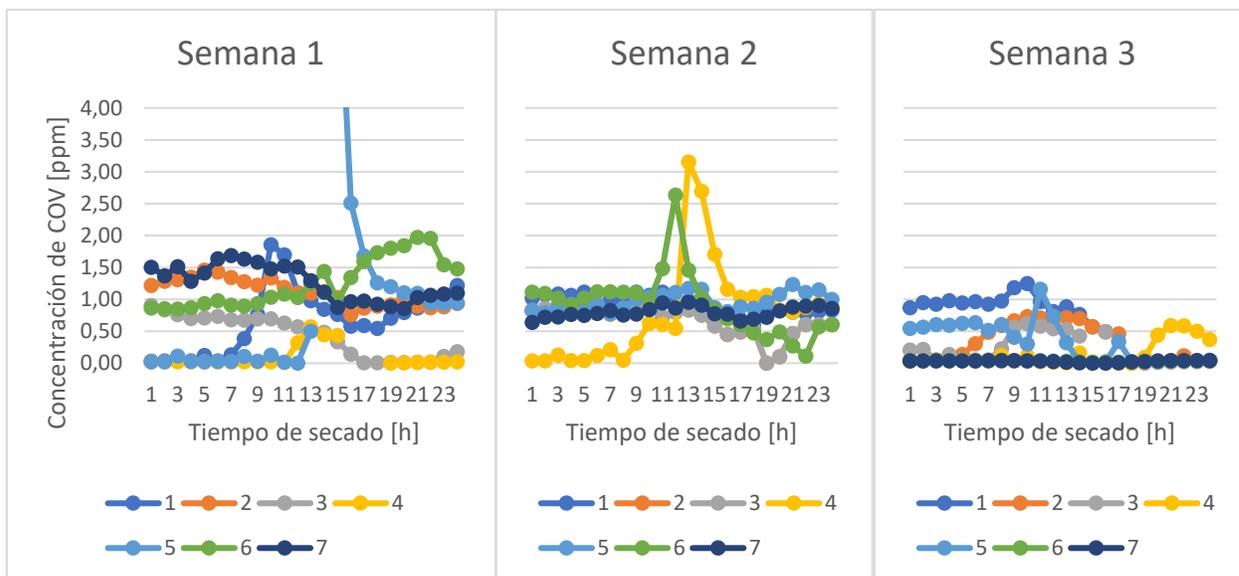


FIGURA 63: PILA 4, MEDICIÓN COV INVERNADERO

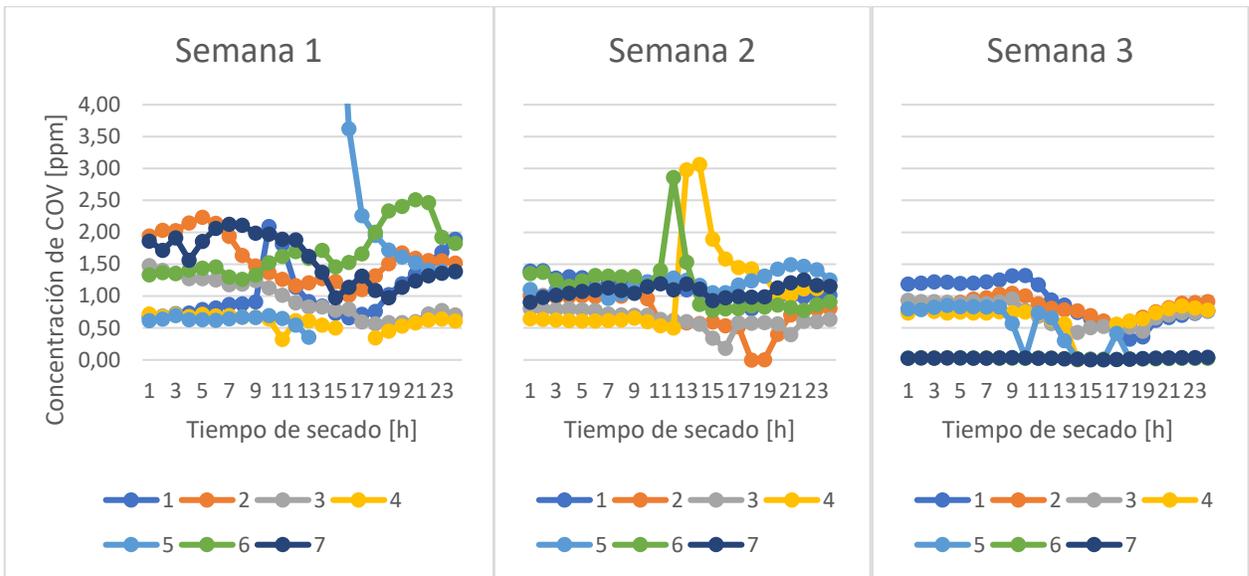


FIGURA 64: PILA 4, MEDICIÓN COV FLUJO DE SALIDA

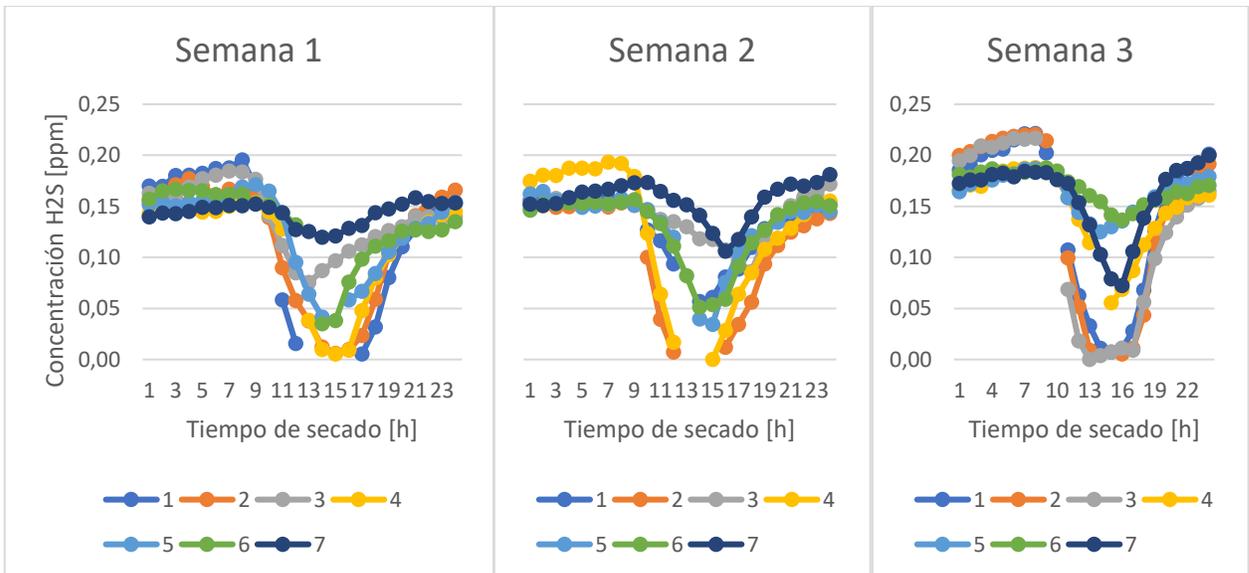


