



BUAP

BENEMÉRITA **U**NIVERSIDAD **A**UTÓNOMA DE **P**UEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE
LIXIVIADOS MEDIANTE EVAPORACIÓN; CASO
ESTUDIO: RELLENOS SANITARIOS RESA, S.A. DE C.V.,
EN PUEBLA, PUE.**

TESIS

Que para obtener el grado de:
MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta:

I .Q. ANA LAURA GÓMEZ BLASCO

Director de tesis:

M. C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS

PUEBLA, PUE.

FEBRERO 2016

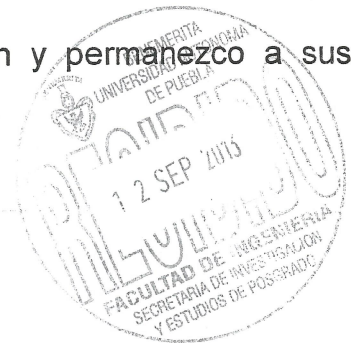
M. I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROLLO

Director de la Facultad de Ingeniería, BUAP.

Presente.

Por medio de la presente, la que suscribe Ana Laura Gómez Blasco, solicita se autorice el tema de tesis "*Análisis de un sistema de tratamiento de lixiviados mediante evaporación; caso estudio: Rellenos Sanitarios RESA S.A. de C.V., en Puebla, Pue.*", el cual está siendo asesorado por el M. C. Constantino Gutiérrez Palacios quien es profesor de tiempo completo en la División de Estudios de Posgrado, UNAM, Sección de Ingeniería Ambiental.

Agradezco de antemano el favor de su atención y permanezco a sus apreciables órdenes.



V o B o
12/09/13


Atentamente



Ana Laura Gómez Blasco

Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental.

Puebla, Pue. a 11 de septiembre de 2013

M. I. EDGAR IRAM VILLAGRAN ARROYO

Director de la Facultad de Ingeniería B. U. A. P.

Presente.

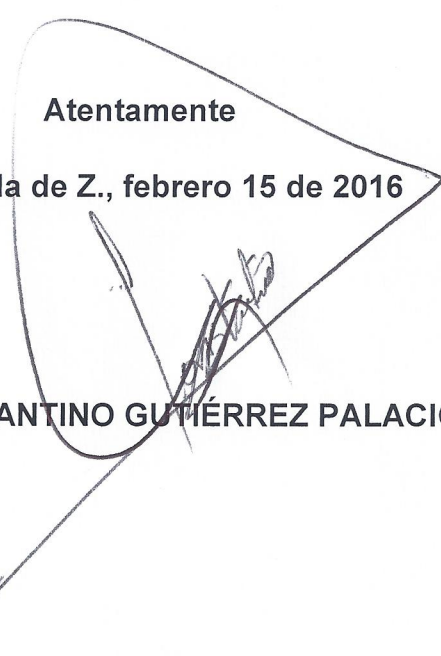
Por medio de la presente, el que suscribe M. C. Constantino Gutiérrez Palacios, hago de su conocimiento que la tesis titulada "*Análisis de un sistema de tratamiento de lixiviados mediante evaporación; caso estudio: Rellenos Sanitarios RESA, S.A. de C.V., en Puebla, Pue.*", elaborada por la **ING. ANA LAURA GÓMEZ BLASCO**, ha sido debidamente revisada por un servidor, por lo que manifiesto que no tengo inconveniente para **autorizar la impresión** de la misma.

Agradezco de antemano el favor de su atención y quedo a sus apreciables órdenes

Atentamente

H. Puebla de Z., febrero 15 de 2016

M. C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS



CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	12
1.1: Hipótesis	13
1.2: Objetivos.....	14
1.2.1: Objetivo General	14
1.2.2: Objetivos Particulares	14
1.3: Alcances	14
1.4: Resultados esperados	15
 CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL.....	 16
2.1: El Relleno Sanitario	16
2.1.1: Lixiviados.....	16
2.2: Sistemas de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios	18
2.2.1: Tecnologías de evaporación como tratamiento de lixiviados	22
2.2.2: Bases del proceso de tratamiento por evaporación	25
2.3: Caso estudio: Rellenos Sanitarios RESA S. A. de C. V. en Puebla, Pue. ...	32
2.3.1: Datos Generales	32
2.3.2: Régimen de construcción y operación	35
2.3.4: Manejo de lixiviados	38

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	40
3.1: Sistema de evaporación mediante invernaderos	40
3.1.1: Parámetros de diseño	41
3.1.2: Diseño y construcción del modelo experimental	47
3.2: Operación del modelo experimental	53
3.3: Balance hídrico de generación de lixiviados	58
3.3.1: Parámetros involucrados.....	59
 CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	 65
4.1: Resultados.....	65
4.1.1: Pruebas preliminares	65
4.1.2 Prueba 1: Determinación del tirante óptimo de lixiviados.....	67
4.1.3: Prueba 2: Eficiencia en la disminución de tirantes de lixiviados según su ubicación dentro del invernadero	70
4.1.4: Prueba 3: Proceso estancado vs recarga	83
4.2: Discusión de resultados.....	104
4.2.1: Pruebas preliminares	104
4.2.2: Prueba 1: Determinación del tirante óptimo de lixiviados.....	104
4.2.3: Prueba 2: Eficiencia en la disminución de tirantes de lixiviados según su ubicación dentro del invernadero	106
4.2.4: Prueba 3: Proceso estancado vs recarga	109

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	112
5.1: Conclusiones	112
5.1.1: Hallazgos relevantes	113
5.2 Recomendaciones	116
REFERENCIAS.....	119
ANEXOS	123
Anexo 1: Información complementaria de la experimentación.....	123
Prueba 2.....	123
Prueba 3.....	126
Anexo 2: Información complementaria del caso estudio.....	131
Anexo 3: Humedad retenida por el suelo después de diferentes cantidades de evapotranspiración potencial	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Caracterización típica de lixiviados.....	18
Tabla 2.2: Eficiencia en la Remoción	19
Tabla 2.3: Problemáticas comunes	20
Tabla 2.4: Requerimientos	21
Tabla 3.1: Caracterización de lixiviados	46
Tabla 3.2: Dimensiones del invernadero piloto.....	47
Tabla 3.3A Ventilación diurna.....	50
Tabla 3.3B Ventilación vespertina - nocturna.....	50
Tabla 3.4: Materiales de construcción.....	51
Tabla 3.5: Bandejas de experimentación	52
Tabla 3.6: Metodología de la caracterización de las muestras.....	57
Tabla 3.7: Coeficientes de ajuste por radiación solar	60
Tabla 3.8: Coeficiente de escurrimiento	61
Tabla 3.9: Humedad del suelo.....	62
Tabla 3.10: Datos climáticos	64
Tabla 4.1: Resumen de disminución de tirantes: Prueba 2	80
Tabla 4.2: Disminución de tirantes total, promedio diario y cambio en su eficiencia en el transcurso de la prueba.....	87
Tabla 4.3: Eficiencia del proceso.....	88

Tabla 4.4 Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos de lixiviados monitoreados durante la prueba.....	93
Tabla A.1: Datos meteorológicos	125
Tabla A.2: Observaciones durante la prueba	126
Tabla A.3: Balance hídrico de generación de lixiviados. Caso estudio	132
Tabla A.4: Para máxima capacidad de almacenamiento de humedad de 150 mm	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Trayectoria de la radiación solar por la atmósfera.....	26
Figura 2.2: Balance de radiación en la superficie de una sustancia.....	27
Figura 2.3: Balance de energía en un tanque de evaporación.....	28
Figura 2.4: Foto aérea de ubicación de sitio	33
Figura 2.5: Carta de clima del municipio de Puebla	33
Figura 2.6: Carta de temperatura del municipio de Puebla	34
Figura 2.7: Carta de precipitación del municipio de Puebla	34
Figura 3.1: Parámetros climáticos en el transcurso del año.....	42
Figura 3.2: Rosas de vientos dominantes por periodos del día, estación de monitoreo Agua Santa, 2006.....	44
Figura 3.3: Temperatura promedio en el transcurso del día, enero 2015.....	49
Figura 3.4 Ventilación vespertina – nocturna (pared Este).....	51
Figura 3.5: Invernadero piloto.....	52
Figura 3.6: Bandejas de experimentación	53
Figura 3.7: Transporte del agua a través de la celda de confinamiento	59
Figura 4.1: Comportamiento promedio de la temperatura durante el día. Pruebas preliminares.....	66
Figura 4.2: Acomodo. Prueba 1.....	67
Figura 4.3: Disminución promedio de tirantes de lixiviados. Prueba 1	68

Figura 4.4: Comportamiento promedio de temperaturas superficiales de lixiviados durante el día. Prueba 1	69
Figura 4.5: Comportamiento promedio de temperaturas medias de lixiviados durante el día. Prueba 1	70
Figura 4.6: Acomodo. Prueba 2.....	71
Figura 4.7: Disminución promedio de tirantes de lixiviados. Prueba 2	72
Figura 4.8: Gammas de colores utilizados para la comparación de disminución promedio de tirantes de lixiviados	73
Figura 4.9: Disminución promedio de tirantes de lixiviados según su ubicación. Prueba 2.....	73
Figura 4.10: Disminución promedio de tirantes de lixiviados por periodos del día. Prueba 2.....	75
Figura 4.11: Tasas promedio de evaporación de lixiviados durante la mañana. Prueba 2.....	76
Figura 4.12: Tasas promedio de evaporación de lixiviados durante la tarde. Prueba 2	76
Figura 4.13: Tasas promedio de evaporación de lixiviados durante el día. Prueba 2	77
Figura 4.14: Tasas promedio de disminución de tirantes de lixiviados durante la noche. Prueba 2	78
Figura 4.15: Tasas promedio diarias de disminución de tirantes de lixiviados. Prueba 2	79
Figura 4.16: Comportamiento promedio de la temperatura durante el día. Prueba 2	81

Figura 4.17: Comportamiento promedio de temperaturas superficiales de lixiviados durante el día. Prueba 2	82
Figura 4.18: Comportamiento promedio de temperaturas medias de lixiviados durante el día. Prueba 2	82
Figura 4.19: Acomodo. Prueba 3.....	84
Figura 4.20: Disminución diaria de tirantes de lixiviados. Prueba 3	85
Figura 4.21: Disminución diaria tirantes de líquidos fuera del invernadero. Prueba 3	85
Figura 4.22: Comportamiento promedio de la temperatura durante el día. Prueba 3	88
Figura 4.23: Comportamiento promedio de temperaturas superficiales de lixiviados durante el día. Prueba 3	89
Figura 4.24: Comportamiento promedio de temperaturas medias de lixiviados durante el día. Prueba 3	90
Figura 4.25: Comportamiento promedio de temperaturas superficiales de líquidos fuera del invernadero durante el día. Prueba 3	91
Figura 4.26 Comportamiento promedio de temperaturas medias de líquidos fuera del invernadero durante el día. Prueba 3	91
Figura 4.27: Cambios de turbiedad vs disminución de tirantes durante la prueba, muestra “R”. Prueba 3	96
Figura 4.28: Concentración de sólidos durante la prueba, muestra “L”. Prueba 3	98
Figura 4.29: Concentración de sólidos durante la prueba, muestra “E”. Prueba 3	98
Figura 4.30: Concentración de sólidos durante la prueba, muestra “R”. Prueba 3	99
Figura 4.31: Alcalinidad durante la prueba, muestra “L”. Prueba 3	100

Figura 4.32: Alcalinidad durante la prueba, muestra “E”. Prueba 3.....	100
Figura 4.33: Alcalinidad durante la prueba, muestra “R”. Prueba 3.....	101
Figura 4.34: Cambios en la concentración de: SDT vs cloruros, muestra “E”. Prueba 3	102
Figura 4.35: Sulfatos vs fosfatos vs conductividad, muestra “R”. Prueba 3	103
Figura A.1: Temperaturas máximas vs evaporación de lixiviados, corrida 1. Prueba 2	124
Figura A.2: Temperaturas máximas vs evaporación de lixiviados, corrida 3. Prueba 2	124
Figura A.3: Nata en la superficie de E1, día 18.....	128
Figura A.4: Burbujas en la superficie de R2, día 18	128
Figura A.5: E2, día 19	129
Figura A.6: R3, día 19	129
Figura A.7: R2 (izquierda) y E3 (derecha), día 19	130
Figura A.8: Temperaturas máximas promedio. Prueba 3.....	131

ACRÓNIMOS

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

EPA: Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency)

DQO: Demanda Química de Oxígeno

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5° día

m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar

NMP: Número Más Probable

NTU: Unidad Nefelométrica de Turbidez (Nephelometric Turbidity Unit)

GLOSARIO

Calor latente de vaporización: Cambio específico de entalpía asociado con la transición de una sustancia de la fase líquida a la fase vapor a temperatura y presión constantes.

Calor específico: Cantidad de energía necesaria para amentar o reducir la temperatura de una sustancia o mezcla de sustancias.

Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo: Máxima cantidad de humedad que un tipo de suelo puede retener.

Conductividad eléctrica: Capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica.

Constante solar: Radiación recibida del sol por una superficie de 1 m^2 colocada en el límite exterior de la atmósfera terrestre y en un plano perpendicular a los rayos solares.

Microclima interno del invernadero: Conjunto de condiciones climáticas particulares en el interior de un invernadero.

Prueba Proctor: Estudio que sirve para determinar el peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad.

Transmitancia: Cantidad de energía que atraviesa un cuerpo por unidad de tiempo.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas ambientales a las que se enfrenta la sociedad actual, y cada vez en mayor demanda, es el inadecuado manejo de residuos sólidos, desde su generación hasta la manera de deshacerse de ellos, y en México, como en muchas otras sociedades, la forma que se emplea para esta última etapa es enterrarlos; pero cuando no se tiene la infraestructura necesaria y las consideraciones pertinentes, esta práctica acarrea consigo importantes problemas ambientales y riesgos a la salud, además de afectar la calidad de vida y por consiguiente el bienestar social. Es por ello que para regular las actividades de disposición final de residuos sólidos no peligrosos en tierra, en México se cuenta con la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, sin embargo, según estadísticas del 2014, sólo existen 216 rellenos sanitarios contra 1,264 tiraderos a cielo abierto (SEMARNAT, 2015).

Entre los muchos retos operativos a los que se enfrentan los rellenos sanitarios se encuentra el manejo de lixiviados, que son líquidos producidos por la degradación de los residuos y por la entrada de agua desde fuentes externas a las celdas de confinamiento, arrastrando consigo todo tipo de contaminantes, por lo que el tratamiento adecuado resulta esencial para eliminar los riesgos potenciales de contaminación (Contreras *et al.* 2009) de suelo, subsuelo, aguas superficiales y aguas subterráneas. Por otro lado, su exposición al aire libre genera gases y malos olores, dando lugar a presencia de vectores como roedores y moscas entre otros, representando un foco de infección y pudiendo llegar a producir cáncer, esterilidad, abortos, enfermedades genéticas y coronarias, y otros efectos de tipo crónico que pueden aparecer años después de la exposición al riesgo (Arley & Palacio, 2006).

Al respecto del tratamiento de lixiviados, se han estudiado diversas metodologías, algunas de las cuales logran eficiencias casi completas en la remoción de contaminantes (Szantó *et al.* 2011), sin embargo, no se ha podido llegar a la conclusión de que alguna de ellas sea la más conveniente, ya que su elección depende de diversos factores, entre los cuales se tiene: 1) caracterización de los

lixiviados, 2) ubicación y climatología del sitio, 3) espacio disponible para el tratamiento, 4) costos de inversión, operación y mantenimiento, 5) complejidad en la operación y 6) uso final del efluente.

En un estudio comparativo de sistemas de tratamiento se observa que, de manera general, la evaporación presenta ventajas significativas respecto a los otros sistemas, destacándose por tener rendimientos de remoción muy altos, requerir bajos insumos, presentar pocos problemas durante su operación y ser de bajo costo (Giraldo, 2010). Este método tiene como propósito reducir el volumen de los líquidos hasta la condición de lodos espesos. El proceso se puede llevar a cabo de tres formas: 1) evaporación natural mediante sistemas lagunares; 2) de manera forzada utilizando equipos en los que se induce el calor y; 3) evaporación inducida con invernaderos que mantengan condiciones ambientales óptimas en su interior.

En las siguientes páginas se profundizará en el proceso de evaporación como alternativa para el tratamiento de lixiviados que se generan en rellenos sanitarios, en virtud de las ventajas que presenta frente a los demás sistemas; y respondiendo a la necesidad de optimizar el manejo de estos líquidos con alternativas económicamente viables, se considera la introducción de una técnica basada en evaporación natural, que permita mejorar su eficiencia al optimizar los parámetros del sistema, tomando como caso estudio para la elaboración de los trabajos de campo los lixiviados generados en las celdas de disposición final de la empresa Rellenos Sanitarios RESA S.A. de C.V, en Puebla, Pue.

1.1: Hipótesis

El tratamiento de lixiviados que se generan en rellenos sanitarios, tomando como caso estudio los líquidos provenientes de las celdas de disposición final de residuos sólidos urbanos de la empresa Rellenos Sanitarios, RESA S.A. de C.V. en Puebla, Puebla, mediante el método de evaporación en invernaderos, permitirá obtener al menos 50% de reducción de su volumen logrando la concentración de algunos de sus compuestos fisicoquímicos.

1.2: Objetivos

1.2.1: Objetivo General

Analizar la eficiencia de un sistema de tratamiento de lixiviados mediante evaporación en invernaderos, diseñado con base en un modelo físico que opere con los lixiviados de un relleno sanitario en operación, tomando como caso estudio los líquidos provenientes de las celdas de disposición final de la empresa Rellenos Sanitarios, RESA S.A. de C.V. en Puebla, Puebla.

1.2.2: Objetivos Particulares

- Establecer las condiciones a las que estará sujeto el experimento, así como los parámetros de control.
- Construir y operar el modelo experimental, monitoreando los parámetros establecidos.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos y evaluar la eficiencia del tratamiento.

1.3: Alcances

El presente proyecto tiene como propósito analizar una alternativa para el tratamiento de lixiviados que se generan en el relleno sanitario RESA S. A. de C. V. de la ciudad de Puebla, Puebla, mediante un sistema de evaporación natural optimizada, respondiendo a la necesidad de introducir al país técnicas económicamente viables para la mitigación de los impactos ambientales producidos por lixiviados, elaborando los trabajos de campo en una planta piloto operada en el sitio de generación de los líquidos a tratar.

1.4: Resultados esperados

Con los resultados del presente proyecto se pretende mitigar la problemática que representa el manejo de lixiviados que se generan en rellenos sanitarios, tomando como caso estudio la empresa Rellenos Sanitarios RESA S. A. de C. V. de la ciudad de Puebla, Puebla, demostrando que la tecnología propuesta será eficiente para la reducción del volumen, y la concentración de algunos de sus compuestos fisicoquímicos.

CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL

2.1: El Relleno Sanitario

Como ya se mencionó en el capítulo 1, la etapa final del manejo de residuos sólidos no peligrosos en México se lleva a cabo mediante rellenos sanitarios, que acorde con la regulación de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, se establecen las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial; y se define un relleno sanitario como obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicionales, los impactos ambientales (SEMARNAT, 2004). Sin embargo, para garantizar la minimización de dicho impacto ambiental generado por la naturaleza propia del confinamiento de desechos sólidos, los rellenos sanitarios deben enfrentarse a muchos retos operativos, siendo uno de los principales el manejo de lixiviados que se generan en las celdas de disposición final.

2.1.1: Lixiviados

Los lixiviados son producto de la liberación de la humedad contenida en los residuos confinados y de la percolación del agua de lluvia que se dirige hacia abajo a través de los estratos de la celda de confinamiento, diluyendo consigo todo tipo de compuestos contaminantes (Estudios y técnicas especializadas en ingeniería S. A. de C. V., 2007, pág. Cap. 2). La NOM-083-SEMARNAT-2003 define a los lixiviados como líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representando un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos (SEMARNAT, 2004).

Por otro lado, en Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) reconoce la generación de lixiviados como un problema potencial en rellenos sanitarios, y los describe como líquidos percolados a través de los desechos sólidos de los que han extraído materiales disueltos o en suspensión. La cantidad de líquidos que se genere, dependerá principalmente de la relación entre precipitación, evapotranspiración, superficie de la celda y la capacidad de almacenamiento del suelo (Fenn, *et al.* 1975).

Se han hecho numerosos estudios que incluyen la caracterización de lixiviados, y que demuestran que sus diferencias dependen principalmente de dos factores: 1) la climatología de la zona y; 2) la composición de los desechos, regida por las actividades socioeconómicas de la zona en que se generan y por el manejo de residuos previo a su disposición final (Salazar & Saavedra, 2009); por lo que éste último aspecto es un área de oportunidad para reducir los contaminantes en lixiviados, ya que prácticas como segregación de algunos materiales susceptibles de reciclaje, reutilización de residuos orgánicos en la producción de composta, almacenamiento temporal en sitios ventilados que no permitan la entrada de agua de lluvia, recolección y transporte de residuos por separado de acuerdo a sus propiedades para reaprovechamiento, y otras medidas a considerar en las diferentes etapas del manejo de residuos, contribuirán no sólo en la disminución de contaminantes en lixiviados sino también en la cantidad que se genere, tanto de lixiviados como de los propios desechos. Otro factor que afecta en la caracterización de estos líquidos es la edad de la celda de confinamiento (Contreras *et al.* 2009).

La Tabla 2.1 muestra datos típicos sobre la composición de lixiviados generados en rellenos sanitarios (Contreras, 2006), aunque de manera general, se puede determinar que los lixiviados contienen características contaminantes como alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, patógenos, sustancias tóxicas y metales pesados (Giraldo, 2010), por lo que la NOM-083-SEMARNAT-2003, en su apartado 7.3 establece que el lixiviado debe ser recirculado a las celdas de residuos confinados en función de los requerimientos de humedad para la descomposición de los residuos, o bien tratado, o una combinación de ambas (SEMARNAT, 2004).

Tabla 2.1: Caracterización típica de lixiviados (Contreras, 2006)

Parámetro	Relleno sanitario nuevo < 2 años (mg·L ⁻¹)	Relleno sanitario maduro > 10 años (mg·L ⁻¹)
pH	6	6.6 – 7.5
DBO ₅	10,000	100 – 200
Sólidos Suspendidos Totales	500	100 – 400
Aluminio	-	-
Fósforo Total	30	5 – 10
Nitrógeno Total kjeldahl	200	80 – 120
Hierro	60	20 – 200
Plomo	-	-
Cadmio	-	-

- : Sin información

2.2: Sistemas de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios

En las Tablas 2.2 a 2.4 (Giraldo, 2010) se presenta una comparación general de los sistemas aerobio, anaerobio, evaporación, recirculación, membranas, sistemas naturales y plantas tratadoras de aguas residuales, aplicados al tratamiento de lixiviados, tomando como parámetros la eficiencia en la remoción de contaminantes (Tabla 2.2), las problemáticas que comúnmente presentan (Tabla 2.3) y sus requerimientos (Tabla 2.4). De esta comparación se determina que, de manera general, el tratamiento por evaporación presenta ventajas significativas frente a los otros sistemas: la Tabla 2.2 muestra rendimientos muy altos en la remoción de todos los principales parámetros; en general, como se expone en la Tabla 2.4, los requerimientos del sistema son menores que para los tratamientos aerobio, anaerobio y por membranas, siendo importante mencionar que pudiera llegar a ser autosuficiente cuando la energía requerida es provista por el biogás que se genera dentro del sitio; por último, la Tabla 2.3 muestra que de los diferentes problemas a los que se enfrentan comúnmente las técnicas comparadas, resultan menores para el sistema por evaporación.

Tabla 2.2: Eficiencia en la Remoción

Sistema Parámetro	Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membranas	Sistemas Naturales	Tratamiento en PTAR
DBO	Muy Altos	Altos	Muy altos	Intermedios	Muy altos	Muy altos	Muy altos
Nutrientes	Altos ⁽¹⁾	Muy bajos	Muy altos	Bajos	No ⁽¹⁾	No	Variables ⁽⁴⁾
Metales	Intermedios ⁽²⁾	Altos	Muy altos	Intermedios	Altos	Altos	Altos
COV	Altos ⁽³⁾	+	Muy altos	+	No ⁽¹⁾	+	Variables ⁽⁵⁾
Patógenos	Bajos	Bajos	Muy altos	Bajos	Muy altos	Variables ⁽⁴⁾	Variables ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Pueden ser altos o bajos dependiendo del diseño

⁽²⁾ Cuando hay pre-tratamiento pueden tener remociones muy altas

⁽³⁾ Remoción por arrastre en tanque de aireación. Genera impacto ambiental

⁽⁴⁾ Pueden ser muy altos si así se quiere

⁽⁵⁾ Puede llegar a generar problemas en las conducciones

+ Afectación negativa al proceso. Mientras más cruces mayor la afectación

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

COV: Compuestos Orgánicos Volátiles

PTAR: Planta Tratadora de Aguas Residuales

Tabla 2.3: Problemáticas comunes

Problema / Sistema	Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membranas	Sistemas Naturales	Tratamiento en PTAR
Formación de precipitados	++	+++	+	++	+++	+	No
Toxicidad a los microorganismos	++	++	No	No	No ⁽¹⁾	+	Potencial
Formación de espumas	+++	+	++	+(1)	Variable ⁽²⁾	No	Baja
Emisión de COV	+++	+	++	+	Variable ⁽²⁾	+	Baja
Sensibilidad a variaciones de caudal	++	++	+	+	+	No	No
Producción y manejo de lodos	+++	+	+	No	+		No
Requerimientos de área	Baja	Baja	Muy baja	Baja	Baja	Alta	No

⁽¹⁾ Pueden formarse en los tanques de almacenamiento

⁽²⁾ Si los sistemas son aerobios, la problemática puede ser muy alta

+ Afectación negativa al proceso. Mientras más cruces mayor la afectación

COV: Compuestos Orgánicos Volátiles

Tabla 2.4: Requerimientos

	Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membranas	Sistemas Naturales	Tratamiento en PTAR
Necesidad de insumos químicos	+++ ⁽¹⁾	+++ ⁽¹⁾	++ ⁽²⁾	-	+++ ⁽¹⁾	-	-
Necesidad de insumos operacionales	++	+	+	+	+++	-	-
Necesidad de suministro de partes	++	-	+	+	+++	-	+
Suministro de energía eléctrica	+++	+ ⁽⁴⁾	- ⁽⁵⁾	+	+++	+ ⁽³⁾	+
Complejidad operacional	+++	+	++	+	+++	-	-

⁽¹⁾ Requiere un extenso pre-tratamiento

⁽²⁾ Puede requerir pre-tratamiento, algunos sistemas usan sustancias para control de pH, espumas.

⁽³⁾ Usualmente no requiere pero en ocasiones hay necesidad de bombear el lixiviado

⁽⁴⁾ Pueden requerir en el sistema de pre-tratamiento

⁽⁵⁾ Puede llegar a ser autosuficiente. Algunas tecnologías así están diseñadas

2.2.1: Tecnologías de evaporación como tratamiento de lixiviados

El propósito del tratamiento de lixiviados mediante evaporación es el de minimizar el volumen de los líquidos hasta lodos espesos ricos en sales y otros contaminantes evaporando el agua contenida en ellos. (Eastern Research Group, Inc. y Carbon Trade, Ltd, 2007). Es importante evaluar el grado de contaminación contenida en los efluentes para determinar si se requerirá de algún tratamiento posterior, ya que en la fase vapor-gas pudieran quedar retenidos compuestos orgánicos volátiles (COV), cloro y amoníaco; mientras que el lodo es rico en compuestos no volátiles (Bódalo *et al.* 2007).

La evaporación es un sistema de tratamiento altamente efectivo, ya que en teoría puede separar todas las especies disueltas (Shaw *et al.* 20011). El proceso se puede llevar a cabo de 3 formas: 1) de manera natural mediante lagunas al aire libre; 2) en invernaderos diseñados para mantener condiciones ambientales óptimas en su interior y; 3) en equipos en los que se induce el calor y se controla la presión para forzar la evaporación.

Sistema lagunar

La metodología de evaporación mediante lagunas es una de las tecnologías más simples para el manejo de lixiviados, sencilla en su operación y de bajo costo (Savage *et al.* 1998). El método consiste en una serie de estanques debidamente impermeabilizados en los que los líquidos reciben tratamiento de manera natural al estar expuestos directamente a la radiación solar y demás factores ambientales. Los parámetros principales para su diseño son la temperatura, la evaporación neta, y el gasto (Ramadan & Ponce, 2009); resultando evidente que para la elección de que esta alternativa, el sitio debiera contar con condiciones climáticas apropiadas, preferentemente árido (Gobierno de Chile, 2005). Estas lagunas se construyen con tirantes pequeños y requieren de grandes extensiones de terreno para maximizar el área expuesta (Ramadan & Ponce, 2009).

Una forma de incrementar la evaporación natural en este método, es combinándolo con recirculación de lixiviados sobre los residuos ya dispuestos por medio de rociado con spray, aunque esta operación pudiera originar problemas de malos olores (Savage *et al.* 1998). Otra manera de optimizar la evaporación en este sistema, es diseñar las diversas lagunas de forma tal que la alimentación entre ellas sea por cascada mediante desniveles entre ellas (Gobierno de Chile, 2005).

Invernaderos

Un invernadero es una construcción simple de estructura metálica con cubierta translúcida que no permite el paso de la lluvia a su interior, y que tiene por objeto reproducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para los fines determinados con cierta dependencia del medio exterior, y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas dentro de él. El tratamiento de lixiviados que se generan en rellenos sanitarios mediante invernaderos consiste en que, por medio de factores externos como temperatura, viento, lluvia y humedad, se manipulará el ambiente interno al controlar parámetros involucrados en el proceso de evaporación: humedad, temperatura, viento, altura del líquido y área del invernadero. Este sistema basa su eficiencia en concentrar la radiación solar en un espacio cerrado para aumentar la temperatura ambiente en el interior, y con ello la velocidad de evaporación.

La geometría de la estructura es un factor importante, ya que parámetros como altura, ancho, forma y pendiente del techo, alterarán sensiblemente la dinámica atmosférica dentro del invernadero. Asimismo, es importante la selección de los materiales correctos para su construcción, ya que serán sus propiedades físicas, en especial la transmitancia, las que determinen la cantidad y tipo de luz que ingrese y salga del sistema, de tal forma que se permita el paso de la radiación al interior del equipo, pero que impida su salida, creando así un ambiente caliente dentro del invernadero. Por otro lado, los materiales deben ser capaces de resistir la corrosión

debida a los lixiviados y las inclemencias del clima. Regularmente se recomienda utilizar policarbonato o vidrio (Szantó *et al.* 2011).

La temperatura deseada se logra de manera natural aprovechando la luz solar, sin embargo, en ocasiones es necesario el empleo de equipos generadores de energía. Asimismo, se pueden emplear sistemas de ventilación natural o artificial que ayuden a regular la temperatura y controlar la humedad, manteniendo condiciones óptimas dentro del invernadero.

La principal ventaja de éste sistema sobre otras técnicas de evaporación es que el lodo resultante se puede remover fácilmente.

Evaporación forzada

Regularmente, el sistema para evaporación forzada de lixiviados incluye evaporadores de vacío con compresión mecánica de vapor y circulación forzada. Estos equipos son capaces de operar con altas concentraciones de materias residuales propias de los lixiviados que se generan en rellenos sanitarios (Fornieles, 2011).

Algunas de las tecnologías existentes involucran la energía del biogás para evaporar los líquidos por calentamiento, utilizando de manera directa la energía que se produce al quemar el gas (Corena, 2008). Otras hacen uso del calor residual generado en motores de combustión o turbinas que funcionan a base del biogás para producir potencia mecánica, que a su vez se puede usar para la generación de electricidad (Giraldo, 2010). Con estas técnicas se solucionan los dos principales problemas que se tienen en los rellenos sanitarios: emisión de lixiviados y de gases, convirtiéndose ésta, en la principal ventaja que el tratamiento por evaporación presenta sobre los demás sistemas.

Existen también tecnologías diseñadas para mantener un control de las emisiones que se generan por el proceso de evaporación, ya que la mezcla gas-vapor que se

produce puede llevar consigo cantidades significativas de compuestos orgánicos volátiles (Giraldo, 2010).

La tecnología de evaporación forzada también ha reportado problemas operativos, entre ellos la incrustación de precipitados en los equipos y la formación de espumas (Corena, 2008), las cuales pueden formarse por la turbulencia que el proceso genera, por el exceso de materia orgánica (Bódalo *et al.* 2008), por partículas coloidales en el líquido en evaporación, por depresores de la tensión superficial o por sólidos divididos. Para solucionar el problema de la espuma se recomienda el uso de antiespumantes o chorros de vapor a alta velocidad que rompen la espuma al chocar con su superficie (Perry *et al.* 1992, Cap.11).

Otros diseños de evaporadores involucran 1) adición química de ácido o base para neutralizar, y anti-incrustante para evitar incrustaciones en el intercambiador de calor; 2) precalentamiento en un intercambiador de calor de platos; 3) deaereación para extraer el CO₂ y Oxígeno disuelto, así como vapor del evaporador para reducir el potencial de corrosión en el mismo y; 4) evaporación en un evaporador de película descendente, en el que la evaporación se logra a presión atmosférica (Shaw *et al.* 2011).

Se ha reportado que la evaporación de lixiviados utilizando el calor generado por la combustión del biogás, requiere entre 120 m³ y 215 m³ de biogás con metano a un 50% para evaporar 1 m³ de líquidos, dependiendo de la tecnología empleada (Eastern Research Group, Inc. y Carbon Trade, Ltd, 2007).

2.2.2: Bases del proceso de tratamiento por evaporación

La evaporación natural de un líquido se lleva a cabo por la interacción de 2 factores principales: 1) el suministro de energía para proveer calor latente de vaporización, siendo la radiación solar la fuente de energía y; 2) el transporte de vapor generado lejos de la superficie de evaporación (Chow *et al.* 1994).

Respecto a la radiación solar, para que ésta incida en la superficie de un cuerpo cualquiera, primero debe viajar a la atmósfera terrestre; a esta cantidad de energía

se le conoce como constante solar extraterrestre y depende de la latitud del lugar, la época del año y la hora del día (García-Badell, 2003).

Una vez que la radiación llega a la atmósfera terrestre, debe someterse a un recorrido en el que sufrirá importantes pérdidas según las condiciones meteorológicas existentes. La Figura 2.1 muestra un esquema de esta trayectoria en donde se aprecia que por reflexión, una parte se devuelve al espacio exterior debido a las nubes y el polvo; puede existir una difusión por aerosoles y partículas presentes en el aire, mientras que otra parte es absorbida por la atmósfera. De la energía restante, y que incide en la superficie del cuerpo, una parte se absorbe de manera directa, y otra parte es producto de la difusión de los rayos en el aire (Ibídem, 2003).

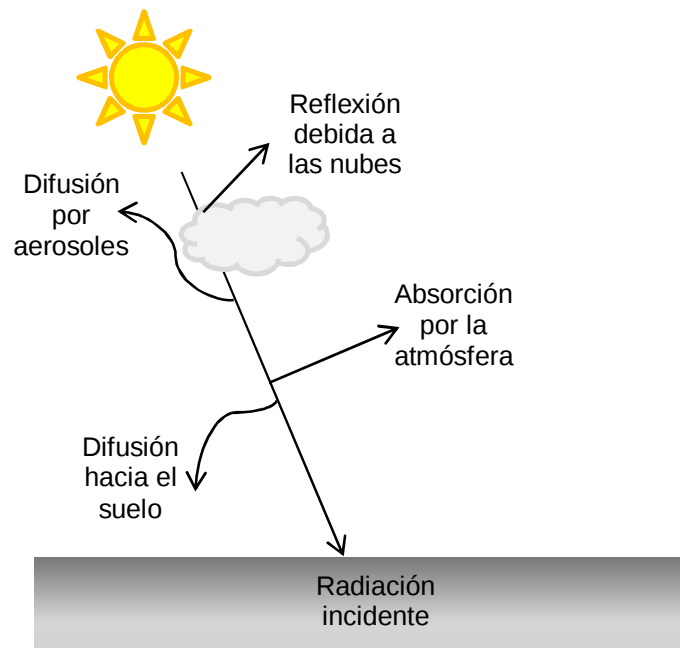


Figura 2.1: Trayectoria de la radiación solar por la atmósfera

Fuente: Adaptado de (García-Badell, 2003)

No toda la radiación solar incidente sobre una superficie es aprovechada como fuente de energía. Para comprender mejor su comportamiento, en la Figura 2.2 se ilustra el fenómeno, que ocurre de la siguiente manera: cuando el rayo de luz solar choca con un cuerpo cualquiera, una parte, conocida como albedo, se refleja a la atmósfera mientras que la energía restante se absorbe. De la fracción absorbida, una parte se emite hacia afuera en forma continua a tasas que dependen de la temperatura superficial del cuerpo. Entonces, la radiación neta que el sistema utiliza para el proceso de evaporación, es la diferencia entre la radiación absorbida y la emitida, siendo a su vez la absorbida, la substracción entre la radiación que incide en el cuerpo y la que se refleja (Chow *et al.* 1994).

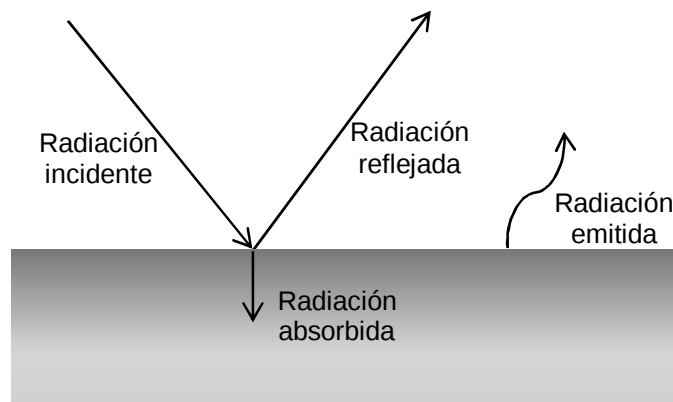


Figura 2.2: Balance de radiación en la superficie de una sustancia

Fuente: Adaptado de (Chow *et al.* 1994)

Por otro lado, el sistema también sufre pérdidas de calor por convección al aire y por conducción a las paredes del recipiente que lo contiene.

La necesidad de transportar el vapor recién formado lejos de la superficie del líquido, es para evitar que se llegue a condiciones cercanas a la saturación de humedad, ya que el proceso entraría en un estado estable en el que no se permitirá mayor evaporación.

Por último, las burbujas de vapor que se formen dentro del líquido, escaparán más rápidamente si tienen que recorrer menos tirante, por lo que la altura de la lámina del líquido es un factor que influye notoriamente en la tasa de evaporación. Sin

embargo, el volumen a tratar se reduciría drásticamente (Szantó *et al.* 2011). La Figura 2.3, esquematiza las variables que participan en el proceso de evaporación.

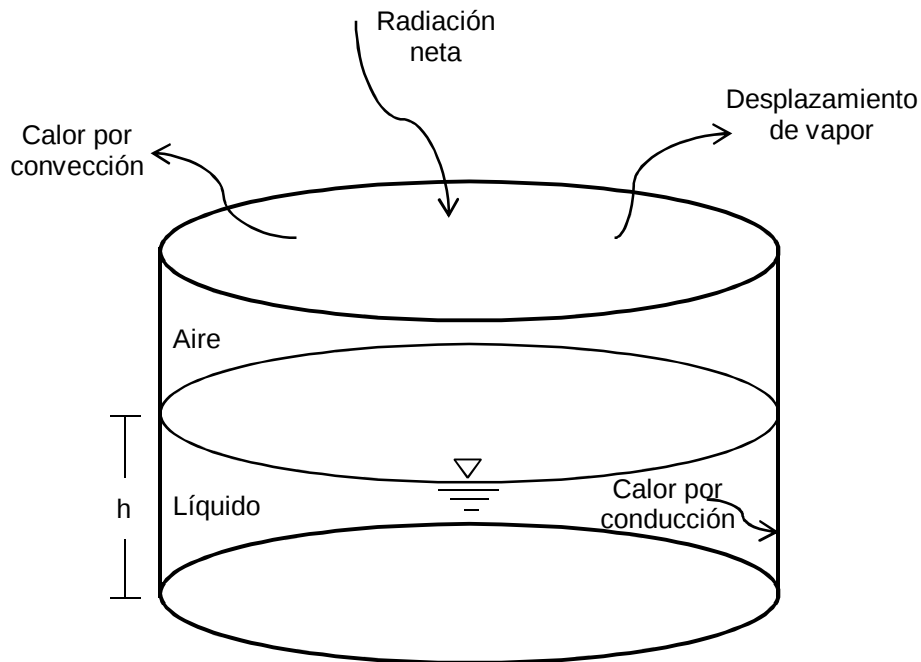


Figura 2.3: Balance de energía en un tanque de evaporación

Fuente: Adaptado de (Chow *et al.* 1994)

La finalidad del tratamiento de lixiviados mediante evaporación es la de reducir el volumen de estos líquidos al retirar la mayor humedad posible, dejando como residuo lodos ricos en sales y materia orgánica, que al ser devueltos a la celda de disposición final propicien la degradación de los desechos, o bien que al continuar su tratamiento por otras metodologías, éste se vea beneficiado al aumentar su eficiencia por tratarse de un insumo con mayor concentración de contaminantes y facilitar el manejo de los lixiviados, además de que se reducirá el espacio necesario para el proceso y sus costos disminuirán. Por otro lado, es importante evaluar la calidad de la fase gas-vapor que se genera en este proceso, ya que pudiera contener concentraciones significativas de sustancias dañinas a la atmósfera como compuestos orgánicos volátiles.

La evaporación natural como tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios ha sido ampliamente utilizada; como antecedentes del uso de esta técnica se pueden citar los siguientes.