FIGURA 65: PILA 4, MEDICIÓN H₂S INVERNADERO

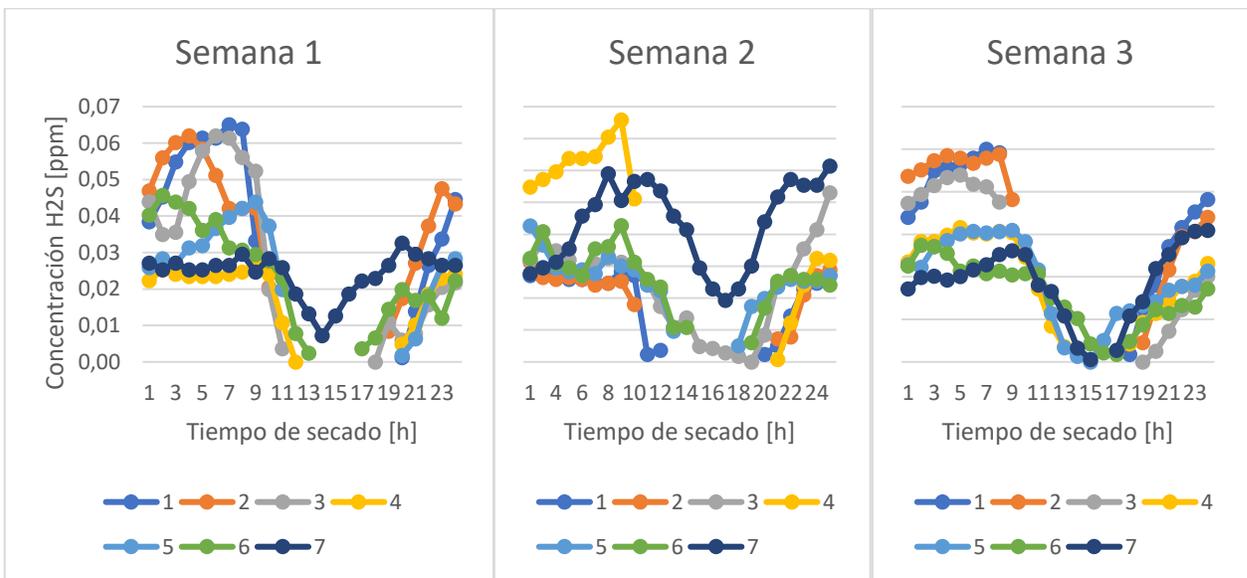


FIGURA 66: PILA 4, MEDICIÓN H₂S FLUJO DE SALIDA

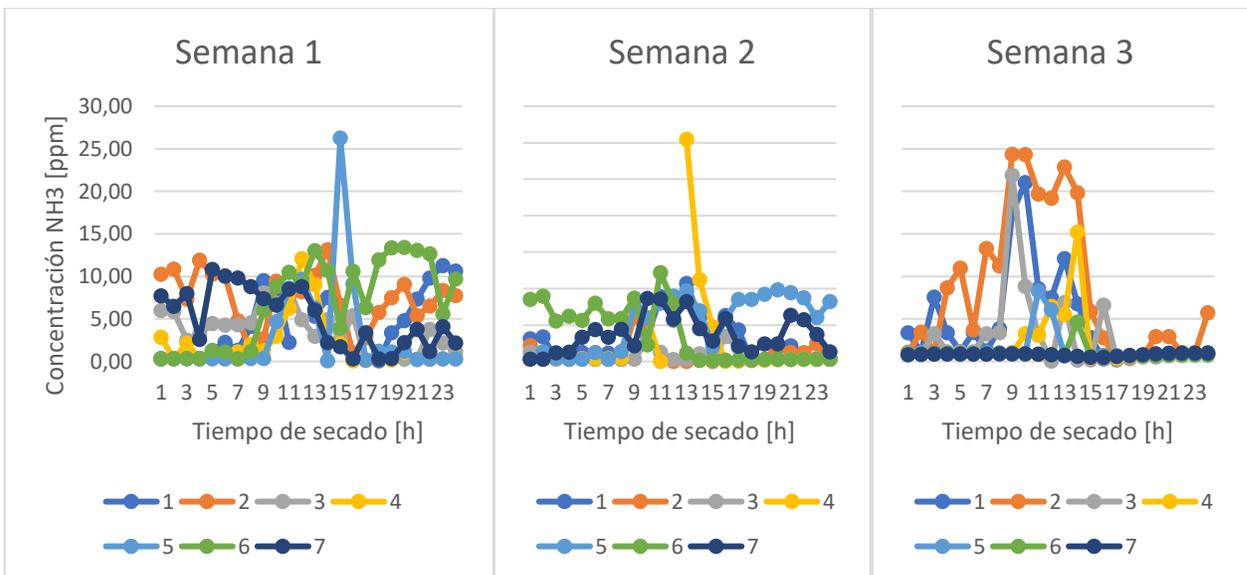


FIGURA 67: PILA 4, MEDICIÓN NH₃ FLUJO DE SALIDA

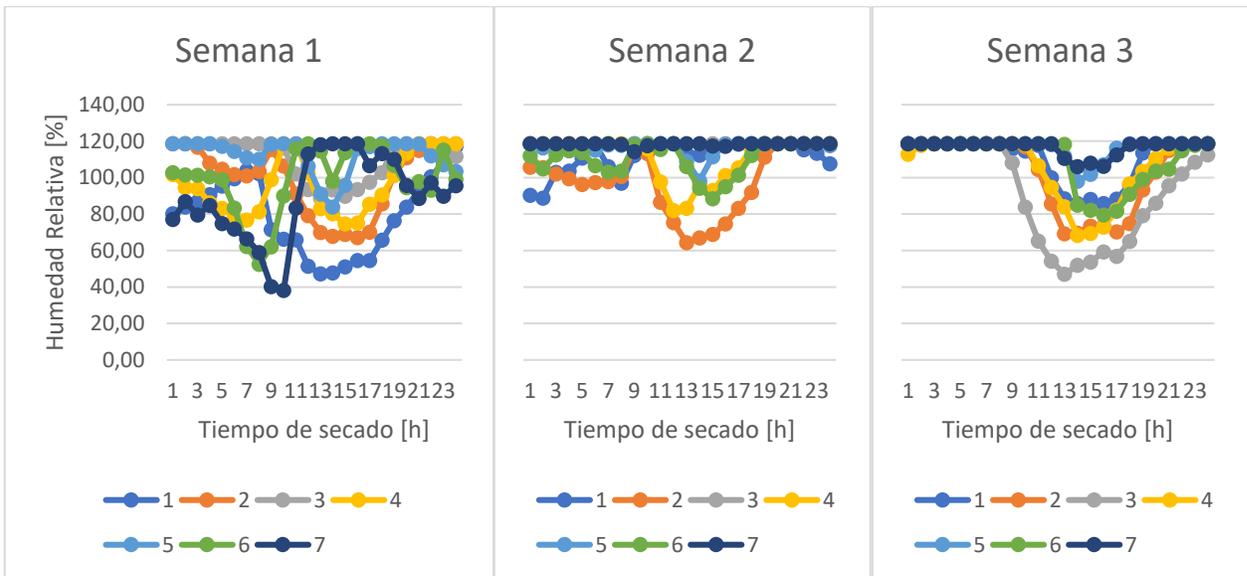