Caso 1: Relleno Las Iguanas. Guayaquil, Ecuador (Eastern Research Group, Inc. y Carbon Trade, Ltd, 2007)

El Relleno Sanitario Las Iguanas, perteneciente al Municipio Guayaquil, cuenta con 190 Ha y se localiza a 18 km al norte de la ciudad del mismo nombre. Opera desde el 28 de septiembre de 1994 e ingresan aproximadamente 1'044,867 toneladas anuales. Con respecto a la generación de lixiviados, el sitio de disposición produce en promedio $454 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (dato al 2007).

Los lixiviados provenientes de las celdas de confinamiento de residuos sólidos municipales, son recolectados por un sistema de drenes horizontales en cada nivel (cada 5 m), que conecta con una tubería enterrada para enviarse a 7 lagunas de almacenamiento mismas que, en virtud del clima de Guayaquil, se convierten en lagunas de evaporación durante la estación seca, logrando eliminar por completo los lixiviados en dicha época.

Caso 2: Relleno Sanitario El Oasis. Sincelejo, Colombia (Corena, 2008)

El Relleno Sanitario El Oasis, ubicado en el kilómetro 2 vía al corregimiento de Chocho, en el municipio de Sincelejo; inició operaciones en 1997 por el método combinado de trinchera y área. Este sitio de disposición final genera en promedio $0.03 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ en época de secas y $0.05 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ durante las estaciones de lluvia.

El sistema de extracción del líquido consiste en canales colectores que descargan a cárcamos de concreto de donde se extrae el lixiviado y se manda a piscinas impermeabilizadas de 15x18 m con capacidad de $1,500 \text{ m}^3$, para posteriormente recircularlos sobre los residuos dispuestos. Esta técnica es la más conveniente en

épocas de secas debido a las elevadas temperaturas que se presentan en la zona. La recirculación se realiza durante las horas de mayor incidencia solar.

Por otro lado, durante la temporada de lluvias, los lixiviados se retienen en las lagunas entre 15 y 20 días, tiempo en el que se emplea un tratamiento distinto adicionándole cal para mantener el pH neutro.

Durante los meses de enero y febrero, que son los meses de mayor sequía en la zona, se retiran los lodos de las piscinas y se disponen en las celdas de confinamiento.

Caso 3: Relleno Sanitario de Santiago Poniente. Santiago, Chile (Vicente, 2013)

El Relleno Sanitario de Santiago Poniente se ubica en la región Metropolitana de Chile, provincia de Santiago, en la zona de Rinconada de Maipú, y tiene una superficie aproximada de 900 Ha. Actualmente recibe cerca de 40,000 toneladas mensuales de residuos sólidos urbanos, y genera aproximadamente 200 m³ de lixiviados al día.

Los líquidos provenientes de las celdas de disposición se captan mediante una red de ductos que los canalizan a 6 piscinas de almacenamiento en donde ocurre la primera evaporación. Para incrementar la tasa de evaporación, los lixiviados se derivan a 5 bandejas planas, de forma trapezoidal, estacas y de diferentes superficies, en las que el tirante se mantiene debajo de 28 cm. Con este proceso se obtiene un lodo espeso con bajo contenido de humedad que se regresa a las celdas de confinamiento.

Caso 4: Relleno Sanitario Regional de Frontera Chica. Tamaulipas, México (Estudios y técnicas especializadas en ingeniería S. A. de C. V., 2007)

El Relleno Sanitario Regional de Frontera Chica, brinda servicio a 5 localidades pertenecientes al municipio de Frontera Chica que en conjunto generan 84.5

toneladas diarias de residuos sólidos urbanos. Con respecto a la generación de lixiviados se estima en 82 m³ al día.

Para conducir los lixiviados se construyó una red de drenes inclinados al 5% hacia un dren principal que canaliza los líquidos a la laguna de evaporación más cercana. Las lagunas se encuentran ubicadas al Este y Oeste de las celdas de confinamiento, son de forma trapezoidal y tienen capacidad para recibir 3,008 m³ y 5,661 m³. En este sitio el clima predominante es semiseco y semicálido con lluvias escasas todo el año, por lo que el sistema lagunar es suficiente para eliminar los lixiviados, siendo importante mencionar que en los eventos de lluvia se tiene la precaución de cubrir los estanques.

Caso 5. Relleno Sanitario Don Juanito, Villavicencio, Colombia (Arley & Palacio, 2006)

El relleno sanitario Don Juanito, ubicado en el municipio de Villavicencio, abrió sus puertas para la disposición de residuos sólidos urbanos en noviembre de 1996. Este sitio de disposición recibe cerca de 300 toneladas diarias y genera en promedio 1.8 litros de lixiviado por segundo (dato al 2006).

El manejo que se le da a los líquidos percolados provenientes de las celdas de disposición, es recirculando una parte a las zonas de confinamiento clausuradas y mandando el resto a un tanque de almacenamiento, para posteriormente enviarlos a una planta de tratamiento primario en donde se reduce DBO₅, DQO, turbidez, sólidos disueltos fijos, y grasas y aceites. A la salida de la planta, una parte de los líquidos se evapora mediante irrigación nebulosa sobre las celdas de confinamiento, y los lixiviados restantes pasan a un invernadero de 684 m², donde se mantiene un tirante de 25 cm, logrando una evaporación promedio de 189 mm·d⁻¹.

Por último, los lodos generados en la planta de tratamiento y por el proceso de evaporación dentro del invernadero, se someten a deshidratación en lechos de secado para finalmente disponerlos en áreas activas de confinamiento de residuos.

2.3: Caso estudio: Rellenos Sanitarios RESA S. A. de C. V. en Puebla, Pue.

2.3.1: Datos Generales

El Relleno Sanitario RESA S.A. de C.V. de la ciudad de Puebla, Puebla, fue diseñado para la recepción de residuos sólidos urbanos y de manejo especial provenientes de dicha ciudad. El predio fue adquirido por el gobierno del estado de Puebla y la operación está a cargo de la empresa Rellenos Sanitarios RESA, S.A. de C.V. Actualmente, 2013, recibe en promedio 1,600 toneladas diarias, por lo que se encuentra categorizado como tipo “A” de acuerdo a la Tabla No. 1 de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004).

Evolución

El sitio de disposición abrió sus puertas para la recepción de residuos sólidos no peligrosos el 5 de enero de 1995. Desde entonces ha operado ininterrumpidamente, confinando al 2013 un total de 8'100,000 toneladas de residuos sólidos urbanos, aproximadamente. En la actualidad cuenta con 15'000 m² disponibles para la recepción de desechos, en los que se proyecta una vida útil de 15 años (dato al 2013). Debido al estricto apego a las leyes y normativas aplicables que observa el relleno sanitario, así como a las buenas prácticas con que opera, el sitio cuenta con la acreditación de industria limpia a partir de junio de 2013.

Ubicación y clima de la región

El sitio de disposición final, se localiza al Sureste de la ciudad de Puebla como se aprecia en la Figura 2.4, en Camino al Relleno Sanitario km 5.5. Las coordenadas geográficas que limitan el predio son los meridianos 98°05' y 98°10' al Oeste de Greenwich, y los paralelos 18°58' y 19°00' de latitud Norte. Al respecto del clima de esta región, como se aprecia en las Figuras 2.5 a 2.7 obtenidas con información del Marco Geoestadístico Nacional, se determina que predomina el clima templado de

tipo semihúmedo, con lluvias estacionales de verano y temperaturas medias entre 12 y 18 °C.

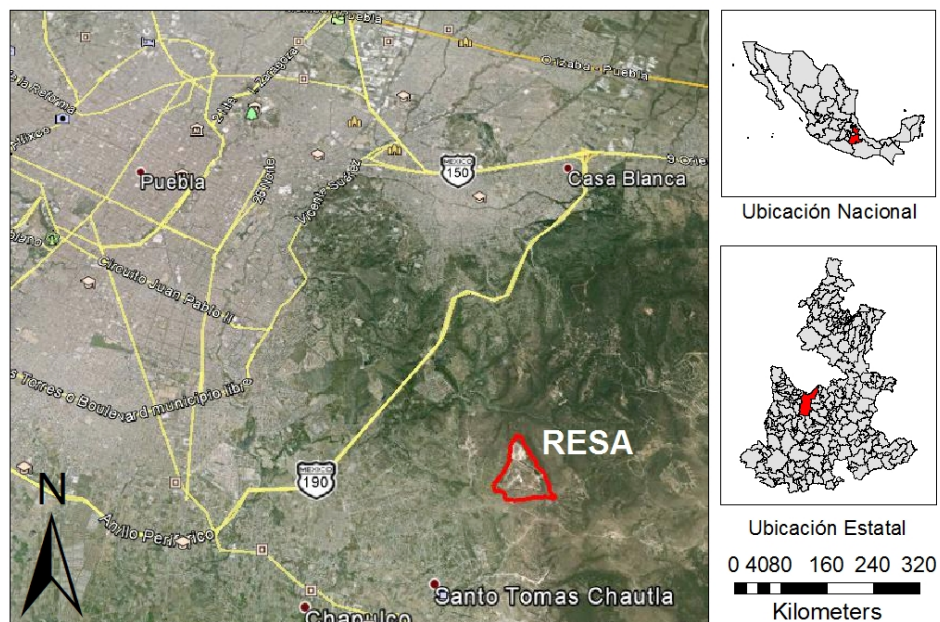


Figura 2.4: Foto aérea de ubicación de sitio

Fuente: Google Earth

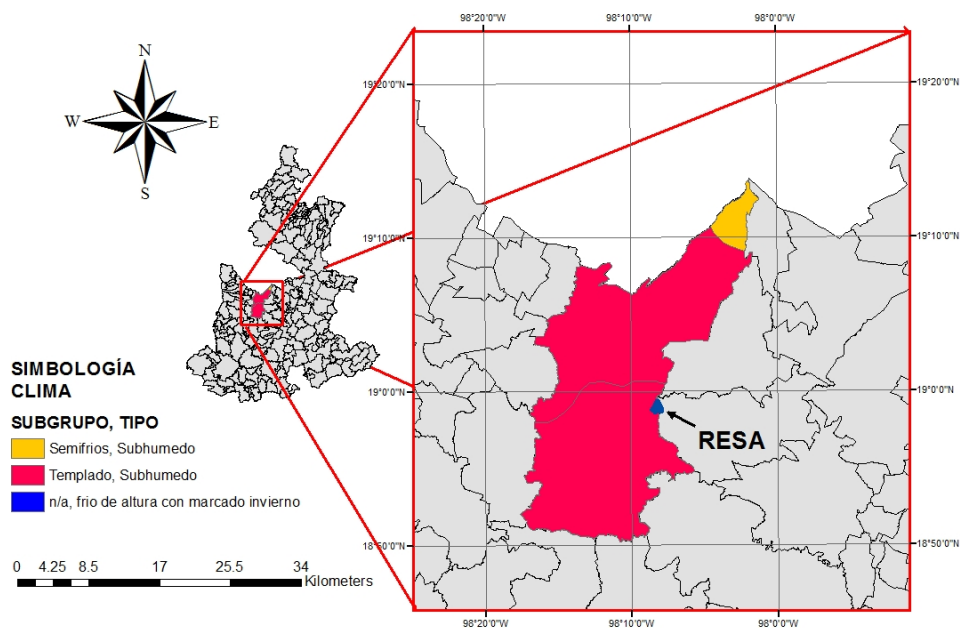


Figura 2.5: Carta de clima del municipio de Puebla

Fuente: Marco geoestadístico nacional

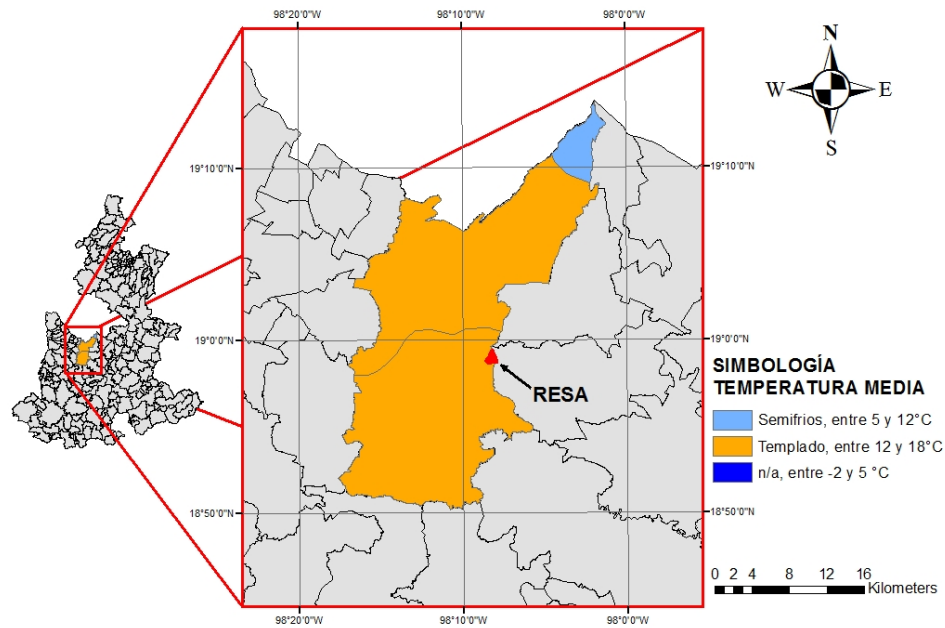


Figura 2.6: Carta de temperatura del municipio de Puebla

Fuente: Marco geoestadístico nacional

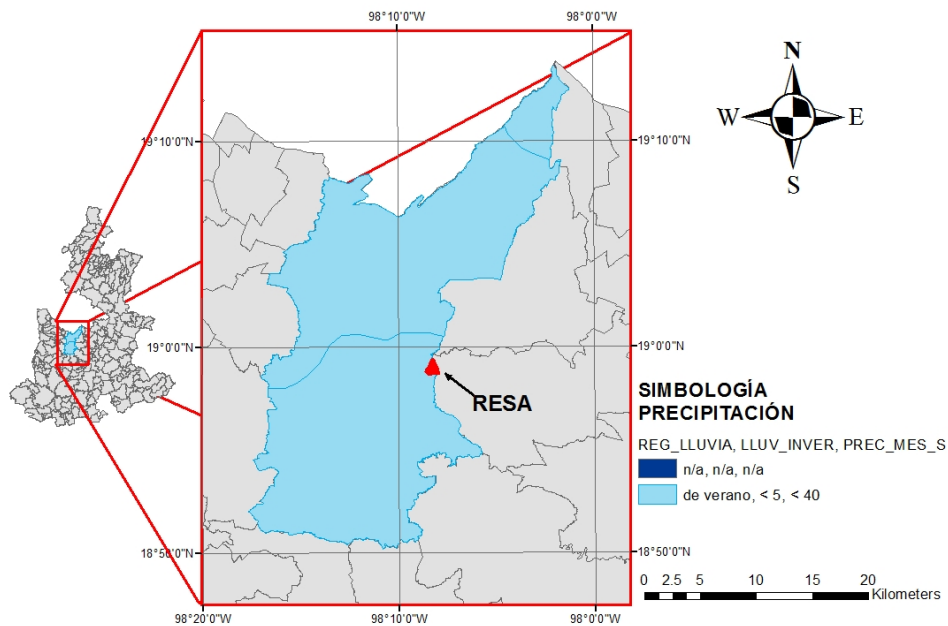


Figura 2.7: Carta de precipitación del municipio de Puebla

Fuente: Marco geoestadístico nacional

2.3.2: Régimen de construcción y operación

El relleno sanitario ocupa un predio de 67 hectáreas y cuenta con las especificaciones de construcción y obras complementarias estipuladas en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, y con las que da cumplimiento a la operación y monitoreo que se establece en la misma norma, entre lo que destaca lo siguiente.

- *Caminos exteriores:* Se trata de un camino de concreto a cargo de una empresa recolectora de residuos sólidos privada en su tramo inicial, y de RESA en su tramo final.
- *Cerca perimetral:* El predio se encuentra delimitado por malla ciclónica.
- *Casetas:* A la entrada del relleno sanitario se encuentra una caseta de control de acceso y una caseta de pesaje en las que labora personal capacitado para, por medio de inspección visual, mantener un estricto control tanto del personal como de los materiales que entran y salen del sitio.
- *Báscula:* Con capacidad para 30,000 toneladas, en un área de 30 m², opera por medio de un software especializado, que resguarda en un banco de datos de acceso exclusivo al personal autorizado, los datos del vehículo, su operador y procedencia, fecha, hora de entrada y de salida, y el peso de residuos. Su calibración y buen funcionamiento se verifican cada 3 meses.
- *Caminos interiores:* Se tiene 2 tipos de caminos interiores; los permanentes de concreto; y aquellos que se habilitan mediante rodamiento de maquinaria pesada según lo requiera la operación del sitio.
- *Señalamientos:* En las diferentes áreas del relleno sanitario se encuentran señalamientos de tipo restrictivos, informativos y preventivos, ubicados estratégicamente de forma visible y comprensible para cualquier persona. Adicional a los señalamientos de vialidad, el personal de tránsito interno optimiza el flujo de vehículos y la descarga de desechos con el uso de lámparas.
- *Celdas de confinamiento:* El sitio cuenta con 2 celdas clausuradas, 1 en funcionamiento y 1 en construcción, todas ellas habilitadas con canales para

la conducción de lixiviados y con pozos de extracción de biogás. La descarga de residuos se realiza en presencia de personal capacitado para la detección de materiales fuera de especificación mediante inspección visual, posteriormente los desechos se bandean y por último se compactan hasta un peso volumétrico mayor a $700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Cada vez que se cierra un frente de tiro, los residuos se cubren con material arcilloso nombrado “tepetate” proveniente de las excavaciones del mismo predio, el cual también es esparcido y compactado. El método por el que se opera es el combinado de trinchera y área.

- *Sistema de impermeabilización:* Tanto las celdas de disposición final como las lagunas de retención de lixiviados, se encuentran debidamente impermeabilizadas mediante un sistema combinado natural y sintético, para impedir la infiltración de sustancias contaminantes al suelo. Primeramente se compacta el suelo natural al 95% proctor estándar, y posteriormente se coloca una capa de material natural de bajo coeficiente de conductividad hidráulica, seguida de una capa de geotextil sobre la que se coloca otra de material natural de la misma especificación que la anterior; por último se extiende geomembrana sobre la que se coloca material natural para proteger al sistema sintético de daños.
- *Oficinas:* Edificación de una planta suficiente para el personal administrativo.
- *Taller de mantenimiento:* Se cuenta con un área designada para el mantenimiento preventivo y correctivo de la diferente maquinaria, en la que laboran 5 mecánicos.
- *Almacén temporal de residuos peligrosos:* Ubicado dentro del taller de mantenimiento y equipado para almacenar los residuos provenientes del servicio que se le da a la maquinaria.
- *Almacén:* Ubicado dentro del taller de mantenimiento en el que labora el encargado y su ayudante, para proveer al relleno sanitario de refacciones y herramienta que requiera.
- *Planta de separación de residuos recuperables:* Se cuenta con una planta de separación equipada para la recuperación de vidrio, papel, tetrapack,

plástico, materia orgánica, fierro y aluminio, provenientes de sectores de importante generación de residuos de manejo especial. Se trata de un área resguardada y equipada con tolvas para recepción de residuos sólidos, bandas para el paso programado de los mismos, imanes para la extracción de materiales metálicos, tolvas de retención de residuos separados y maquinas prensas para su compresión; en donde labora personal capacitado en identificación y clasificación de residuos. El material separado y compactado se almacena en pacas, para finalmente transportarlos a empresas que los incluyen en sus procesos; mientras que el material no aprovechable se lleva a la celda de disposición de residuos sólidos urbanos.

- *Planta de composta:* El relleno sanitario cuenta con un área delimitada para el tratamiento de residuos provenientes de jardinería, equipada para triturarlos y obtener composta seca.
- *Planta de recuperación de biogás:* El biogás que se genera en las celdas de disposición final se canaliza a una planta procesadora de biogás mediante 52 pozos de extracción. La planta consta de un área de monitoreo automatizado, 2 sopladores que trabajan alternadamente en jornadas de 240 horas y una antorcha para quemar el biogás. Se proyecta la adquisición de equipo para generación de energía eléctrica a partir de biogás.
- *Área de emergencia:* Se cuenta con un espacio cercano a la entrada del relleno sanitario acondicionado para el almacenamiento temporal de residuos, para cuando por alguna eventualidad no se pueda acceder a la celda de operación normal.
- *Monitoreo ambiental:* Periódicamente se realizan estudios de caracterización a los lixiviados y al biogás; y para cerciorarse que no exista infiltración de éstas sustancias, se cuenta con 2 pozos de monitoreo ubicados uno aguas arriba y otro aguas abajo del sitio de confinamiento. Por otro lado, el personal de supervisión y monitoreo ambiental del relleno sanitario realiza recorridos diarios por todo el predio para detectar cualquier anomalía, y en caso de que amerite, proceder a la brevedad para contenerla. Asimismo, en virtud del riesgo propio de las actividades del sitio de confinamiento, el relleno sanitario

realiza campañas de vacunación a todo el personal que labora en la empresa.