FIGURA 68: PILA 4, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA 1, EN INVERNADERO

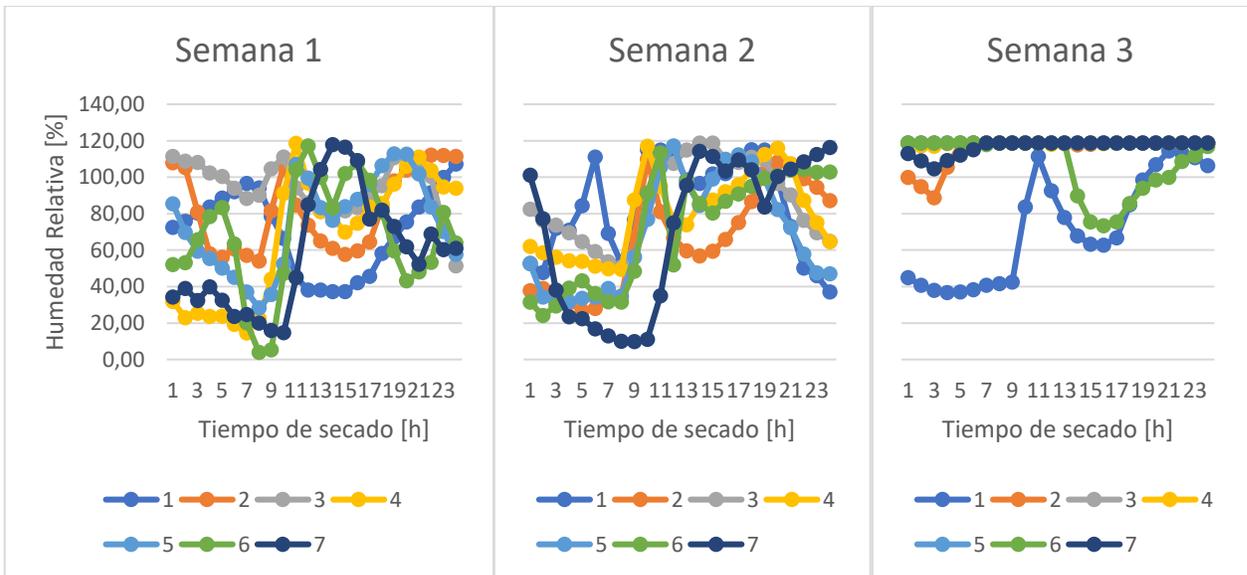


FIGURA 69: PILA 4, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA 2, EN INVERNADERO