2.3.4: Manejo de lixiviados

Los lixiviados que se generan en las diferentes celdas de disposición final, se conducen mediante una serie de canaletas que llegan a un dren principal para finalmente dirigirlos a 3 lagunas de retención. La producción de estos líquidos, en la actualidad asciende a 75 m³ diarios, llenando las 3 lagunas que en total suman 3,000 m³ de capacidad (dato al 2013).

La tercera parte de los lixiviados retenidos en las lagunas se recircula a los residuos ya dispuestos en virtud de sus requerimientos de humedad; para ello, una parte se extrae con el uso de una bomba y un generador, para mandarlos a aspersores que mediante rocío los deposita sobre las celdas de confinamiento; mientras que otra parte son sustraídos directamente de las lagunas por una pipa que los riega en áreas determinadas.

Las otras dos terceras partes de los lixiviados pasan a un cárcamo de bombeo que funciona con 4 bombas de tipo sumergible para enviarlos a tratamiento. Éste comienza con un tren de filtrado que consta de 3 contenedores de 5,000 litros cada uno, en los que se hace circular el líquido entre grava y arena, para posteriormente mandarlos a la planta tratadora. Se tiene proyectada la expansión de esta etapa del tratamiento adicionando 5 trenes de filtrado, que funcionarán en paralelo.

La planta tratadora de lixiviados, con capacidad de 50 m³·d⁻¹, comienza con 2 tanques de oxidación de 11,000 litros de capacidad, en los que se le añade peróxido y ozono y en donde permanecen alrededor de 2 horas. Posteriormente se envían a 2 tanques de mezclado, de 1,000 litros cada uno, para agregarles un polímero; el lodo resultante de esta operación se lleva a un filtro prensa y al digestor de lodos, mientras que la parte líquida pasa a 2 reactores biológicos de 100,000 litros en donde el tiempo de residencia varía sensiblemente por factores climáticos. Seguido del tratamiento biológico, los lixiviados llegan a un sedimentador de 11,000 litros en

el que permanecen alrededor de 2 horas, para posteriormente mandarlos a un clarificador de 11,000 litros en donde se adiciona ozono y se retienen hasta su neutralización. Por último, los líquidos se hacen pasar por un filtro de arena y por uno de carbón activado de 1,200 litros cada uno.

Por otro lado, como medidas para prevenir la generación excesiva de lixiviados debido a la infiltración desmesurada de agua de lluvia, las celdas clausuradas se encuentran impermeabilizadas con geomembrana, y se han habilitado una serie de drenes diseñados y ubicados estratégicamente para desviar la mayor cantidad posible de agua de la superficie de las distintas celdas.

Relacionando las Tablas 2.2 a 2.4 con las operaciones unitarias de la planta tratadora de lixiviados, se puede inferir que presentan de altas a muy altas eficiencias en la remoción de contaminantes; sin embargo, también es probable que se enfrenten a problemas como formación de espumas, precipitados, generación de lodos y emisión de compuestos orgánicos volátiles; por último, los requerimientos energéticos, insumos químicos y mantenimiento, pueden llegar a representar el mayor de los problemas debido a los costos que originan.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1: Sistema de evaporación mediante invernaderos

Para el caso de la evaporación de lixiviados en invernaderos, Szantó M. en su publicación: “Criterios para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios mediante evaporación por radiación solar”; describe al proceso de la siguiente manera: al llegar el rayo de luz solar a las paredes de la estructura, parte de la radiación de onda corta se refleja a la atmósfera y el resto se transmite al interior del equipo; de esta energía que entra al sistema, una parte es reflejada por el líquido, mientras que el resto se absorbe por el mismo, aumentando su temperatura y emitiendo radiación de longitud de onda larga. Este tipo de radiación es retenida por el invernadero, lo que permite elevar la temperatura en su interior y facilita el proceso de evaporación (Szantó *et al.* 2011).

Para desplazar el vapor generado, el sistema debe estar provisto de ventilación adecuada que suministre continuamente aire fresco para reemplazar el aire saturado de humedad, teniendo en cuenta que este recambio de aire también se llevará consigo parte del calor retenido por la estructura. Adicional a esto, si se logra flujo turbulento se mejorará el contacto con el líquido, concluyendo en mayor evaporación. La ventilación eficiente dependerá del diseño geométrico del invernadero, en especial del techo y de la ubicación de las ventilas con respecto a la dirección de los vientos dominantes (Ibídem, 2011).

Los parámetros esenciales que se deben considerar para el diseño del invernadero son: 1) factores climáticos externos: temperatura, precipitación, radiación solar y viento; mismos que determinarán el microclima interno y; 2) factores internos: temperatura, humedad, ventilación, altura de la lámina del líquido y área del invernadero. Éstos dos últimos resultan cruciales, ya que estudios realizados demuestran que a mayor área, mayor evaporación; y que a menor lámina de líquido, mayor evaporación (Arley & Palacio, 2006).

Por otro lado, la radiación que llega a un plano horizontal con incidencia angular, es de menor intensidad que si lo hiciera sobre un plano normal a su dirección, es decir que la máxima intensidad de radiación solar se conseguirá en un plano perpendicular a la latitud de la zona (García-Badell, 2003).

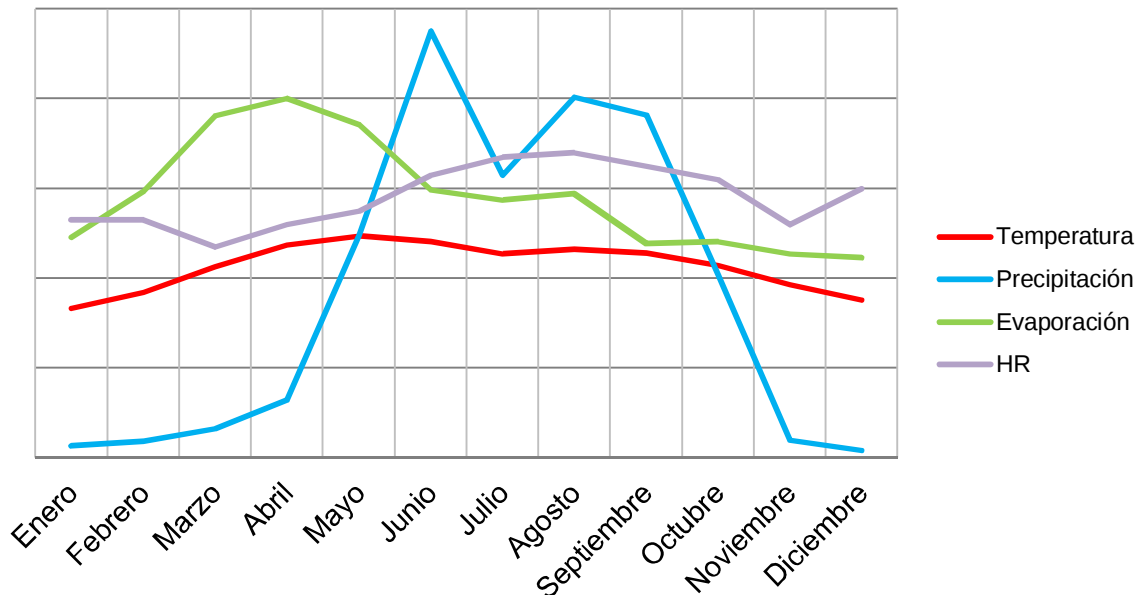
Por último, los materiales que se seleccionen para la construcción del invernadero, deben ser capaces de permitir la entrada de la mayor cantidad posible de radiación, al mismo tiempo que retienen su salida, y de soportar no sólo la estructura y los eventos climáticos sino también la corrosión de los lixiviados a tratar.

3.1.1: Parámetros de diseño

Según un estudio realizado en el año 2004 para el estado de Puebla (Ramos & Aguilar, 2005) la constante solar que llega a la alta atmósfera es de $2\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$. Si se considera a esta radiación como el 100%; aproximadamente el 25% se devuelve al espacio exterior debido a las nubes y el polvo, 16% se absorbe por la atmósfera y 1% por las nubes; mientras que la tierra absorbe el 26% como radiación directa, 14% como radiación difusa y 11% como radiación dispersa; y un 7% es reflejada por la superficie terrestre; es decir, que la energía que incidirá sobre las paredes y techo del invernadero será aproximadamente de $1.02\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$.

Al respecto de los factores climáticos, con base en registros normales climatológicos del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua, obtenidos en la estación climatológica 21163 El Batán, que actualmente se encuentra en operación, con coordenadas geográficas: latitud Norte $18^{\circ} 58' 47''$ y longitud Oeste $98^{\circ} 10' 40''$, a una altura de 2,108 m.s.n.m., localizada a 3.96 km del sitio de experimentación; y registros normales climatológicos del observatorio sinóptico, también del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua, con coordenadas geográficas: latitud Norte $19^{\circ} 03'$ y longitud Oeste $98^{\circ} 10'$, a 2,179 m.s.n.m., a una distancia de 6.12 km del relleno sanitario en estudio; se obtuvieron los datos mensuales estadísticos de 30 años de los parámetros: 1) temperatura media normal, 2) precipitación normal, 3) evaporación normal y 4) humedad relativa media normal. En la Figura 3.1 se muestra el comportamiento de estos parámetros

climáticos en el transcurso del año; y con la finalidad de relacionarlos entre sí, los valores se presentan en porcentajes a partir de escalas normalizadas para facilitar su comparación.



Temperatura: Media normal de 1971 a 2000. Estación meteorológica 21163 El Batán

Precipitación y Evaporación: Normales de 1981 a 2010. Estación meteorológica 21163 El Batán

Humedad relativa: Media normal de 1981 a 2000. Observatorio sinóptico

Figura 3.1: Parámetros climáticos en el transcurso del año

Fuente: Comisión Nacional del Agua

De la Figura 3.1 se determina que los meses más fríos son diciembre, enero y febrero, mientras que los más cálidos son de mayo a septiembre, aunque la temperatura media mensual no cambia considerablemente en el transcurso del año; el periodo de lluvias se presenta de abril a noviembre con mayor incidencia de mayo a octubre; todo el año hay evaporación, siendo significativa entre marzo y mayo; y la humedad relativa oscila entre 47 y 68 % encontrando a marzo como el mes más seco y de julio a septiembre como los meses más húmedos.

Se encuentra relación entre los parámetros de temperatura, precipitación y humedad relativa: cuando la temperatura media empieza a subir, se presentan algunos eventos de precipitación pluvial, ocasionando que se eleve la humedad en el ambiente; posteriormente, en el periodo en que se registra mayor lluvia, también

aumenta la humedad relativa; por otro lado, la temperatura media y la evaporación muestran un comportamiento similar en el transcurso del año.

En lo que se refiere a la circulación de los vientos en Puebla, según el “Programa de gestión de la calidad del aire del estado de Puebla” (Secretaría de sustentabilidad ambiental y ordenamiento territorial. Dirección de calidad del aire y cambio climático, 2012), depende en gran medida de la topografía.

Los vientos catabáticos, que es el aire fresco y seco que desciende de las elevaciones cercanas después de haberse condensado toda la humedad (Comisión Nacional del Agua, 2015), se presentan desde las primeras horas del día hasta las 11:00 horas aproximadamente, y provienen del Norte por las pendientes del valle y del Noreste por La Malinche.

Una o dos horas antes del mediodía, la circulación del viento se invierte debido al calentamiento del aire en el fondo del valle del Sur, incrementando su intensidad y dando origen a los vientos anabáticos, que son los vientos húmedos y cálidos que se elevan por una ladera y que a su paso se condensan provocando la formación de nubes (Ibídem, 2015). Este viento del Sur domina hasta una hora después de la puesta del sol.

Durante la primera parte de la noche predomina una corriente proveniente del Este que se origina en los valles de Tepeaca y Oriental, y se canaliza hacia la ciudad de Puebla debido al estrangulamiento que se forma entre la sierra de Amozoc y las faldas de La Malinche en su parte Sur.

De manera general, el viento en Puebla proviene del Sur y Sureste durante la tarde, mientras que al anochecer y por la mañana sopla del Este; y estacionalmente, durante los periodos de verano y otoño los vientos dominantes soplan del Norte y Noreste, mientras que en invierno y primavera provienen del Sur y Suroeste.

En la Figura 3.2 se presentan las rosas de vientos registrados en la estación de monitoreo Agua Santa en el año 2006 a diferentes periodos del día: de 0 a 6 horas

(superior izquierda), de 6 a 12 horas (superior derecha), de 12 a 18 horas (inferior izquierda), y de 18 a 24 horas (inferior derecha).

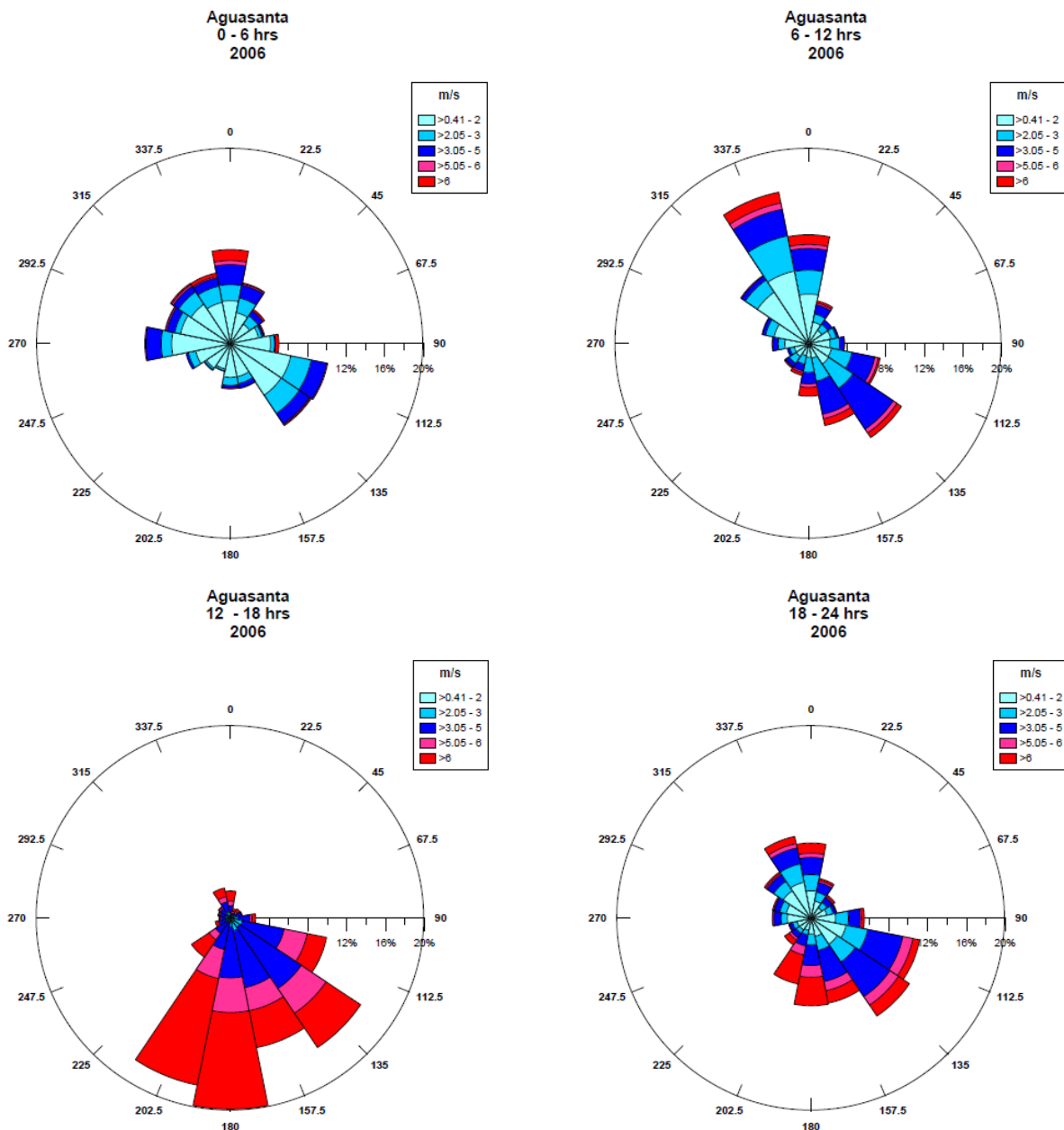


Figura 3.2: Rosas de vientos dominantes por periodos del día, estación de monitoreo Agua Santa, 2006

Fuente: (Secretaría de sustentabilidad ambiental y ordenamiento territorial. Dirección de calidad del aire y cambio climático, 2012)

Derivado de la información anterior se concluye que, en la región donde se llevará a cabo la etapa experimental del presente proyecto, la temperatura no varía de

manera significativa en el transcurso del año, al contrario de los vientos dominantes y de la precipitación pluvial que muestran un comportamiento marcadamente estacional; la mayor evaporación ocurre durante la primavera, al final de la época de sequía, cuando ya hay algunos eventos de precipitación y la temperatura media llega a su máximo registro; la temporada de lluvia se presenta de mayo a octubre, mientras que los demás meses se manifiestan secos con escasos eventos de precipitación; el ambiente se exhibe con una humedad relativamente baja, por lo que hay que considerar al viento seco como un factor de aporte significativo en la disminución de tirantes de la lámina del líquido; por último la velocidad y dirección del viento cambia notoriamente en el transcurso del día, siendo durante la tarde cuando se presenta con mayor intensidad.

A partir del análisis expuesto se determina que, para la realización de los trabajos de campo, el invernadero se construirá bajo las siguientes condiciones: paredes y techo de materiales tales que logren la máxima transmitancia; el techo deberá estar inclinado a 19° debido a la latitud del sitio, y la pared de menor altura quedará orientada hacia el Sur; en virtud de que en la zona de experimentación la temperatura media mensual más alta no llega a los 20°C , la pared Norte de la estructura se debe acondicionar para impedir que la radiación que entra por el techo y las paredes Este, Sur y Oeste, así como el albedo debido al líquido, se escape por el extremo Norte; por último, el invernadero deberá estar dotado de ventilas para la entrada del aire mínimo necesario para desplazar el aire saturado de humedad sin perder el efecto invernadero.

Por otro lado, un factor importante a considerar en el diseño de un invernadero para evaporación es el insumo con el que se trabajará, ya que sus dimensiones serán dictadas por la cantidad de líquidos a tratar así como por el espacio disponible; y por su parte, el producto residual y la fase vapor que se genere dependerán de sus características iniciales. Para el caso estudio, los lixiviados tienen los componentes y concentraciones que se presentan en la Tabla 3.1, caracterización realizada por un laboratorio certificado ante la Entidad Mexicana de Acreditación, EMA, en septiembre de 2014.

Tabla 3.1: Caracterización de lixiviados

Parámetro	Concentración	Unidades
Coliformes totales	2,300.0000	NMP·100ml ⁻¹
Conductividad electrolítica	2,542.0000	mS·m ⁻¹
D.Q.O.	18,500.0000	mg·L ⁻¹
D.B.O. ₅	8,025.0000	mg·L ⁻¹
Determinación de pH	7.4400	Unidades
Fenoles	< 0.0216	mg·L ⁻¹
Grasas y aceites	29.3000	mg·L ⁻¹
Nitratos	< 0.1800	mg·L ⁻¹
Nitritos	< 0.0212	mg·L ⁻¹
Nitrógeno total	2,013.9000	mg·L ⁻¹
Nitrógeno total Kjeldahl	2,013.9000	mg·L ⁻¹
Sustancias activas a azul de metileno	< 0.2840	mg·L ⁻¹
Sólidos disueltos totales	4,082.0000	mg·L ⁻¹
Sólidos sedimentables	1.0000	mg·L ⁻¹
Sólidos suspendidos totales	3,233.3000	mg·L ⁻¹
Fluoruros	< 0.2070	mg·L ⁻¹
Cloruros	2,489.0000	mg·L ⁻¹
Temperatura	20.2	°C
Aluminio total	< 2.2260	mg·L ⁻¹
Arsénico total	< 0.0021	mg·L ⁻¹
Cadmio total	< 0.0870	mg·L ⁻¹
Cianuros	0.9179	mg·L ⁻¹
Cobre total	< 0.0860	mg·L ⁻¹
Cromo hexavalente	< 0.1130	mg·L ⁻¹
Cromo total	< 0.1080	mg·L ⁻¹
Mercurio total	< 0.0042	mg·L ⁻¹
Níquel total	0.2370	mg·L ⁻¹
Plata total	< 0.1010	mg·L ⁻¹
Plomo total	< 0.1150	mg·L ⁻¹
Zinc total	0.5620	mg·L ⁻¹

Fuente: Rellenos Sanitarios RESA, S.A. de C.V.

3.1.2: Diseño y construcción del modelo experimental

Para efectos de la etapa experimental del presente proyecto, se diseñó un invernadero piloto con especificaciones que se detallan en las Tablas 3.2, 3.3 A y B y 3.4. Las dimensiones se determinaron a partir del mínimo necesario para llevar a cabo los experimentos contemplados: el área de la base es el resultado del acomodo de las palanganas que contendrán los líquidos a monitorear, apenas separadas entre ellas para permitir el acceso; la altura menor es la suficiente para que el operador pueda permanecer de pie; la inclinación del techo se determina acorde a la latitud del sitio de experimentación, ya que como se explica en el apartado 3.2, la máxima intensidad de radiación se conseguirá en un plano perpendicular a su incidencia; y la altura mayor está dada por el cateto que resulta de la inclinación del techo y el largo del invernadero.