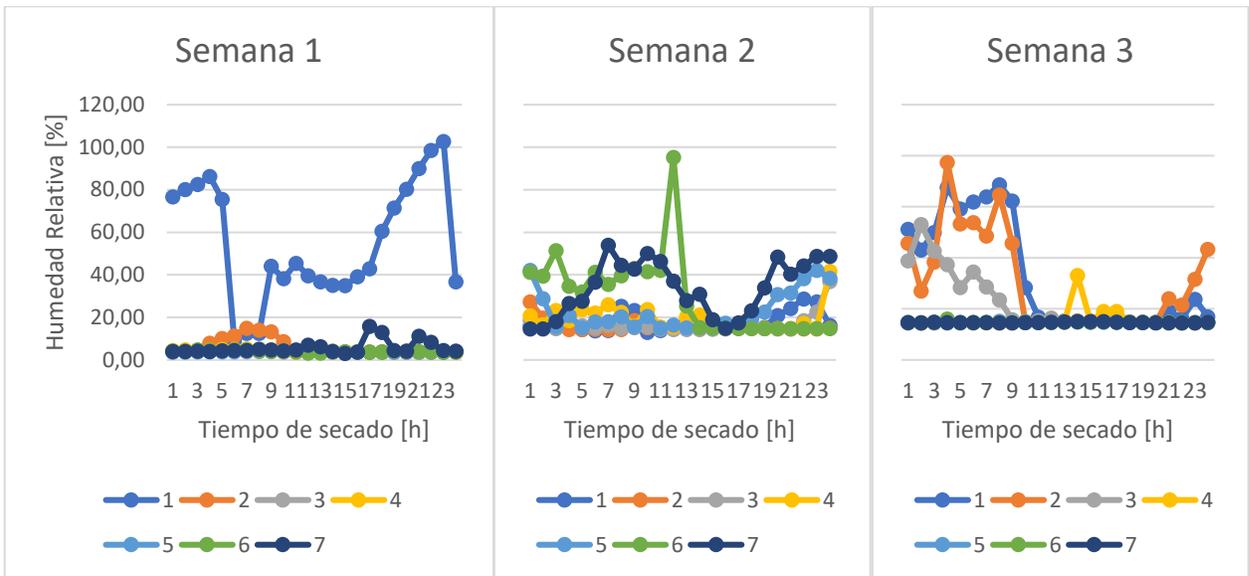


FIGURA 70: PILA 4, MEDICIÓN HUMEDAD RELATIVA EN FLUJO DE SALIDA

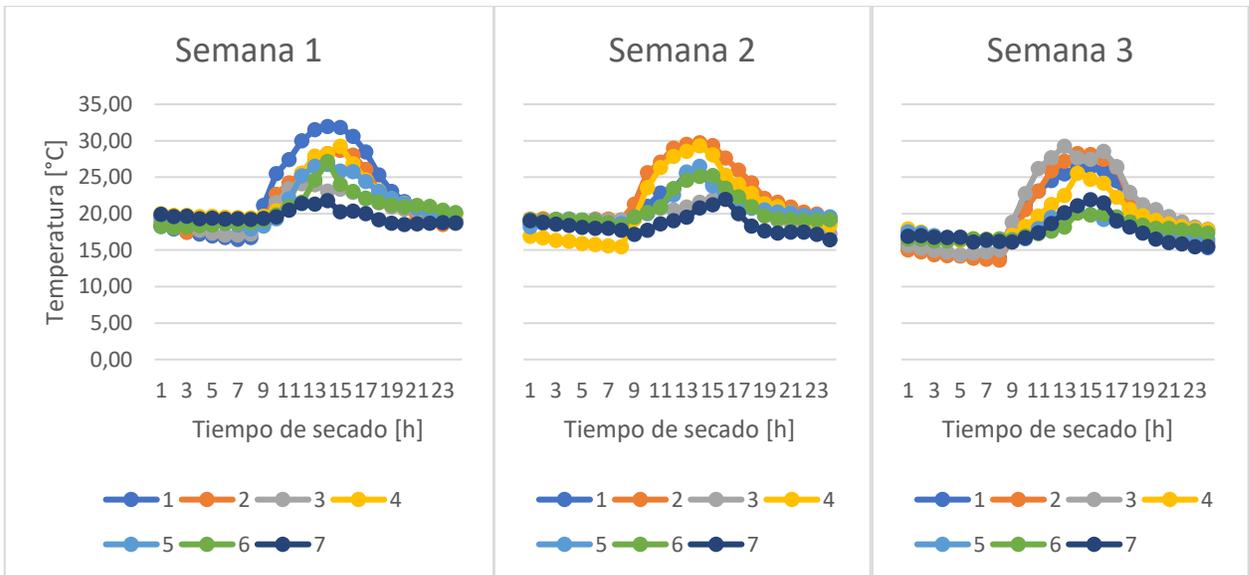


FIGURA 71: PILA 4, MEDICIÓN DE TEMPERATURA 1, EN INVERNADERO

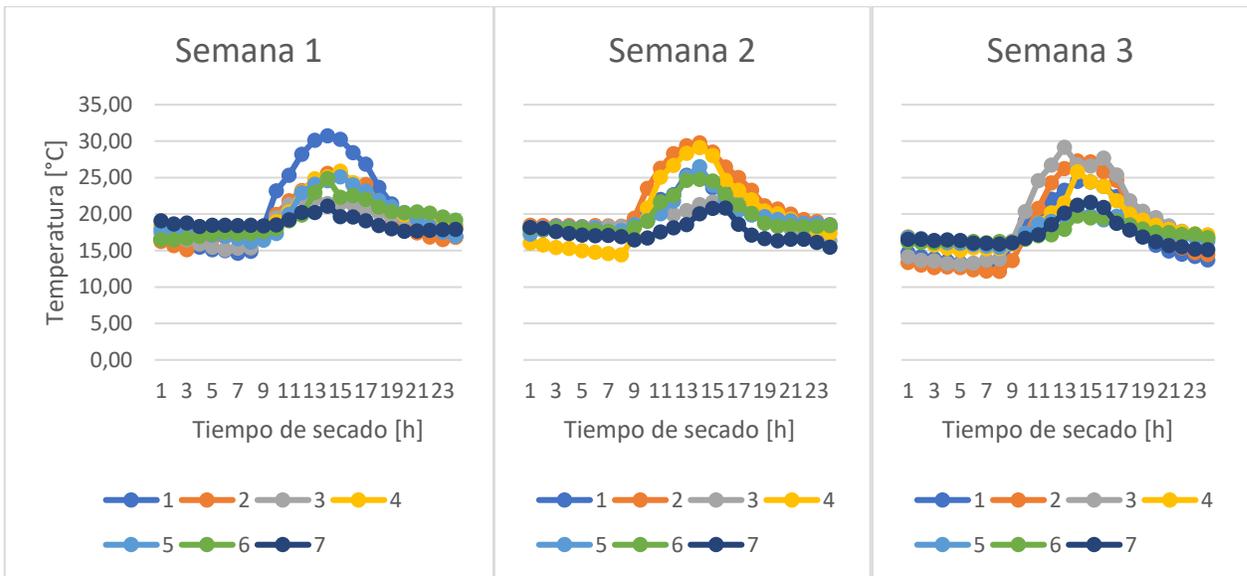


FIGURA 72: PILA 4, MEDICIÓN DE TEMPERATURA 2, EN INVERNADERO

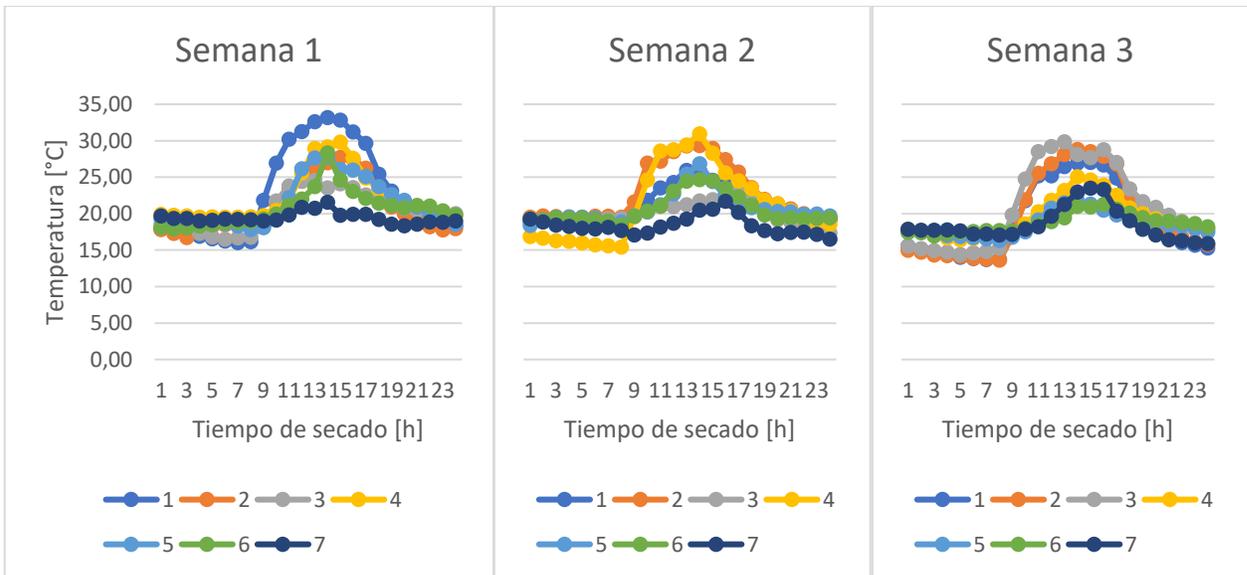


FIGURA 73: PILA 4, MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN FLUJO DE SALIDA

10.3. ANEXO 3: PROPORCIÓN DE HUMEDAD EN AIRE SECO, X

La proporción de agua en el aire seco X está dada por la Ecuación (40)

$$X = \frac{m_w}{m_{da}} \quad (40)$$

Considerando la base de cálculo de 1 metro cúbico, la masa de aire seco en dicho volumen está dada por su densidad ρ_{da} . Por otro lado, la masa de agua en el mismo volumen está dada por la concentración másica de humedad, ésta puede expresarse, considerando gas ideal, como:

$$C_w = \frac{n_w}{V_w} \cdot MM_w = \frac{P_w}{RT_w} \cdot MM_w \quad (41)$$

A su vez, la presión de agua en el aire puede determinarse de la siguiente manera:

$$P_w = P_{sat} \cdot HR \quad (42)$$

Donde la presión de saturación se puede determinar como indica la siguiente ecuación [9]:

$$P_{sat} = \exp\left(A + \frac{B}{C + T_w}\right) \quad (43)$$

Con los siguientes valores para los coeficientes [9]:

TABLA 18: COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE SATURACIÓN

A	16,262
B	-3800
C	226,3

10.4. ANEXO 4: CALOR ESPECÍFICO DE LA PILA, c_{pp}

El calor específico de la pila está dado por la Ecuación (34), expresión que puede reescribirse como:

$$c_{pp} = \frac{36}{43} c_{pb} + \frac{7}{43} c_{pes} \quad (44)$$

Donde el subíndice b se utiliza para la mezcla del biosólido húmedo y el seco. El calor asociado a dicha mezcla está dado por:

$$c_{pb} = c_{po} + X \cdot c_{pw} \quad (45)$$

Donde el subíndice o denota a la materia orgánica sin humedad, este valor está reportado siendo [33]:

$$c_{po} = 1434 + 3,29 \cdot T_p \quad (46)$$

Donde T_p es la temperatura de la pila en grados Celsius.

10.5. ANEXO 5: DIFERENCIAS FINITAS: CONCENTRACIÓN EN LA PILA

Considerando la geometría adoptada sobre la Ecuación (5) la expresión a resolver está dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{r} \cdot \left[\frac{\partial C}{\partial t} + r \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} \right] \quad (47)$$