Tabla 3.2: Dimensiones del invernadero piloto

Ancho	1.80 m
Largo	2.10 m
Altura 1	1.50 m
Altura 2	2.18 m
Inclinación del techo	19°

El diseño del invernadero incluye una puerta ubicada en la pared Oeste de 1.50 m de alto y 1.00 m de ancho, y ventilas para el recambio de aire en todas sus paredes. Al respecto de la ventilación, fue necesario realizar pruebas preliminares conjugando factores climáticos para encontrar la cantidad y dimensiones de las ventanas, partiendo de la referencia de un estudio realizado en el centro de México sobre la ventilación en invernaderos para cultivo, en el que se llegó a la conclusión de que para que exista ventilación turbulenta en el interior de éstos, las ventilas deben cubrir una superficie cercana al 10% del área de la base (Romero *et al.* 2010).

Para llevar a cabo las pruebas preliminares se utilizaron 9 bandejas con agua a las mismas condiciones, y se colocaron 6 dentro del invernadero y 3 afuera. Desde la

primera noche fue evidente que el 10% de ventilación, con respecto al área de la base, es insuficiente para lograr la turbulencia necesaria en el invernadero piloto, ya que la disminución de tirantes provocado por el contacto del aire con la superficie del líquido fue mayor en las charolas de afuera; asimismo, durante el periodo de sol, aunque la temperatura interna del invernadero permaneció más alta en comparación con la temperatura ambiente, no fue suficiente para considerar que en las charolas internas la evaporación fuera eficaz.

Después de algunos días de trabajo en campo y relacionando ciertos parámetros climáticos, la mayoría de ellos de forma empírica por falta de instrumentación, se observó que en el sitio de experimentación el viento empieza a correr con mayor intensidad alrededor de las 14:00 horas, tomando velocidades considerables a partir de las 16:00 horas aproximadamente, y que además este aire se puede considerar con muy poca humedad.

Por otro lado, la temperatura cambia significativamente en el transcurso del día como se aprecia en la Figura 3.3, en la que se esquematiza el comportamiento de la temperatura promedio a distintas horas, para algunos días en que se realizaron las pruebas preliminares en enero de 2015; los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica RAMM12: Centro Histórico, Puebla, México, de la página web weather underground, con coordenadas geográficas latitud Norte 19° 04' y longitud Oeste 98° 20', a 2,150 m.s.n.m. (Weather underground, 2015), a una distancia de 8.9 km del relleno sanitario.

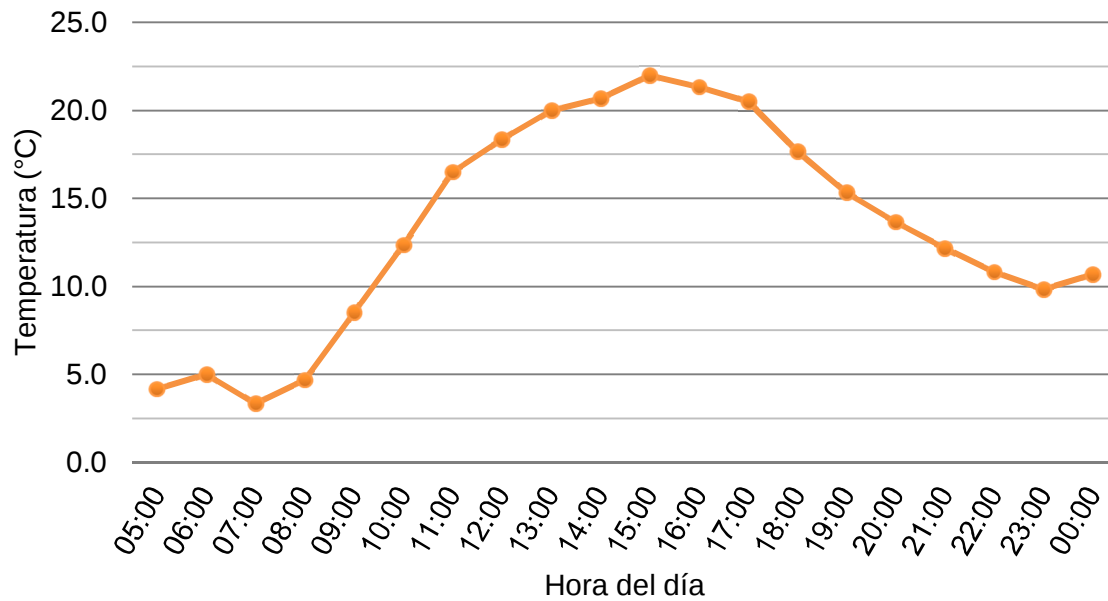


Figura 3.3: Temperatura promedio en el transcurso del día, enero 2015

Fuente: (Weather underground, 2015)

En virtud de que durante la noche la temperatura cae bruscamente, y aunque el invernadero sí logró retener calor, éste fue insuficiente para continuar con el proceso de evaporación; y ya que se considera que la velocidad y condición seca del viento nocturno que incide sobre el líquido contribuye satisfactoriamente en su disminución; se llegó a la conclusión de que para el caso estudio, la ventilación óptima en el transcurso de la noche debe ser distinta a la diurna, dando lugar a la entrada de grandes cantidades de aire escaso de humedad que logren la turbulencia deseada durante la noche, mientras que en el día se busca la ventilación mínima suficiente para desplazar el aire saturado de humedad, por lo que se procedió a trabajar en el diseño de un sistema de ventilación eficaz que durante el día logre el efecto invernadero deseado, mientras que por la noche se llegue a la turbulencia de viento sobre los lixiviados.

Después de varios días de abrir y cerrar ventanas a prueba y error, se encontró la ventilación óptima con las dimensiones que se detallan en las Tablas 3.3 A y B. La Figura 3.4 es una fotografía en la que se exhibe las ventanas abiertas del Este y del Sur que se usaron para alcanzar la ventilación turbulenta durante la noche; y en la

Figura 3.5 se logran apreciar las ventilas de entrada de aire ubicadas en la parte de abajo de la pared Sur del invernadero, que se utilizaron en el periodo diurno.

Tabla 3.3A Ventilación diurna

Ubicación		No.	Dimensiones (cm)	Área (cm ²)	Porcentaje de la base (%)
Norte	Arriba	5	3 x 10	150	0.40
Sur	Arriba	3	3 x 10	90	0.24
	Abajo	3	3 x 5	45	0.12
Este	Arriba	2	3 x 10	60	0.16
	Abajo	3	3 x 5	45	0.12
Oeste	Arriba	3	3 x 10	90	0.24
Total				480	1.27

Tabla 3.3B Ventilación vespertina - nocturna

Ubicación		No.	Dimensiones (cm)	Área (cm ²)	Porcentaje de la base (%)
Norte	Arriba	5	3 x 10	150	0.40
Sur	Arriba	3	3 x 10	90	0.24
	Centro	1	50 x 180	9,000	23.81
	Abajo	3	3 x 5	45	0.12
	Arriba	2	3 x 10	60	0.16
Este	Centro	1	50 x 210	10,500	27.78
	Abajo	3	3 x 5	45	0.12
Oeste	Arriba	3	3 x 10	90	0.24
Total				19,980	52.86

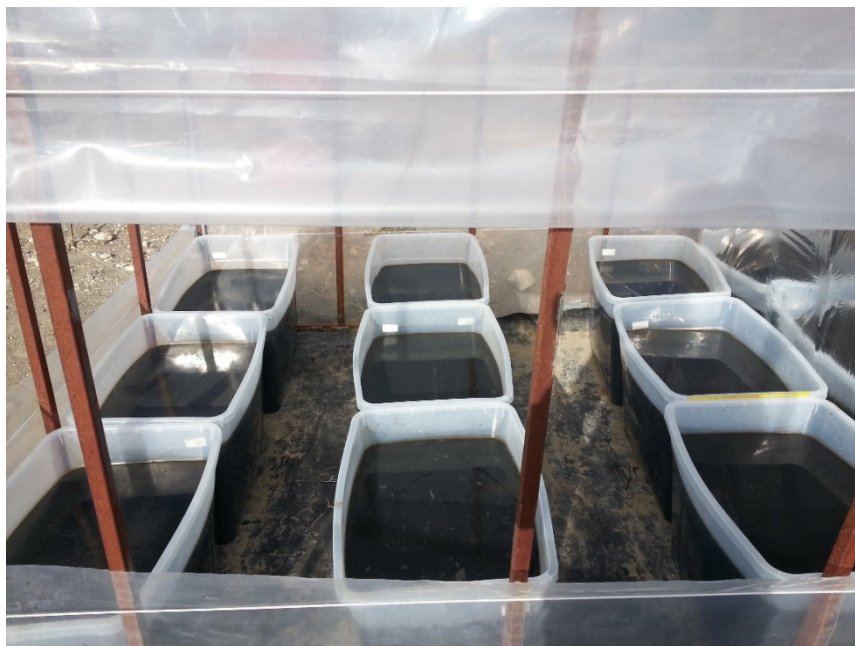


Figura 3.4 Ventilación vespertina – nocturna (pared Este)

Al respecto de los materiales de construcción, en virtud de que lo que se busca es el mayor paso de radiación solar, la estructura metálica se forró en su techo y paredes con plástico transparente del mínimo grosor aceptable para exteriores; el suelo se tendió con geomembrana para su protección en caso de derrame accidental de lixiviados, además de adicionar calor al sistema por ser un cuerpo negro; por último, para evitar que la radiación que entra por las paredes y techo se escape por el extremo Norte del invernadero, se colocó una pared de madera forrada con papel aluminio. Los materiales con que se construyó el modelo experimental se reportan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Materiales de construcción

Estructura	Metálica tubular
Techo y paredes	Plástico transparente calibre 400
Piso	Geomembrana
Pared Norte (interna)	Madera forrada de papel aluminio

En la Figura 3.5 se muestra la fotografía del prototipo, mismo que se colocó a unos metros del proceso de pretratamiento de lixiviados para mayor facilidad al momento de requerir el insumo, y que se ancló en dirección al Sur para el mayor aprovechamiento de incidencia de radiación solar.



Figura 3.5: Invernadero piloto

Para operar el modelo experimental, se hizo uso de palanganas con las especificaciones que se detallan en la Tabla 3.5 y que se muestran en la Figura 3.6.

Tabla 3.5: Bandejas de experimentación

Ancho	0.36 m
Largo	0.56 m
Alto	0.43 m
Material	Plástico transparente



Figura 3.6: Bandejas de experimentación

3.2: Operación del modelo experimental

La metodología que se planteó para el presente proyecto consta de una serie de pruebas enfocadas a determinar, como finalidad principal, si el microclima interno de un invernadero es eficaz para el proceso de evaporación de lixiviados, obteniendo la disminución promedio diaria de tirantes; y en virtud de que en la ciudad de Puebla algunos factores climáticos cambian drásticamente en el transcurso del día, como ya se analizó en el apartado 3.1, se estudió también dicha disminución por periodos del día. Estos parámetros se obtuvieron mediante medición lineal de la altura del lixiviado contenido en las charolas, en relación con las temperaturas superficiales y medias del líquido, la temperatura del interior del invernadero y la temperatura ambiente externa; y los datos climatológicos puntuales se tomaron de la estación meteorológica RAMM12: Centro Histórico, Puebla, México, que arroja la página web wunderground.com.

Como se explicó en apartados anteriores, un factor que se previó influiría sensiblemente en el proceso de evaporación es la altura de la lámina del líquido, ya que las burbujas de vapor formadas dentro de éste, escapan más rápido si tienen

que recorrer menos distancia, es decir que, a menor tirante, mayor evaporación; por lo que fue necesario determinar la altura óptima de la lámina del líquido a evaporar. Este parámetro se obtuvo comparando 9 diferentes alturas, partiendo de referencia bibliográfica (Vicente, 2013), y que operaron en paralelo para brindarles las mismas condiciones climáticas.

Asimismo, debido al ángulo de incidencia de radiación solar sobre el invernadero, se consideró la posibilidad de que dentro de la estructura existieran sitios en los que la evaporación fuera menor que en otros, por lo que se estudió el comportamiento de las tasas de evaporación durante el día de acuerdo a su ubicación dentro del invernadero, utilizando el mismo tirante de lixiviado en 9 charolas que operaron en paralelo para brindarles las mismas condiciones climáticas.

Por otro lado, se ha reportado que la mezcla gas-vapor que se genera en el proceso de evaporación forzada, puede llevar consigo cantidades significativas de compuestos orgánicos volátiles (Giraldo, 2010), mismos que se añaden a la atmósfera, por lo que fue necesario cerciorarse que la tecnología propuesta no propicie contaminación al aire; es por ello que el presente proyecto contempló tomas periódicas de muestras de los líquidos en estudio, para la determinación de algunos parámetros fisicoquímicos de la fase líquida a lo largo del proceso.

Por último, el proceso se puede llevar a cabo por lotes, dejando el líquido problema estancado por un lapso pertinente, o recargando con cierta periodicidad el lixiviado evaporado. En el presente proyecto se compararon ambas técnicas, efectuándolas en paralelo y sometiéndolas al mismo tiempo de retención.

Para garantizar resultados fidedignos, y en virtud de que la eficiencia del sistema propuesto depende del clima de la región, la experimentación se llevó a cabo *in situ* bajo las condiciones a las que se encuentra el relleno sanitario. Los procedimientos que se describen a continuación, se realizaron por triplicado para darle confiabilidad a los resultados, y los residuos se integraron al tren de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario.

1. Determinación del tirante óptimo de lixiviados

Se vertió lixiviado en las palanganas a diferentes alturas: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 y 415 mm; y se dejaron en reposo durante 24 horas, monitoreando cada 4 horas, desde las 9:00 am hasta las 5:00 pm, la diferencia de altura del líquido contenido en cada una de ellas y sus temperaturas superficiales y medias (a 134 mm de la superficie) o de fondo para las charolas con tirantes de 50 y 100 mm; y a las 8:00 am del día siguiente se tomó una última lectura para registrar la disminución de lixiviados durante la noche.

2. Eficiencia en la disminución de tirantes de lixiviados según su ubicación dentro del invernadero

Se colocaron 9 bandejas dentro del invernadero en las que se vertió lixiviado a la altura óptima determinada en la primera prueba, y se dejaron en reposo durante 24 horas, monitoreando cada 1.5 horas, a partir de las 9:30 am y hasta las 3:30 pm, la diferencia de altura del líquido contenido en cada una de ellas, las temperaturas ambiente externa e interna del invernadero, y las temperaturas medias y superficiales del líquido en estudio; al igual que en la prueba anterior, a las 8:00 am del día siguiente se tomó una última medición para obtener la diferencia de tirantes ocurrida en el transcurso de la noche. En esta prueba se dejó una palangana fuera del invernadero con el mismo tirante que las internas, con la intención de simular la laguna de retención de lixiviados, pero brindándole las mismas condiciones de incidencia de radiación solar y de viento, a las que se encontraba expuesto el invernadero.

3. Proceso estancado vs. recarga

Utilizando el tirante óptimo determinado en la prueba 1, se colocaron 6 palanganas dentro del invernadero para que en paralelo, 3 funcionaran por lote, dejando el lixiviado estancado durante 20 días, periodo considerado como suficiente para la

obtención de datos significativos; mientras que las otras 3 se recargaron hasta su altura inicial cada vez que se observó una disminución igual o mayor al 10% de su volumen inicial. Asimismo se colocaron 2 charolas fuera del invernadero con el mismo tirante inicial que las internas; en una se vertió lixiviado con la intención de simular lo que ocurre en la laguna de retención, pero brindándole las mismas condiciones a las que se sometió el invernadero; y en la otra se depositó agua para obtener datos *in situ* de evaporación y compararlos con los registros de los lixiviados.

El monitoreo de la altura del líquido contenido en cada una de las charolas, y sus temperaturas superficiales y medias, se llevó a cabo cada 4 horas desde las 8:30 am y hasta las 4:30 pm. Asimismo, los días 1, 5, 10, 15 y 20 de la prueba, se tomaron muestras a nivel de la superficie de cada una de las charolas con lixiviados, para analizar en laboratorio el comportamiento de algunos parámetros fisicoquímicos. En la Tabla 3.6 se especifican los métodos y equipos utilizados para las determinaciones de los parámetros que se monitorearon, además de la Pipeta Transferpette S 1-10 ml, que se usó en todos los procedimientos.

Tabla 3.6: Metodología de la caracterización de las muestras

Parámetro	Método	Equipo
Temperatura		Termómetro de mercurio
pH		Potenciómetro Marca: CONDUCTRONIC Modelo: pH 10
Conductividad		Conductímetro Marca: CONDUCTRONIC Modelo: CL 8
Sólidos totales	Gravimetría	• Estufa Marca: SHEL LAB • Desecador • Balanza Analítica Marca: OHAUS Modelo: E12140
Sólidos suspendidos totales	Gravimetría	• Equipo de filtración • Bomba de vacío Marca: GENERAL ELECTRIC • Estufa Marca: SHEL LAB • Desecador • Balanza Analítica Marca: OHAUS. Modelo: E12140
Sólidos disueltos totales	Cálculo aritmético	
Alcalinidades	Método de fenolftaleína y total, titulando con ácido sulfúrico	
Cloruros	Titulación con nitrato de plata	
Turbiedad		
Fosfatos	Espectrometría	Espectrofotómetro de laboratorio Marca: HACH Modelo: DR/2500
Sulfatos		
DQO	Espectrometría	• Reactor para DQO Marca: HACH Modelo: 45600 • Espectrofotómetro de laboratorio Marca: HACH Modelo: DR/2500

3.3: Balance hídrico de generación de lixiviados

Como se mencionó en el apartado 3.1.1, un factor importante a considerar para el dimensionamiento de un invernadero para evaporación de lixiviados, es la generación de los mismos. Para la obtención de este parámetro, la Agencia de Protección Ambiental, EPA, por sus siglas en inglés, en su publicación: *“Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites”* (Fenn *et al.* 1975); reconoce el método desarrollado por Thornthwaite como satisfactorio para obtener la cantidad de lixiviados que se generan en rellenos sanitarios, según el cual, el principal aporte de líquido que da origen a los lixiviados está dado por la incidencia pluvial. En el presente apartado se profundiza en los parámetros involucrados en la formación de lixiviados de acuerdo a la metodología mencionada.

En la Figura 3.7 se muestra la ruta que sigue el agua para la generación de lixiviados, en la que se aprecia que ésta ocurre en dos etapas: 1) infiltración en el material de cubierta y 2) percolación a través de los residuos confinados. Del total de agua que se añade por precipitación sobre la celda de disposición final, una parte evapora a la atmósfera desde la superficie del material de cubierta, mientras que otra es utilizada por las plantas a través de la transpiración, fenómenos a los que se les conoce como evapotranspiración; otro porcentaje escurre hacia las superficies adyacentes a la celda; y el resto viaja hacia abajo a través de los residuos y su material de cubierta, recargando el total de su capacidad de retención de humedad y finalmente formando los lixiviados. Las cantidades dependen en gran medida de la relación entre precipitación y evapotranspiración: durante los meses húmedos la precipitación excede a la evapotranspiración, y el interior de la celda se recarga de agua; mientras que en la temporada seca hay menos precipitación y una alta evapotranspiración, lo que origina déficit de humedad.

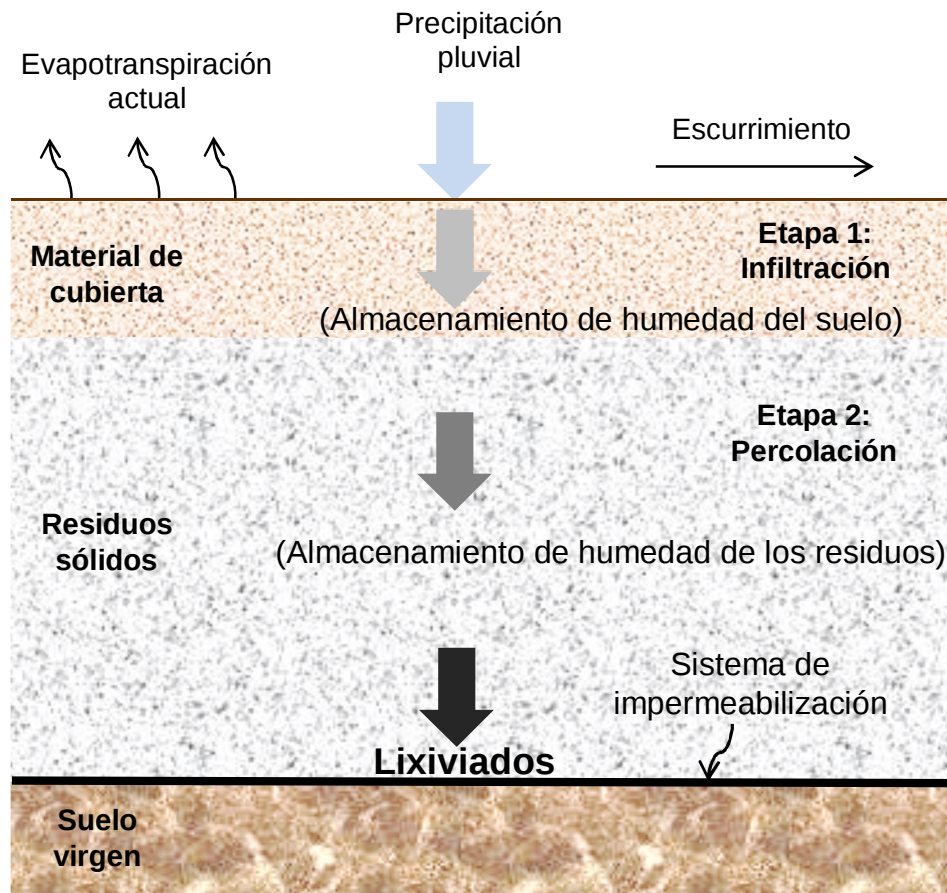


Figura 3.7: Transporte del agua a través de la celda de confinamiento

Fuente: Adaptado de (Fenn *et al.* 1975)

3.3.1: Parámetros involucrados

Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial se determina mediante la Ecuación 3.1, para la que es necesaria información estadística de temperatura media mensual:

$$PE = 1.6 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a \quad \text{ec. 3.1}$$

donde:

PE : Evapotranspiración potencial, (mm);

T : Temperatura media mensual, (°C);

I : Sumatoria de índices mensuales de calor;

a : coeficiente en función de la suma de los índices mensuales de calor.

El índice mensual de calor está dado por la relación 3.2:

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad \text{ec. 3.2}$$

A partir de los índices de calor para cada mes, se calcula “I”, que es la sumatoria de “i”; y “a”, que se obtiene con la expresión 3.3:

$$a = 0.49239 + 1792 \times 10^{-5} I - 771 \times 10^{-7} I^2 + 675 \times 10^{-9} I^3 \quad \text{ec. 3.3}$$

Una vez obtenida la evapotranspiración potencial mensual, ésta debe ajustarse a la latitud de la zona, para lo cual existen coeficientes de corrección. En la Tabla 3.7 se presentan algunos coeficientes de ajuste por radiación solar en los alrededores de la zona en estudio.

Tabla 3.7: Coeficientes de ajuste por radiación solar

Latitud N	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
20	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
19	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
18	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
17	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
16	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
15	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
14	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
13	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
12	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
11	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91
10	0.97	0.98	1.00	1.03	1.05	1.06	1.05	1.04	1.02	0.99	0.97	0.96

Esguerrimiento

En el cálculo del esguerrimiento influyen dos factores principales: 1) la precipitación normal mensual en la zona en estudio, y 2) el coeficiente de esguerrimiento, el cual a su vez, está dado por el tipo de suelo y su inclinación.

Con ayuda de la Tabla 3.8, que muestra coeficientes de escurrimiento para diferentes condiciones superficiales, y en virtud de que el relleno sanitario en el que se desarrollaron los trabajos de campo maneja taludes de celdas de 4/1, y material de cubierta procedente de las excavaciones en el mismo predio con tipo de suelo arcilloso nombrado como “tepetate”, se determina que el coeficiente de escurrimiento que corresponde para el cálculo de generación de lixiviados del caso estudio es 0.35.

Tabla 3.8: Coeficiente de escurrimiento

Condición superficial	Coeficiente de escurrimiento
Suelo arenoso plano	0.05 – 0.10
Suelo arenoso medio	0.10 – 0.15
Suelo arenoso inclinado	0.15 – 0.20
Suelo arcilloso plano	0.13 – 0.17
Suelo arcilloso medio	0.18 – 0.22
Suelo arcilloso inclinado	0.25 – 0.35

Fuente: Adaptado de (Fenn *et al.* 1975)

Infiltración

Para fines del balance hídrico, la infiltración se define como la cantidad de agua que precipita sobre un área determinada, menos la que escurre y la que evapotranspira. En este punto algunas sustracciones resultan negativas, debido a que en temporadas secas la evapotranspiración excede a la precipitación, dejando al material de cubierta con déficit de humedad.

Capacidad de almacenamiento de humedad

El almacenamiento de humedad se refiere a la cantidad de agua que la capa de cobertura de residuos es capaz de retener, parámetro que se encuentra en función de las características del material de cubierta y del grosor de dicha capa, mediante

la Ecuación 3.4. En la Tabla 3.9 se presenta la capacidad de almacenamiento para algunos tipos de suelo.

Tabla 3.9: Humedad del suelo

Tipo de suelo	Agua disponible (mm·m ⁻¹)
Arena fina	100
Suelo arenoso margo	150
Suelo margo limoso	200
Arcilla marga	250
Arcilla	300

Fuente: Adaptado de (Fenn et al. 1975)

$$\text{Capacidad de almacenamiento de humedad según el tipo de suelo} \cdot \text{Altura de cubierta} = \text{Almacenamiento de humedad} \quad \text{ec. 3.4}$$

La condición que representa la Ecuación 3.4, misma que está en función de la superficie de la celda, es válida para los meses en que la infiltración rebasa a la evapotranspiración; sin embargo, cuando la diferencia de infiltración y evapotranspiración es negativa se requiere ajustar este parámetro, para lo cual se extienden Tablas para suelos con capacidad máxima de almacenamiento de humedad de 100, 125 y 150 mm (Fenn et al. 1975).

Para fines del cálculo de generación de lixiviados del caso estudio, el tipo de suelo que se usa como material de cubierta es arcilloso, como ya se mencionó, y el grosor de la capa con que se cubren los residuos depende de la etapa de la celda: la cobertura diaria es de 0.30 m, las capas intermedias son de 0.60 m, y la cubierta de clausura es de 2.80 m; por otro lado según la Figura 3.1, la evaporación es mayor a la precipitación en los meses de enero a mayo y de octubre a diciembre, lo que indica que en este periodo que se considera de sequía, hay meses en los que la evapotranspiración rebasa a la infiltración, por lo que será necesario utilizar las Tablas de ajuste de este parámetro. Para ubicar la Tabla que corresponde al caso

estudio, de las 3 disponibles en literatura (Ibídem, 1975), se hizo uso de la Ecuación 3.4, en la que $300 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ corresponde al agua disponible por la arcilla según la Tabla 3.9, y 2.8 m es uno de los factores del grosor de la capa de cubierta, sólo para demostrar que la Tabla que corresponde al cálculo de generación de lixiviados del caso estudio, es la de 150 mm, que es la mayor de las 3 disponibles y que se presenta en el Anexo 3.

$$\text{Capacidad de almacenamiento} = (300 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1})(2.8 \text{ m}) = 840 \text{ mm} \quad \text{ec. 3.5}$$

Evapotranspiración actual

Una vez que se han determinado aquellos meses en los que el suelo presenta déficit de humedad, se hace una última corrección a la evapotranspiración de la siguiente manera.

$$\text{Si, } I > \text{PET, } \quad \text{AET} = \text{PET}$$

$$\text{Si, } I < \text{PET, } \quad \text{AET} = \text{PET} + (I - \text{PET}) - \Delta \text{ST}$$

donde:

I: infiltración

PET: Evapotranspiración

AET: Evapotranspiración actual

ΔST : Cambio de almacenamiento de humedad

Percolación

Por último, la cantidad de agua que logra percolar, y que es responsable de la formación de lixiviados, es la diferencia entre el agua infiltrada y la evapotranspiración actual, menos el cambio de almacenamiento de humedad. Esta cantidad sólo se aplica al área de la celda para obtener la estimación del volumen de lixiviados que se generan en el sitio.

El balance hídrico de generación de lixiviados para el caso estudio se presenta en el Anexo 2. La Información meteorológica que se utilizó para alimentar los datos climáticos requeridos para dicho cálculo, y que se muestra en la Tabla 3.10, se obtuvo con base en registros históricos de la estación climatológica número 21163, El Batán, de la Comisión Nacional del Agua.

Tabla 3.10: Datos climáticos

Mes	Temperatura media ⁽¹⁾ (°C)	Precipitación normal ⁽²⁾ (mm)
Enero	13.3	5.1
Febrero	14.7	7.2
Marzo	17.0	12.8
Abril	19.0	25.8
Mayo	19.7	99.4
Junio	19.3	190.1
Julio	18.2	126.0
Agosto	18.5	160.7
Septiembre	18.2	152.6
Octubre	17.1	81.4
Noviembre	15.4	7.8
Diciembre	14.1	3.3

⁽¹⁾ Temperatura media normal de 1971 a 2000

⁽²⁾ Precipitación normal de 1981 a 2010

Fuente: Comisión Nacional del Agua

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1: Resultados

En virtud de la gran cantidad de datos que arrojaron los trabajos de campo, en esta sección se presentan únicamente los resultados que se obtuvieron por el manejo de los mismos.

4.1.1: Pruebas preliminares

Como ya se explicó en el apartado 3.1.2, se realizaron pruebas preliminares con agua para encontrar la ventilación a la que debía someterse el invernadero, y posteriormente se corrieron las pruebas con lixiviados, encontrando rápidamente que éstos últimos evaporan a mayor velocidad, llegando a saturar de humedad el ambiente interno del invernadero y condensando en paredes y techo.

Durante estas pruebas, mismas que se realizaron en temporada de invierno, la máxima temperatura dentro del invernadero se observó antes de las 14:00 horas con valor mayor a 50°C, mostrando una diferencia con la temperatura ambiente hasta de 31°C, y con una disminución despreciable en el transcurso de la tarde, sin embargo, debido a la condensación fue necesario abrir más ventilas.

Posteriormente, con el aumento de ventilación obligada, se siguió monitoreando la disminución de tirantes, temperaturas ambiente externa e interna del invernadero y temperaturas superficial y media de lixiviados, encontrando que la temperatura interna del invernadero sí disminuye considerablemente, exhibiendo diferencias con la temperatura externa a partir de las 14:00 horas aproximadamente, de 23 y 11 °C, mientras que con la ventilación inicial las diferencias seguían siendo de 30 y 28 °C para el mismo horario; a pesar de esto, las temperaturas superficiales y medias del líquido no disminuyeron de manera significativa, y en general hubo mayor evaporación, por lo que se considera que se llegó a la ventilación óptima para el proceso propuesto, siendo en total el área abierta para el recambio de aire de 480

cm² para el día, y de 19,980 cm² para la noche, con porcentajes del área de la base del invernadero de 1.27 y 52.86 %, respectivamente.

Por otro lado, durante las pruebas preliminares que se realizaron en la búsqueda de la ventilación óptima del invernadero piloto, y que se llevaron a cabo sin el uso de la pared de aluminio, se observó que la temperatura superficial del líquido fue mayor en las charolas ubicadas al Este y al Sur; posteriormente, cuando se empezó a utilizar este aditamento, los lixiviados que se colocaron al Norte adquirieron mayor temperatura superficial, parámetro que disminuía hacia el Sur; por lo que se intuye que es el reflejo de la pared de aluminio sobre los líquidos ubicados en las zonas cercanas, lo que contribuyó al aumento de sus temperaturas superficiales.

El comportamiento de las temperaturas internas del invernadero en el transcurso del día durante las pruebas preliminares con lixiviados, con la ventilación inicial (Interna 1) y con la ventilación óptima (Interna 2), y su comparación con temperatura ambiente externa, se aprecia en la Figura 4.1.

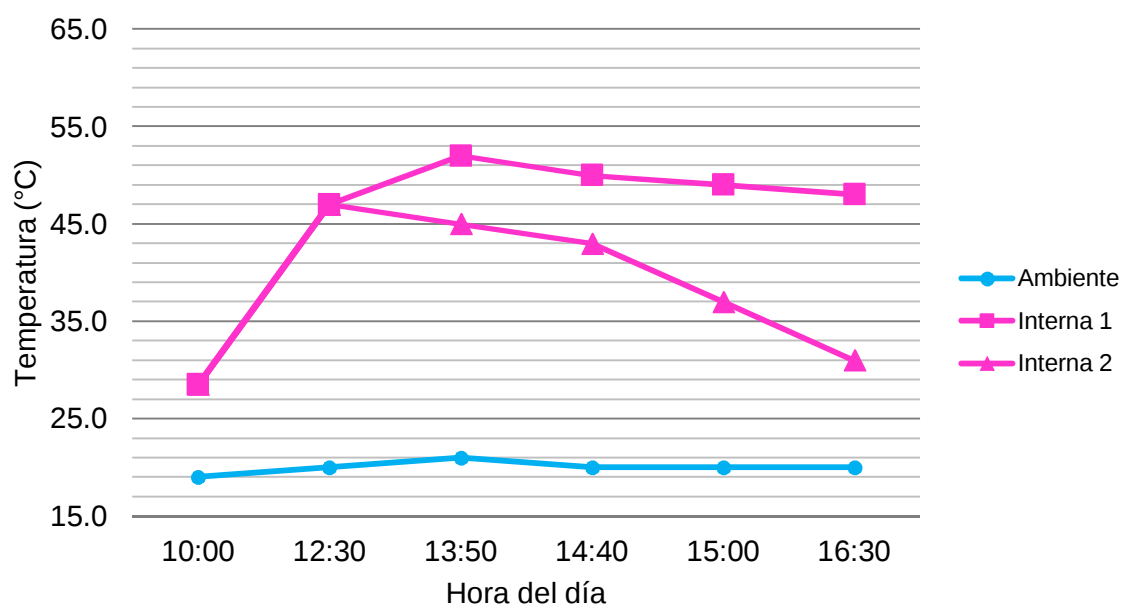


Figura 4.1: Comportamiento promedio de la temperatura durante el día. Pruebas preliminares

Resulta notorio que la disminución de la temperatura interna con la nueva ventilación ocurre alrededor de las 14:00 horas, mientras que con la ventilación

inicial la temperatura permaneció alta en el transcurso de la tarde, lo que indica que el efecto invernadero que se presumía inicialmente disminuyó con la nueva ventilación; esto se puede atribuir a que en el sitio de experimentación empieza a correr el viento con más fuerza a partir de esta hora, como ya se mencionó en el apartado 3.1.2, llevándose el aire caliente consigo.

4.1.2 Prueba 1: Determinación del tirante óptimo de lixiviados

Una vez que se determinó la ventilación óptima para la evaporación de lixiviados en el invernadero piloto para el sitio de experimentación, se realizó la primera prueba, la cual consistió en dejar 9 palanganas dentro del invernadero a diferentes tirantes: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 y 415 mm por 24 horas, con la finalidad de determinar si alguna altura favorece al proceso en estudio. El acomodo de las 9 bandejas con diferente volumen se esquematiza en las Figuras 4.2 A y B.

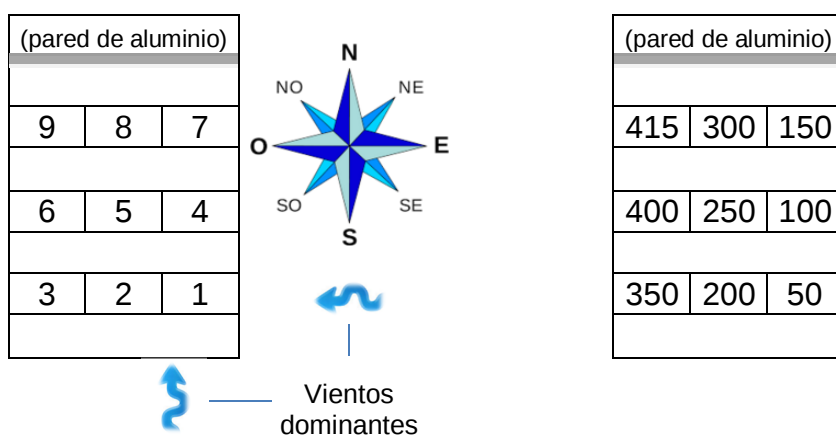


Figura 4.2: Acomodo. Prueba 1

A: Acomodo

B: Tirantes de lixiviados (mm)

Disminución de tirantes

En la Figura 4.3 se compara la disminución de tirantes, observando que las charolas que más evaporación mostraron durante el día, fueron las número 7, 8, y 9, con tirantes iniciales de 150, 300 y 415 mm respectivamente, y que se ubicaron en el

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

extremo Norte del invernadero; durante la noche en cambio, las bandejas que mayor reducción de tirante presentaron fueron las número 2, 3, 4, 5, y 9, con alturas iniciales de 200, 350, 100, 250 y 415 mm, respectivamente.

Al sumar los resultados de ambos periodos del día, la palangana que menos descenso de volumen mostró fue la número 1; la mayoría de las bandejas, de la 2 a la 8 que inicialmente contenían tirantes entre 100 y 400 mm, en promedio disminuyeron diariamente entre 6 y 7 mm; y en la que mayor reducción de lixiviados se logró fue en la número 9, con resultados mayores al doble de las demás charolas, siendo oportuno reiterar que esta última contenía un tirante inicial que difiere de su inmediata anterior por sólo 15 mm, por lo que no se puede considerar que la altura de la lámina del líquido sea responsable de los resultados de esta bandeja.

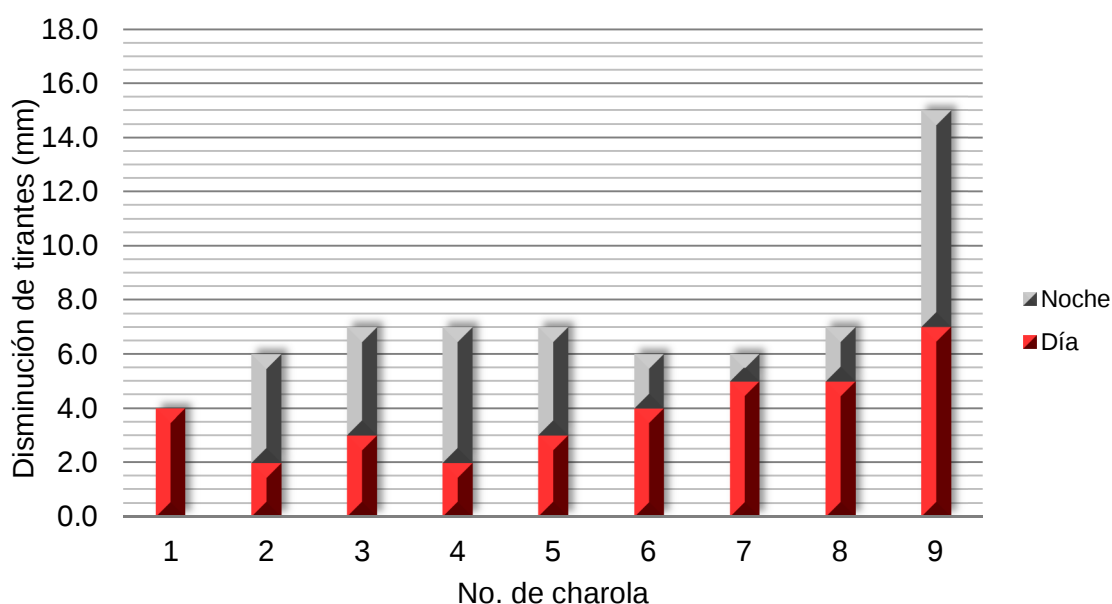


Figura 4.3: Disminución promedio de tirantes de lixiviados. Prueba 1

Comportamiento de la temperatura

En el sitio de experimentación durante la temporada de invierno y con las condiciones de diseño de la planta piloto, la temperatura de la superficie de los lixiviados en las bandejas con mayor volumen y que se colocaron al Oeste del

invernadero, aumentó en mayor proporción durante la mañana; mientras que en las demás palanganas, éste parámetro llegó a su máximo valor aproximadamente a las 14:40 horas, momento en el que la temperatura superficial de todos los líquidos dentro del invernadero convergió, y posteriormente empezó el descenso de este parámetro de manera conjunta. En la Figura 4.4 se presenta el comportamiento temporal de la temperatura superficial de los líquidos en las diferentes charolas.