Utilizando el método de diferencias finitas para las derivadas la expresión anterior puede aproximarse a:

$$\frac{C_{t+\Delta t}^r - C_t^r}{\Delta t} = \frac{D}{r} \left[\frac{C_t^{r+\Delta r} - C_t^r}{\Delta x} + r \frac{C_t^{r+\Delta r} - 2C_t^r + C_t^{r-\Delta r}}{\Delta x^2} \right] \quad (48)$$

Calculando de esta manera la concentración $C(r, t + 1)$ a partir de $C(r, t)$:

$$C_{t+\Delta t}^r = C_t^r + \frac{D \cdot \Delta t}{r} \left[\frac{C_t^{r+\Delta r} - C_t^r}{\Delta x} + r \frac{C_t^{r+\Delta r} - 2C_t^r + C_t^{r-\Delta r}}{\Delta x^2} \right] \quad (49)$$

La elección de los pasos Δt y Δr deben cumplir condiciones de estabilidad para evitar que el resultado del modelo diverja [24]. La condición por cumplir se presenta en la Ecuación (50) [23]:

$$\mathcal{D} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} < \frac{1}{2} \quad (50)$$

10.6. ANEXO 6: DIFERENCIAS FINITAS: TEMPERATURA DE LA PILA

Considerando la geometría adoptada sobre la Ecuación (15) la expresión a resolver está dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \rho c_p = \dot{q}_{gen} + \frac{k}{r} \cdot \left[\frac{\partial T}{\partial t} + r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right] \quad (51)$$

Utilizando el método de diferencias finitas para las derivadas, la expresión anterior puede aproximarse a:

$$\frac{T_{t+\Delta t}^r - T_t^r}{\Delta t} \rho c_p = \dot{q}_{gen} + \frac{k}{r} \cdot \left[\frac{T_t^{r+\Delta r} - T_t^r}{\Delta t} + r \frac{T_t^{r+\Delta r} - 2T_t^r + T_t^{r-\Delta r}}{\Delta t^2} \right] \quad (52)$$

Calculando, de esta manera, la temperatura $T(r, t + 1)$ a partir de la temperatura en el periodo de tiempo anterior:

$$T_{t+\Delta t}^r = T_t^r + \frac{\Delta t}{\rho c_p} \left(\dot{q}_{gen} + \frac{k}{r} \cdot \left[\frac{T_t^{r+\Delta r} - T_t^r}{\Delta t} + r \frac{T_t^{r+\Delta r} - 2T_t^r + T_t^{r-\Delta r}}{\Delta t^2} \right] \right) \quad (53)$$

10.7. ANEXO 7: BALANCE DE AGUA EN EL INVERNADERO

A partir de las Ecuaciones (9) a (14) el balance de agua dentro del invernadero está dado por:

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = F_{v,e} \cdot C_e - F_{v,s} \cdot C_s + F_{evap} \quad (54)$$

Expresión, que de manera análoga a los Anexo 5 y Anexo 6, puede utilizarse para encontrar la concentración en el tiempo a partir de una condición temporal anterior:

$$C_{i_{t+\Delta t}} = C_{i_t} + \frac{\Delta t}{V_i} (F_{v,e} \cdot C_{e_t} - F_{v,s} \cdot C_{s_t} + F_{evap_t}) \quad (55)$$

Asumiendo agitación perfecta dentro del invernadero producto de los ventiladores que este posee se considera que la concentración de salida es la misma dentro del invernadero ($C_i = C_s$)

Las concentraciones de agua en el aire se pueden calcular a partir de la Ecuación (41), realizando las consideraciones de las Ecuaciones (42) y (43). Con lo que la concentración de agua en el aire, a partir de las variables conocidas (temperatura y humedad relativa), estará dada por la Ecuación (56):

$$C_w = \frac{\exp\left(A + \frac{B}{C + T_w}\right) \cdot HR}{RT_w} \cdot MM_w \quad (56)$$

El flujo de entrada (F_e) está definido por la capacidad de extracción de los extractores instalados invernadero, por lo que:

$$F_{v,e} = 15000 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (57)$$

Por otro lado, el flujo de salida debe cumplir la siguiente relación para el balance de masa global:

$$F_{v,s} \cdot \rho_s = F_{v,e} \cdot \rho_e + F_{evap} \quad (58)$$

Considerando las Ecuaciones (54) a (58) se calcula la humedad relativa para cada periodo de tiempo.

El flujo de evaporación para un periodo t se calcula a partir de la diferencia de concentraciones promedio en la pila:

$$F_{evap_t} = V_{pila} \cdot (C_{t+\Delta t} - C_t)$$

Cabe considerar que las variables de temperatura, flujo de entrada, flujo de evaporación cambian en cada periodo de tiempo.

10.8. ANEXO 8: BALANCE DE ENERGÍA EN EL INVERNADERO

El balance de energía en el invernadero está dado por la Ecuaciones (19) a (23), siendo:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT_i}{dt} = F_e \cdot H_e + F_{evap} \cdot H_{evap} + \dot{q}_{rad} - F_s \cdot H_s - \dot{q}_{pérdidas} + \dot{q}_{pila} \quad (59)$$

Donde las entalpías H están definidas por la Ecuación (32), el flujo de radiación por la Ecuación (35). Por otra parte, para el flujo de pérdidas se considerará la convección a través del policarbonato, despreciando la pérdida de calor por otras fuentes, de esta manera el flujo queda definido por:

$$\dot{q}_{pérdidas} = U \cdot A_{inv} \cdot (T_i - T_e) \quad (60)$$

Este flujo cambia periodo a periodo por la variación de la temperatura en el invernadero (T_i) y la temperatura al exterior de este (T_e).

El coeficiente global de transferencia está dado por

$$U = (h_i^{-1} + U_{PC}^{-1} + h_e^{-1})^{-1} \quad (61)$$

Por otra parte, el flujo de calor entre el ambiente del invernadero y la pila puede describirse por la siguiente ecuación de transferencia de calor por convección:

$$\dot{q}_{pila} = h_i \cdot A_{pila} \cdot (T_{pila} - T_i) \quad (62)$$

Dependiendo del signo de la diferencia de temperaturas, este flujo puede ser aditivo sobre el ambiente del invernadero o, por el contrario, retirar energía para aumentar la temperatura de la pila.

De esta manera utilizando las Ecuaciones (59) a (62) es posible encontrar la temperatura para un tiempo $t + \Delta t$ a partir de un tiempo t :

$$T_{i_{t+\Delta t}} = T_{i_t} + \frac{\Delta t}{m \cdot c_p} [F_{e_t} \cdot H_{e_t} + F_{evap_t} \cdot H_{evap_t} - F_{s_t} \cdot H_{s_t} + I_t \cdot \tau \cdot \gamma \cdot A - U \cdot A_{inv} \cdot (T_{i_t} - T_{e_t}) + h_i \cdot A_{pila} \cdot (T_{pila_t} - T_{i_t})] \quad (63)$$

10.9. ANEXO 9: PLANILLA EXCEL

10.9.1. HOJA OPERACIÓN

Presenta la información básica de operación: Sequedad objetivo y de entrada y temperatura inicial del biosólido.

TABLA 19: HOJA OPERACIÓN

Sequedad de entrada	0,4 [-]
Sequedad de salida	0,6 [-]
Concentración de agua	430,2 [kg/m ³]
Concentración final de agua	286,8 [kg/m ³]
Temperatura inicial de la pila	30 [°C]

10.9.2. PARÁMETROS

Presenta los parámetros utilizados en el modelo.

TABLA 20: HOJA: PARÁMETROS

Calor específico lodo	2361	[J/kg*K]
Conductividad del lodo	0,12	[W/m*K]
Densidad del lodo	717	[kg/m ³]
Difusividad térmica	7,E-08	
Difusión de agua	9E-08	[m ² /s]
Convección agua	4,241214232	[m/s]
Convección fuera	100	[W/m ² *K]
Convección dentro	37,81010294	[W/m ² *K]
U del material	3,18	[W/m ² *K]
Generación de energía	83	[W/m ³]
Radiación util	0,4	[-] [0,4-0,7]
Transmisión de luz	0,82	[-]
Radiación máxima	600	[W/m ²]
Ancho	15	[m]
Largo	40	[m]
Alto	6	[m]
Area laterales	360	[m ²]
Área techo	600	[m ²]
Área pila	188,5	[m ²]

10.9.3. SEQUEDAD DE LA PILA

Resolución por diferencias finitas. Para una misma fila, un cambio de columna representa un cambio en el radio de la pila, mientras que en una misma columna un cambio en la fila representa un cambio en el tiempo.