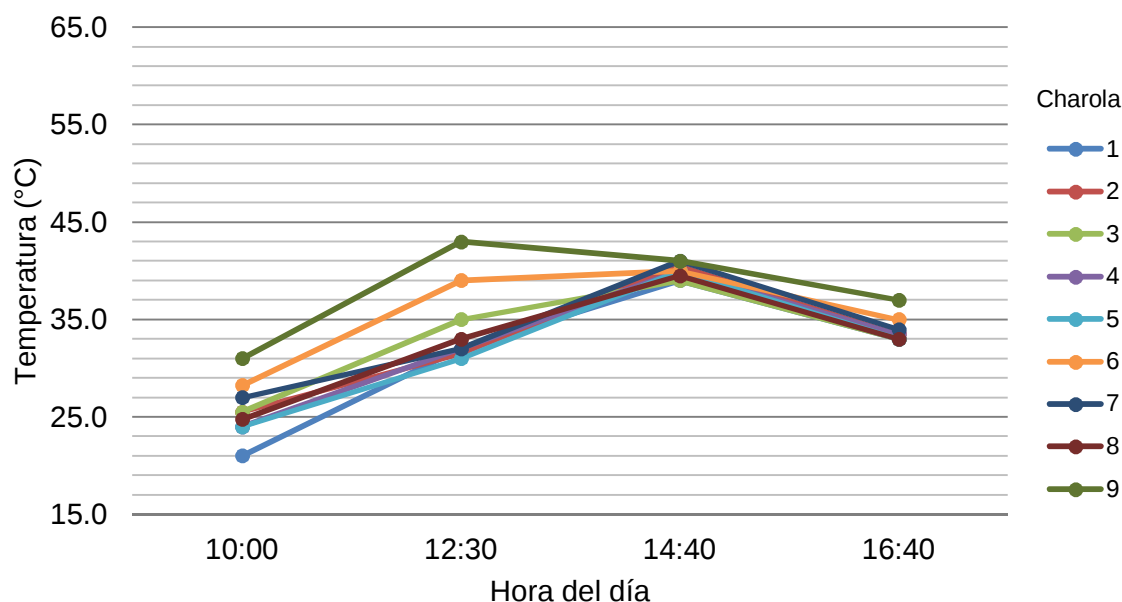


Figura 4.4: Comportamiento promedio de temperaturas superficiales de lixiviados durante el día. Prueba 1

El comportamiento de la temperatura a media altura (a 134 mm de la superficie) y de fondo para las charolas 1 y 4, se muestra en la Figura 4.5; en general la temperatura se manifestó ascendente de manera lineal en el transcurso del día, excepto para las palanganas 1 y 4 que son las de menor volumen y que se ubicaron al Este, en las que la temperatura subió con mayor rapidez hasta alrededor de las 14:40 horas.

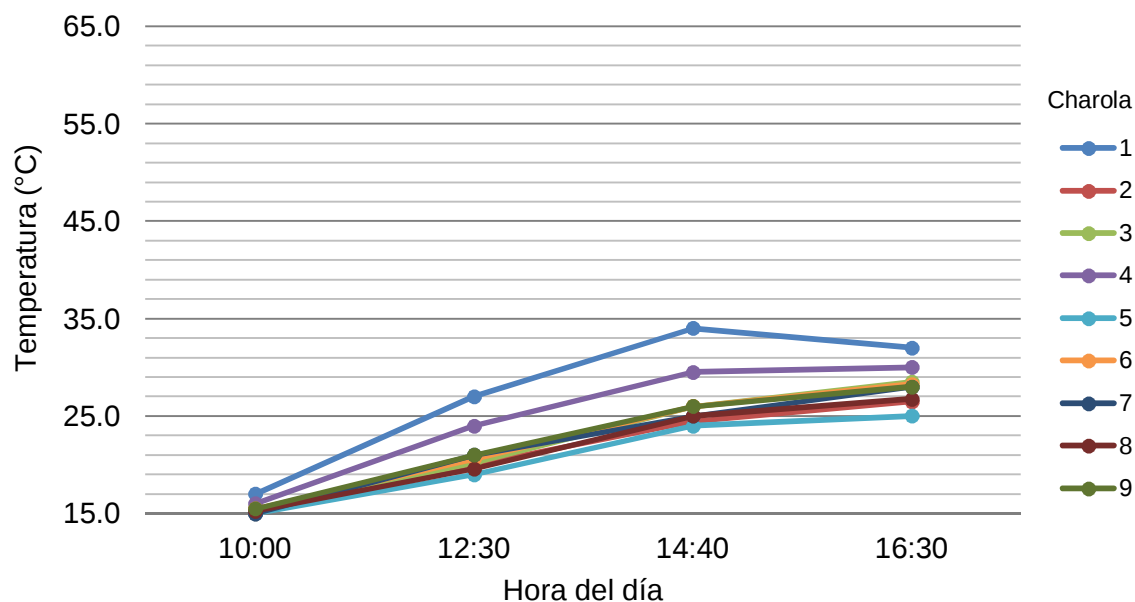


Figura 4.5: Comportamiento promedio de temperaturas medias de lixiviados durante el día. Prueba 1

Relacionando los datos obtenidos de disminución de líquido y temperaturas superficial y media de los lixiviados, se determina que las alturas óptimas para los fines de la presente investigación, y con las que se llevaron a cabo las subsecuentes pruebas, se encuentran entre 300, 350, y 400 mm.

4.1.3: Prueba 2: Eficiencia en la disminución de tirantes de lixiviados según su ubicación dentro del invernadero

Como se explicó en la sección 3.2, es probable que dentro del invernadero existan sitios en los que el proceso de evaporación se vea favorecido, ya sea por la incidencia de radiación directa o por el reflejo que ejerce la pared de aluminio sobre los líquidos. Es por ello que con los resultados de la prueba anterior se procedió a unificar el volumen de las palanganas, y evaluar la eficiencia en la evaporación según la ubicación de los lixiviados dentro del invernadero, el periodo del día que favorece al proceso y las tasas promedio de evaporación diaria; en comparación con lo que ocurre fuera del invernadero simulando la laguna de retención. Para llevar a cabo esta prueba se utilizaron 10 bandejas en las se vertió lixiviado a 350

mm de tirante y se dejaron en reposo durante 24 horas; 9 dentro del invernadero y 1 afuera en el acomodo que se muestra en la Figura 4.6.

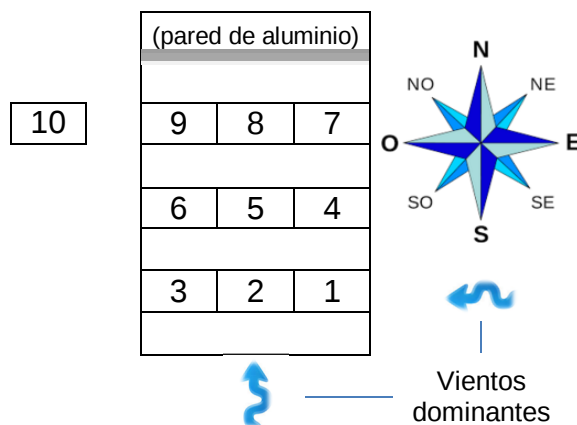


Figura 4.6: Acomodo. Prueba 2

Disminución de tirantes

Para el sitio de experimentación en temporada de invierno durante el día, de las 9 palanganas que se colocaron dentro del invernadero, en promedio sólo en 5 de ellas evaporó más que en la de afuera, con registros entre 6.5 y 9.5 mm, es decir que en estas charolas evaporó entre 8 y 58 % más lixiviado que en la de afuera, cuyo valor de evaporación fue de 6.0 mm; mientras que en el transcurso de la noche, con la ventilación de diseño del invernadero, el descenso de tirantes de las bandejas internas fue mayor que en la de afuera entre 20 y 120 %, a excepción de las número 6 y 9 en las que disminuyó lo mismo, con valores que van de 2.5 a 5.5 mm. En la Figura 4.7 se presenta la reducción de tirantes de lixiviados para ambos periodos del día.

Al sumar la disminución de tirantes que se logró tanto en el día como en el transcurso de la noche, en general el volumen de lixiviados dentro del invernadero se redujo más que fuera de éste, a excepción de los lixiviados contenidos en la palangana número 2 cuyo tirante descendió lo mismo que en la de afuera, con datos

en promedio que van desde 8.5 a 12.5 mm diarios, es decir, que el volumen de lixiviados dentro del invernadero se redujo entre 0 y 47 % más que fuera de éste.

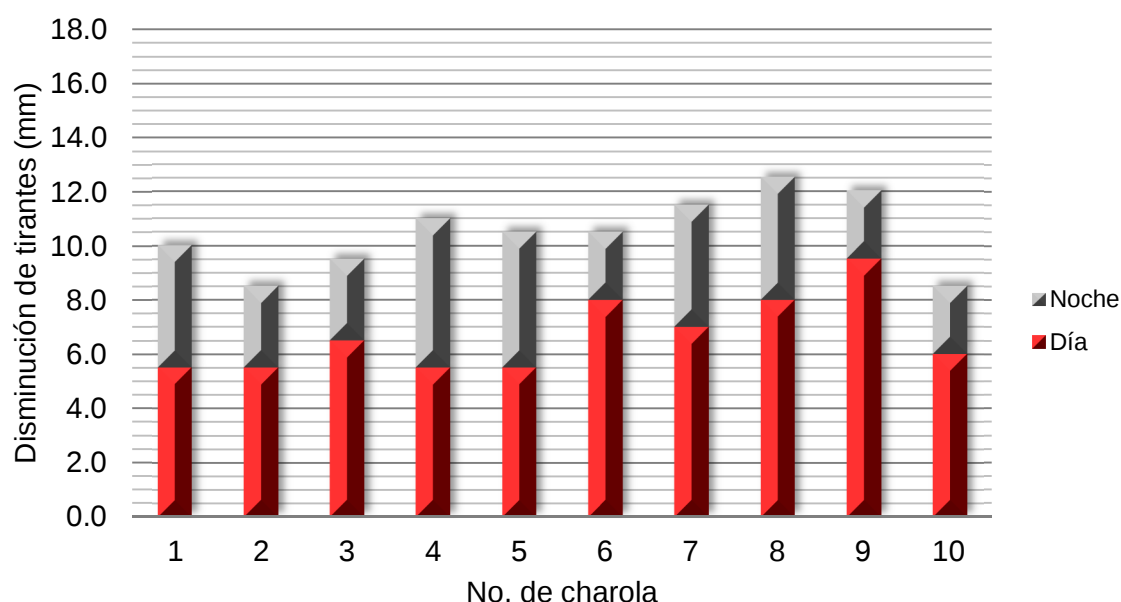


Figura 4.7: Disminución promedio de tirantes de lixiviados. Prueba 2

Disminución de tirantes según su ubicación dentro del invernadero

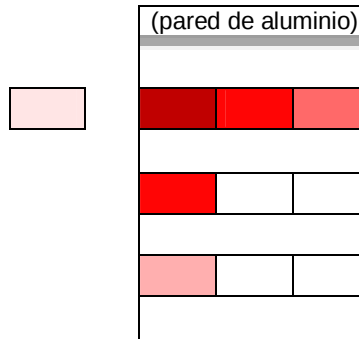
Para esquematizar el promedio diario en milímetros de la disminución de tirantes de lixiviados contenidos en cada una de las palanganas según su ubicación dentro del invernadero, se hace uso de un código de colores utilizando 3 gamas: rojo para la evaporación durante el día, gris para el descenso de alturas durante la noche, y azul para la reducción diaria de tirantes, como se muestra en la Figura 4.8. Estos se aplican en la comparación gráfica de resultados en los esquemas de la Figura 4.9, que demuestra que en promedio, durante el día, sólo los lixiviados de las bandejas ubicadas al Norte y al Oeste disminuyeron más que en la de afuera, siendo la de mayor evaporación la ubicada al Noroeste; mientras que en el transcurso de la noche, los lixiviados que se colocaron al Este y al centro redujeron más sus tirantes, seguidos por los ubicados al Sur, y únicamente los que se hallaban al Oeste tuvieron una reducción de volumen igual a los que se dejaron fuera del invernadero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

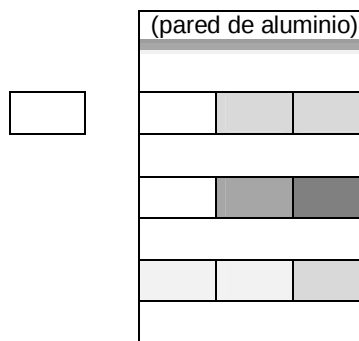
Día (mm)	9.5	8.0	7.0	6.5	6.0	5.5
Noche (mm)	5.5	5.0	4.5	3.0	2.5	
Total (mm)	12.5	12.0	11.5	11.0	10.5	10.0

Figura 4.8: Gamas de colores utilizados para la comparación de disminución promedio de tirantes de lixiviados

Disminución promedio de tirantes de lixiviados durante el día (mm)



Disminución promedio de tirantes de lixiviados durante la noche (mm)



Disminución promedio diaria de tirantes de lixiviados (mm)

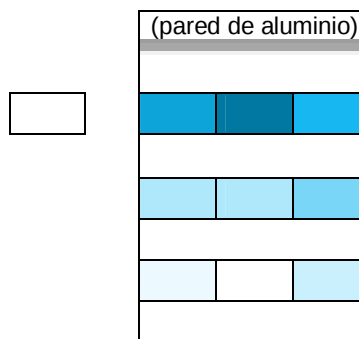


Figura 4.9: Disminución promedio de tirantes de lixiviados según su ubicación. Prueba 2

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al integrar los resultados de ambos periodos del día, los tirantes de lixiviados dentro del invernadero, en promedio disminuyeron más que fuera de éste, a excepción de los que se ubicaron al Sur que descendieron lo mismo, siendo los que mayor reducción aquellos que se colocaron al Norte con valores entre 11.5 y 12.5 mm; seguidos por los de en medio con registros entre 10.5 y 11.0 mm, y por último los del Sur con datos entre 8.5 y 10.0 mm; es decir, que la mayor eficiencia en la disminución de volumen según su ubicación dentro del invernadero se encontró del lado Norte, parámetro que disminuyó conforme se desplaza al Sur, con eficiencias de 135 a 147 % para el Norte, de 124 a 129 % para en medio, y entre 100 y 118 % para el Sur, tomando como 100% la reducción del tirante de los lixiviados que se dejaron fuera del invernadero.

Comportamiento de la disminución de tirantes en el transcurso del día

No es posible generalizar en el comportamiento de la disminución de tirantes de lixiviados en el transcurso del día sin hacer referencia a su ubicación. En promedio, durante la mañana, antes de las 13:30 horas, el proceso de evaporación se vio favorecido en los lixiviados que se ubicaron al Oeste y al Norte, con valores que van desde 6.5 hasta 8.0 mm; en el transcurso de la tarde, entre las 13:30 y 16:00 horas, la reducción de volumen fue mayor únicamente en los lixiviados que se colocaron al Suroeste y afuera, con datos de 4.0 y 3.5 mm respectivamente; mientras que para aquellos que se hallaban en el lado Este y centro del invernadero, el descenso de tirantes se benefició durante la noche con registros de 5.5 y 5.0 mm respectivamente.

En la Figura 4.10 se aprecia la disminución de tirantes de lixiviados de acuerdo al periodo del día, de la que se determina que en promedio, la eficiencia en la evaporación durante mañana se encontró del lado Noroeste; en el transcurso de la tarde, dentro del invernadero no es más eficiente que fuera de éste; y por la noche, la mayor eficiencia en la disminución de tirantes se halló del lado Este.

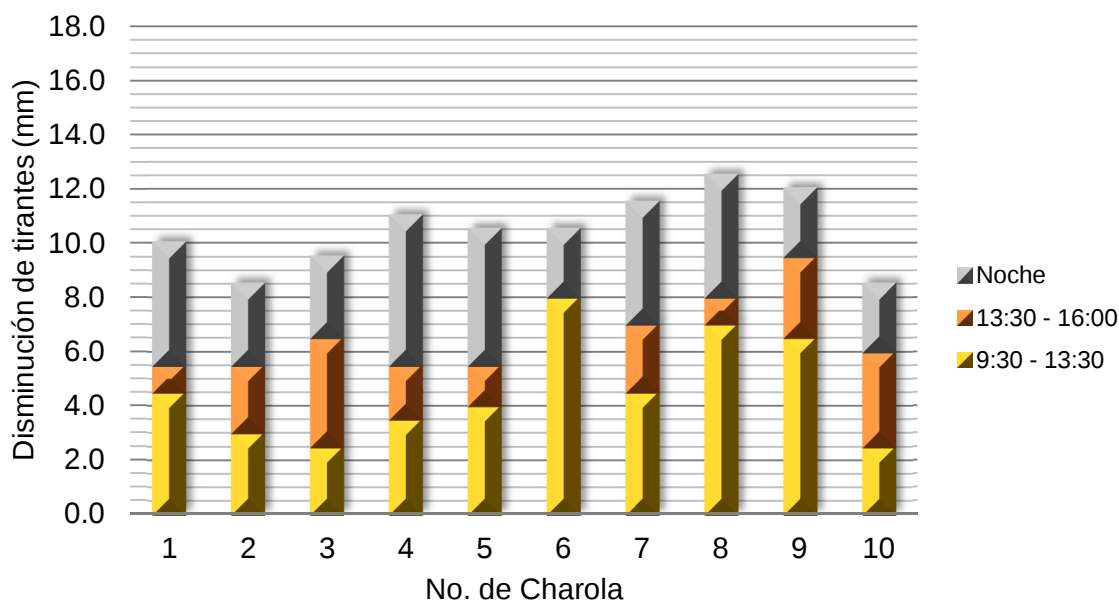


Figura 4.10: Disminución promedio de tirantes de lixiviados por periodos del día.
Prueba 2

Tasas de disminución de tirantes

Como se muestra en la Figura 4.11, durante la mañana en temporada de invierno en el sitio de experimentación, los lixiviados que se dejaron dentro del invernadero exhibieron en promedio mayor tasa de evaporación que fuera de éste, a excepción de los de la palangana número 3 ubicada al Suroeste que evaporó a la misma velocidad, con valores entre 0.63 y $2.00 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$; es decir que para este periodo del día, el uso del invernadero fue más eficiente que sin él hasta en un 217%, dependiendo de la ubicación de los lixiviados dentro del mismo.

Por la tarde en cambio, entre las 13:30 y las 16:00 horas, como se aprecia en la Figura 4.12, en promedio sólo los lixiviados de la bandeja número 3 disminuyeron su volumen más rápido que la de afuera, que fue la misma que igualó su velocidad para evaporar y que mostró la menor evaporación dentro del invernadero durante el primer periodo del día, con valores de 1.60 y $1.40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ respectivamente. Cabe señalar que la palangana número 6 ubicada al Oeste, siendo la de mayor tasa de

evaporación en el lapso anterior, fue la única cuya reducción de tirante resultó despreciable en el transcurso de la tarde.

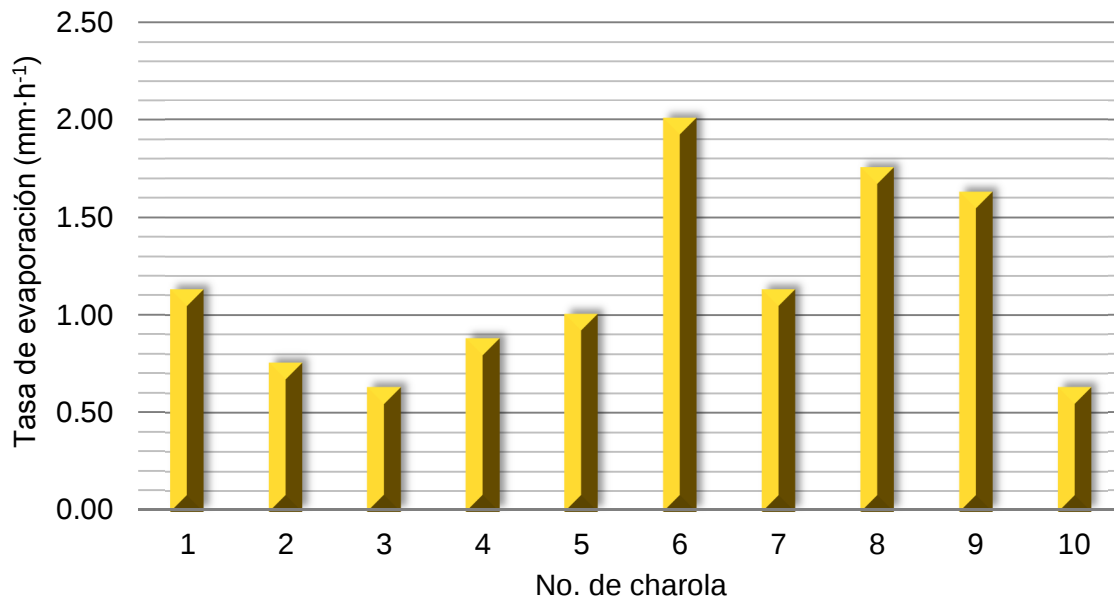


Figura 4.11: Tasas promedio de evaporación de lixiviados durante la mañana.
Prueba 2

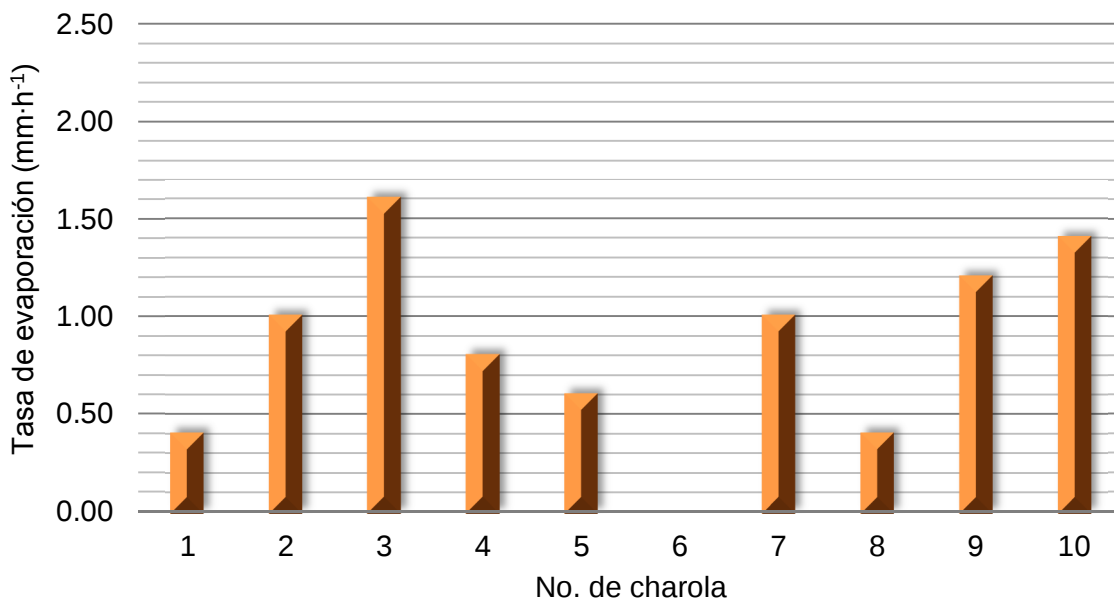


Figura 4.12: Tasas promedio de evaporación de lixiviados durante la tarde.
Prueba 2