TABLA 21: HOJA: SEQ (PILA)

	Día	Hora	Tiempo	173,25	175,00	176,75	178,50	180,25	182,00	C_w	Velocidad
Tiempo	Día 1	0:00	0,0	430,20	430,20	430,20	430,20	430,20	430,20	430,20	0,00123
		0:30	0,5	430,20	430,20	430,20	430,20	430,20	302,85	427,76	0,00130
		1:00	1,0	430,20	430,20	430,20	430,20	365,91	231,86	425,19	0,00103
		1:30	1,5	430,20	430,20	430,20	397,74	330,38	192,52	423,15	0,00088
		2:00	2,0	430,20	430,20	413,81	379,96	294,46	170,13	421,40	0,00072
		2:30	2,5	430,20	421,92	404,91	353,72	274,44	157,53	419,97	0,00063
		3:00	3,0	426,02	417,47	387,57	339,29	255,05	150,64	418,72	0,00052
		3:30	3,5	423,79	406,64	378,14	320,90	244,46	148,97	417,69	0,00046
		4:00	4,0	417,28	400,82	363,49	310,92	234,47	148,65	416,77	0,00040
		4:30	4,5	413,82	390,20	355,61	298,60	229,37	150,72	415,99	0,00036
		5:00	5,0	406,56	384,54	344,12	292,15	224,28	152,70	415,27	0,00031
		5:30	5,5	402,73	375,14	338,09	283,87	222,08	156,34	414,66	0,00029
		6:00	6,0	395,63	370,23	329,23	279,78	219,78	159,07	414,08	0,00026
		6:30	6,5	391,94	362,23	324,76	274,22	219,13	162,52	413,57	0,00025
		7:00	7,0	385,38	358,16	317,97	271,68	218,09	164,76	413,07	0,00024
		7:30	7,5	382,05	351,47	314,69	267,77	217,96	166,34	412,59	0,00024
		8:00	8,0	376,17	348,19	309,39	266,08	216,80	167,21	412,11	0,00031
		8:30	8,5	373,27	342,58	306,92	262,85	216,41	159,67	411,49	0,00032
		9:00	9,0	368,04	339,92	302,50	261,44	210,99	154,49	410,85	0,00018
		9:30	9,5	365,54	335,08	300,47	256,50	207,69	164,40	410,50	0,00015
10:00	10,0	360,86	332,83	295,57	253,84	210,24	170,25	410,20	0,00008		
10:30	10,5	358,67	328,03	293,13	252,69	211,85	182,31	410,05	0,00007		
11:00	11,0	354,17	325,73	290,16	252,29	217,36	189,36	409,90	0,00015		
11:30	11,5	352,05	321,99	288,82	253,59	220,69	187,55	409,60	0,00018		
12:00	12,0	348,16	320,27	287,61	254,59	220,41	185,89	409,25	0,00016		
12:30	12,5	346,38	317,72	287,27	253,84	220,07	186,28	408,92	0,00016		
13:00	13,0	343,26	316,67	285,62	253,51	219,90	186,17	408,60	0,00014		
13:30	13,5	341,91	314,29	284,93	252,59	219,67	189,04	408,33	0,00013		
14:00	14,0	339,11	313,27	283,28	252,14	220,67	190,61	408,07	0,00011		

10.9.4. TEMPERATURA DE LA PILA

Resolución por diferencias finitas. Para una misma fila, un cambio de columna representa un cambio en el radio de la pila, mientras que en una misma columna un cambio en la fila representa un cambio en el tiempo.

TABLA 22: HOJA: TEM (PILA)

	Día	Hora	Tiempo	173,25	175,00	176,75	178,50	180,25	182,00	T. prom
Tiempo	Día 1	0:00	0,0	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
		0:30	0,5	30,09	30,09	30,09	30,09	30,09	29,77	30,08
		1:00	1,0	30,18	30,18	30,18	30,18	30,04	29,54	30,16
		1:30	1,5	30,27	30,27	30,27	30,21	29,97	29,31	30,24
		2:00	2,0	30,35	30,35	30,33	30,22	29,88	29,09	30,32
		2:30	2,5	30,44	30,43	30,38	30,21	29,77	28,87	30,39
		3:00	3,0	30,53	30,50	30,42	30,18	29,65	28,65	30,47
		3:30	3,5	30,61	30,56	30,44	30,14	29,53	28,43	30,54
		4:00	4,0	30,68	30,62	30,45	30,09	29,40	28,21	30,62
		4:30	4,5	30,75	30,66	30,45	30,03	29,27	28,01	30,69
		5:00	5,0	30,82	30,70	30,45	29,97	29,13	27,81	30,76
		5:30	5,5	30,87	30,73	30,44	29,90	29,00	27,68	30,84
		6:00	6,0	30,93	30,75	30,42	29,82	28,90	27,56	30,91
		6:30	6,5	30,98	30,77	30,39	29,76	28,80	27,56	30,99
		7:00	7,0	31,02	30,78	30,37	29,70	28,75	27,55	31,06
		7:30	7,5	31,06	30,79	30,34	29,66	28,72	27,59	31,14
		8:00	8,0	31,09	30,80	30,32	29,63	28,71	27,63	31,22
		8:30	8,5	31,12	30,81	30,31	29,61	28,72	27,73	31,30
		9:00	9,0	31,15	30,81	30,31	29,61	28,75	27,83	31,38
		9:30	9,5	31,18	30,83	30,31	29,62	28,80	27,97	31,46
		10:00	10,0	31,21	30,84	30,32	29,64	28,87	28,11	31,54
		10:30	10,5	31,24	30,86	30,33	29,68	28,95	28,25	31,63
		11:00	11,0	31,28	30,88	30,36	29,73	29,04	28,40	31,71
		11:30	11,5	31,31	30,91	30,40	29,79	29,14	28,53	31,79
12:00	12,0	31,35	30,95	30,44	29,85	29,23	28,65	31,88		
12:30	12,5	31,39	30,98	30,49	29,92	29,33	28,74	31,96		
13:00	13,0	31,43	31,03	30,54	29,99	29,41	28,82	32,04		
13:30	13,5	31,47	31,07	30,60	30,06	29,49	28,86	32,13		
14:00	14,0	31,52	31,12	30,65	30,13	29,55	28,91	32,21		

10.9.5. SOLVER

Hoja para calcular los parámetros de difusión, convección y transferencia por convección.

TABLA 23: HOJA, SOLVER

Difusión	8,51E-02			h cal	37,8101029		
Convección	4,24121423						
	Sequedad		Temperatura			Error	
	Muestra	Modelo	Muestra	Modelo		Sequedad	Temperatura
3	50,0%	41%	37,2	37,44		3,2%	4,04328E-05
5	52,6%	45%	42,2	39,86		2,2%	0,00306194
7	53,0%	48%	45,4	45,46		0,7%	1,66875E-06
12	53,3%	55%	49,7	48,62		0,1%	0,000469865
15	55,8%	58%	52,0	53,29		0,1%	0,000616192
17	58,7%	59%	50,9	53,38		0,0%	0,002378312
20	62,6%	63%				0,0%	
	Restriccion	C_min	0,00	>0,0		6%	0,109%
		Estabilidad	0,49999	<0,5			
		Estabilidad	0				

10.9.6. HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA

Presenta algunos de los flujos energéticos del invernadero. Producto de la omisión de flujos de energía el balance presentado no permite calcular la temperatura dentro del invernadero. Sin embargo, presenta una herramienta para cuantificar algunos de los flujos energéticos. A su vez recibe los datos meteorológicos, registrados por hora, para trabajarlos en los periodos de tiempo escogidos para el modelo, de media hora.

TABLA 24: HOJA: HR Y T (INV)

	T_amb [°C]	HR_amb [-]	Rad [W/m2]	H_in [MJ]	F_in [m3]	H_w_ev[MJ]	T_inv [°C]	HR_inv [-]	H_out [MJ]	Q_rad [MJ]	Q_cnv [MJ]	Q_pila [MJ]	Bal [MJ]
0,0	5,00	0,49	4,60	102,14	7045,77	0,00	16,59	0,68	321,83	1,629504	57,0863664	171,99	-103,15
0,5	7,00	0,49	4,60	128,75	7108,06	0,00	16,59	0,68	321,83	1,629504	47,2382606	169,02	-69,67
1,0	6,60	0,52	4,50	126,72	7106,02	0,00	16,17	0,71	321,45	1,59408	47,1436016	171,49	-68,79
1,5	6,60	0,52	4,50	126,72	7106,02	0,00	16,17	0,71	321,45	1,59408	47,1436016	168,55	-71,73
2,0	5,60	0,54	4,50	116,53	7091,66	0,00	15,64	0,73	317,33	1,59408	49,4397282	172,52	-76,12
2,5	5,60	0,54	4,50	116,53	7091,66	0,00	15,64	0,73	317,33	1,59408	49,4397282	169,66	-78,98
3,0	4,10	0,56	4,30	98,15	7042,67	0,00	15,49	0,76	321,92	1,523232	56,1077573	168,73	-109,61
3,5	4,10	0,56	4,30	98,15	7042,67	0,00	15,49	0,76	321,92	1,523232	56,1077573	165,91	-112,44
4,0	4,10	0,58	4,20	100,26	7047,26	0,00	15,14	0,80	324,03	1,487808	54,3638813	167,68	-108,96
4,5	4,10	0,58	4,20	100,26	7047,26	0,00	15,14	0,80	324,03	1,487808	54,3638813	165,05	-111,60
5,0	4,20	0,58	4,20	101,73	7046,92	0,00	14,98	0,84	328,22	1,487808	53,1021343	164,48	-113,62
5,5	4,20	0,58	4,20	101,73	7046,92	0,00	14,98	0,84	328,22	1,487808	53,1021343	162,92	-115,19
6,0	4,30	0,58	4,20	103,29	7052,86	0,00	14,65	0,87	329,62	1,487808	50,9684344	165,66	-110,15
6,5	4,30	0,58	4,20	103,29	7052,86	0,00	14,65	0,87	329,62	1,487808	50,9684344	165,56	-110,25
7,0	4,40	0,58	4,20	104,72	7049,44	0,00	14,91	0,86	331,97	1,487808	51,7583048	162,12	-115,40
7,5	4,40	0,58	4,20	104,72	7049,44	0,00	14,91	0,86	331,97	1,487808	51,7583048	162,64	-114,89
8,0	4,50	0,59	72,10	105,55	7006,02	0,00	18,26	0,60	333,45	25,540704	67,7553027	120,18	-149,94
8,5	4,50	0,59	72,10	105,55	7006,02	0,00	18,26	0,60	333,45	25,540704	67,7553027	121,48	-148,64
9,0	10,10	0,47	172,40	164,04	6986,77	0,00	23,20	0,56	411,84	61,070976	64,4928233	59,41	-191,81
9,5	10,10	0,47	172,40	164,04	6986,77	0,00	23,20	0,56	411,84	61,070976	64,4928233	61,20	-190,02
10,0	19,00	0,33	310,40	256,52	7141,15	0,00	25,34	0,56	453,27	109,956096	31,2343216	35,43	-82,59
10,5	19,00	0,33	310,40	256,52	7141,15	0,00	25,34	0,56	453,27	109,956096	31,2343216	37,32	-80,71
11,0	24,50	0,24	466,10	303,29	7233,63	0,00	28,20	0,43	457,11	165,111264	18,2057539	2,55	-4,37
11,5	24,50	0,24	466,10	303,29	7233,63	0,00	28,20	0,43	457,11	165,111264	18,2057539	4,21	-2,71
12,0	28,40	0,18	589,70	331,02	7268,14	0,00	30,16	0,40	476,38	208,895328	8,64489697	-19,28	35,61

10.9.7. DATOS METEOROLÓGICOS

Recibe como datos de entrada las variables meteorológicas medidas en el CGIB.

TABLA 25: HOJA: METEO

Día	Hora	Tiempo	T Amb [°C]	HR [-]	Rad [W/m2]	T inv [°C]	HR inv [-]
Día 1	0	0	7,00	0,493	4,6	16,59	0,68
	1	1	6,60	0,518	4,5	16,17	0,71
	2	2	5,60	0,544	4,5	15,64	0,73
	3	3	4,10	0,561	4,3	15,49	0,76
	4	4	4,10	0,580	4,2	15,14	0,80
	5	5	4,20	0,582	4,2	14,98	0,84
	6	6	4,30	0,583	4,2	14,65	0,87
	7	7	4,40	0,585	4,2	14,91	0,86
	8	8	4,50	0,586	72,1	18,26	0,60
	9	9	10,10	0,474	172,4	23,20	0,56
	10	10	19,00	0,328	310,4	25,34	0,56
	11	11	24,50	0,237	466,1	28,20	0,43
	12	12	28,40	0,182	589,7	30,16	0,40
	13	13	28,60	0,169	635,6	30,74	0,40
	14	14	29,50	0,177	589,4	30,26	0,43
	15	15	27,60	0,243	505,8	28,43	0,46
	16	16	24,10	0,331	364,3	26,88	0,46
	17	17	21,80	0,369	193,3	23,68	0,55
	18	18	17,30	0,462	45,3	21,41	0,64
	19	19	14,50	0,527	4,9	19,76	0,71
	20	20	11,70	0,637	4,8	18,34	0,78
	21	21	9,70	0,736	4,7	17,47	0,85
	22	22	8,50	0,739	4,5	17,32	0,91
	23	23	7,40	0,738	4,5	16,93	0,99