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al adicionar los datos de ambos periodos de luz del día, como se muestra en la Figura 4.13, en promedio sólo los lixiviados ubicados al Norte y al Oeste arrojaron mayor tasa de evaporación, con registros de 1.00 a 1.46 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, en comparación con los que se dejaron afuera que evaporaron a una velocidad de 0.92 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$. La parte Sureste, que es donde menor tasa de evaporación se ostentó, se mantuvo alrededor de 0.85 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

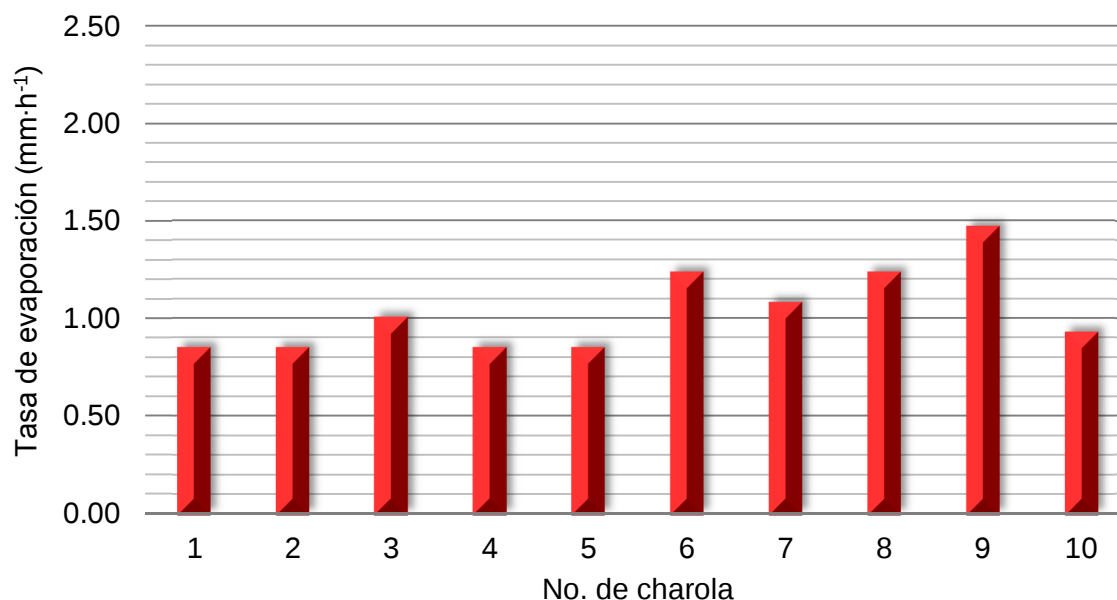


Figura 4.13: Tasas promedio de evaporación de lixiviados durante el día. Prueba 2

Por su parte durante la noche, como se presenta en la Figura 4.14, los lixiviados que se colocaron dentro del invernadero arrojaron en promedio mayor tasa de descenso de tirantes en comparación con los que se dejaron afuera, a excepción de los de las charolas número 6 y 9 ubicadas al Oeste que mostraron la misma tasa, con valores que van desde 0.15 hasta 0.33 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; es decir que durante la noche, los lixiviados dentro del invernadero, en general precisaron mayor tasa de disminución de tirantes que el que se dejó afuera, siendo más eficiente el uso del invernadero durante este periodo hasta en un 120% dependiendo de su ubicación dentro del mismo.

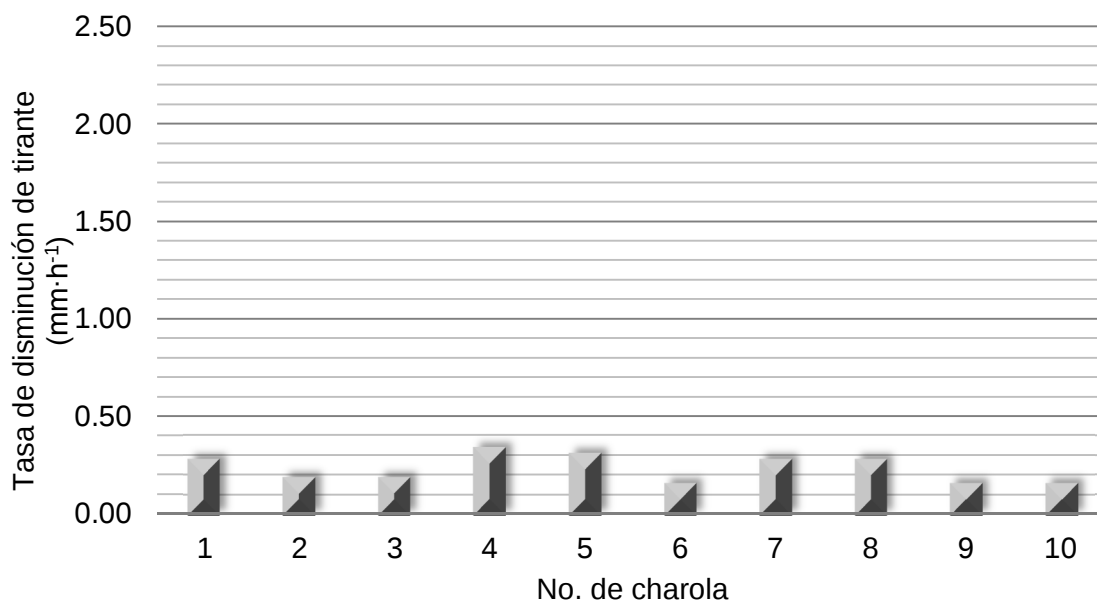


Figura 4.14: Tasas promedio de disminución de tirantes de lixiviados durante la noche. Prueba 2

Al integrar los datos obtenidos en los diferentes periodos del día, las tasas de reducción de tirantes de lixiviados dentro del invernadero resultaron en promedio mayores que para los que se dejaron afuera, a excepción de los de la palangana número 2 que arrojaron la misma tasa, con valores entre 0.37 y 0.54 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; es decir que con el uso del invernadero, los lixiviados disminuyeron su tirante entre 0 y 46 % más rápido que si él. La Figura 4.15 muestra las tasas promedio diarias de disminución de tirantes de lixiviados.

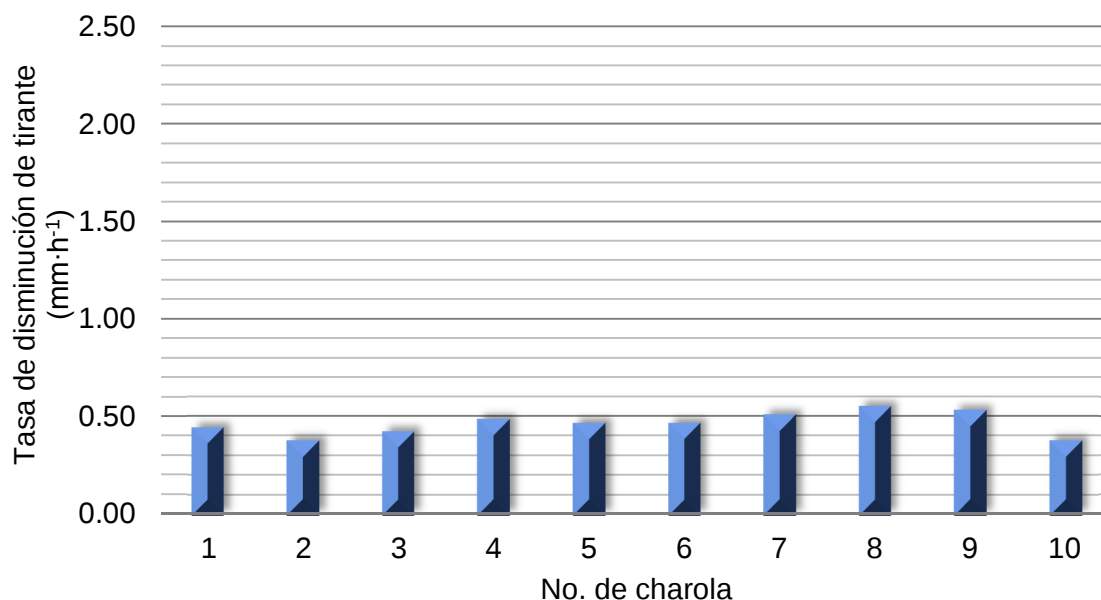


Figura 4.15: Tasas promedio diarias de disminución de tirantes de lixiviados.
Prueba 2

Aunque de manera general se puede determinar que los lixiviados dentro del invernadero redujeron su volumen más rápido que sin él, no se puede precisar una tasa promedio diaria sin hacer referencia a su ubicación dentro del mismo, de acuerdo a la cual, las tasas más bajas fueron las de los lixiviados que se colocaron al Sur, oscilando entre 0.37 y 0.43 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, seguidos por los de en medio con valores de 0.46 a 0.48 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, y por último los de mayor tasa fueron los que se ubicaron al Norte del invernadero con velocidades desde 0.50 hasta 0.54 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, mientras que afuera se registró una tasa promedio diaria de 0.37 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, para el periodo de invierno en el sitio de experimentación.

Por otro lado, comparando las Figuras 4.11, 4.12 y 4.14, se puede apreciar fácilmente que en general, el periodo del día de mayor aportación a la disminución de volumen fue durante la mañana; mientras que el horario que menos contribuyó fue en el transcurso de la noche.

Resumen de disminución de tirantes: Prueba 2

Tabla 4.1: Resumen de disminución de tirantes: Prueba 2

No de charola	Ubicación	Δt_d	Δt_n	Δt_T	% _m	% _t	% _n	v_m	v_t	v_d	v_n	v_T
		(mm)						(mm·h ⁻¹)				
1	Sur	5.5	4.5	10.0	44	11	45	1.13	0.40	0.85	0.27	0.43
2		5.5	3.0	8.5	35	29	36	0.75	1.00	0.85	0.18	0.37
3		6.5	3.0	9.5	27	42	31	0.63	1.60	1.00	0.18	0.41
4	Media	5.5	5.5	11.0	31	19	50	0.88	0.80	0.85	0.33	0.48
5		5.5	5.0	10.5	36	16	48	1.00	0.60	0.85	0.30	0.46
6		8.0	2.5	10.5	77	0	23	2.00	0.00	1.23	0.15	0.46
7	Norte	7.0	4.5	11.5	39	22	39	1.13	1.00	1.08	0.27	0.50
8		8.5	4.5	12.5	56	8	36	1.75	0.40	0.23	0.27	0.54
9		9.5	2.5	12.0	54	25	21	1.63	1.20	1.46	0.15	0.52
10	Afuera	6.0	2.5	8.5	31	41	28	0.63	1.40	0.92	0.15	0.37

Δt_d : Disminución promedio de tirante durante el día

Δt_n : Disminución promedio de tirante durante la noche

Δt_T : Disminución promedio total de tirante

%_m: Contribución promedio en la disminución de tirante durante la mañana (9:30 – 13:30 horas)

%_t: Contribución promedio en la disminución de tirante durante la tarde (13:30 – 16:30 horas)

%_n: Contribución promedio en la disminución de tirante durante la noche (16:30 – 8:30 horas)

v_m : Tasa promedio de disminución de tirante durante la mañana (9:30 – 13:30 horas)

v_t : Tasa promedio de disminución de tirante durante la tarde (13:30 – 16:30 horas)

v_d : Tasa promedio de disminución de tirante durante el día (9:30 – 16:30 horas)

v_n : Tasa promedio de disminución de tirante durante la noche (16:30 – 8:30 horas)

v_T : Tasa promedio diaria de disminución de tirante

Comportamiento de la temperatura

En el sitio de experimentación durante la temporada de invierno y con las condiciones de diseño de la planta piloto, la temperatura fue mayor adentro todo tiempo, incluso cuando el invernadero se encontraba abierto. En la Figura 4.16 se presenta la comparación entre la temperatura interna del invernadero y la ambiente en el sitio de experimentación.

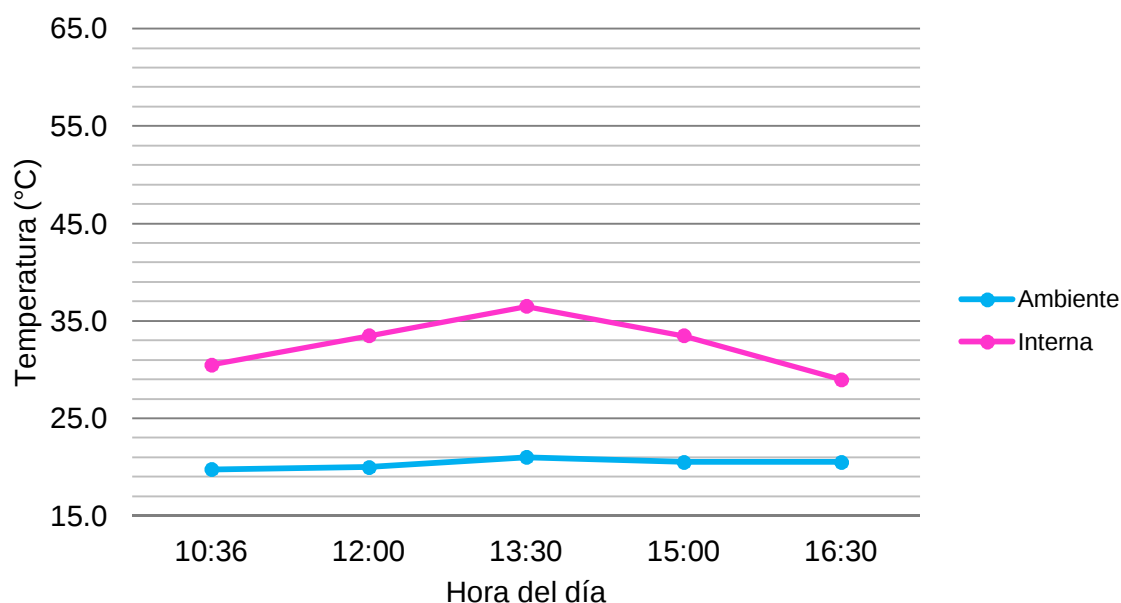


Figura 4.16: Comportamiento promedio de la temperatura durante el día. Prueba 2

Al respecto de la temperatura de los líquidos en estudio, sus valores a nivel superficial, como se muestra en la Figura 4.17, se encuentran directamente relacionados con su ubicación dentro del invernadero: en aquellos que se colocaron al Sur se registraron las menores lecturas, seguidos por los de en medio, mientras que en el Norte no sólo se obtuvieron los mayores registros, sino que su incremento fue más rápido, incluso por las mañanas antes de cerrar la estructura, ostentaron temperaturas por encima de la ambiente interna del invernadero, en tanto que los demás lo consiguieron en el transcurso de la mañana. Es posible atribuir este comportamiento a la pared de madera forrada de aluminio, situada en la parte Norte de la planta piloto, que refracta la luz sobre las charolas cercanas.

En cuanto sus temperaturas medias, como se aprecia en la Figura 4.18, dentro de la estructura se mostraron con valores muy similares, siempre ascendentes conforme transcurrió el día, a pesar de que en su superficie y en el ambiente interno del invernadero, las temperaturas comenzaron a descender alrededor de las 13:30 horas.

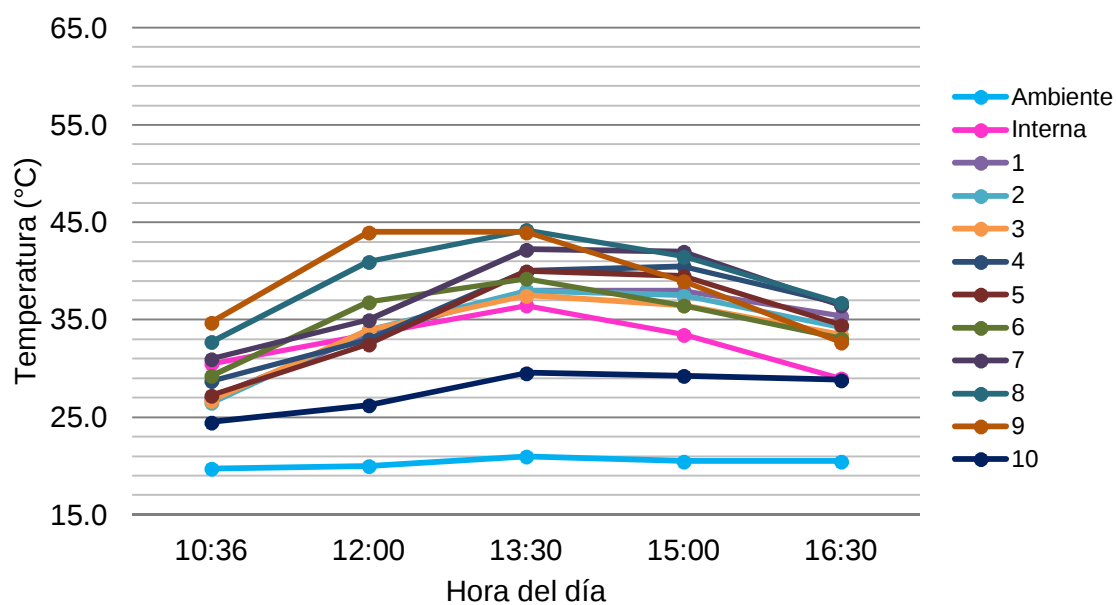


Figura 4.17: Comportamiento promedio de temperaturas superficiales de lixiviados durante el día. Prueba 2

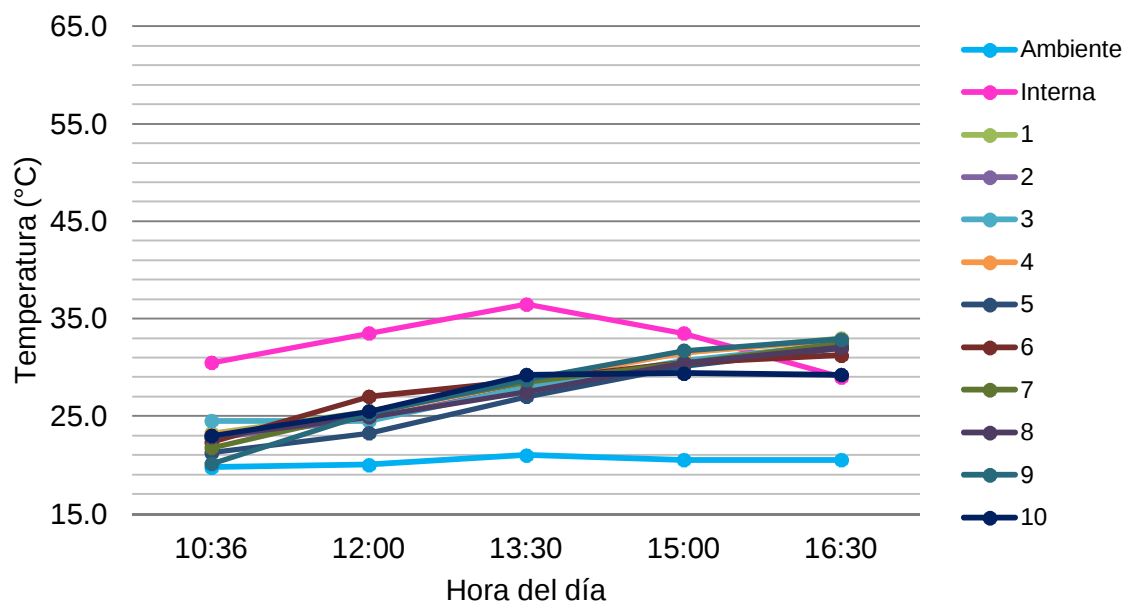


Figura 4.18: Comportamiento promedio de temperaturas medias de lixiviados durante el día. Prueba 2

Para el caso de los lixiviados que se dejaron fuera del invernadero, el comportamiento de su temperatura superficial se manifestó muy similar al de la

temperatura ambiente, alcanzando su máximo registro cerca de las 13:30 horas, y prácticamente permaneció en este valor lo que restó de la tarde; sin embargo, las lecturas de este parámetro fueron menores a las de los lixiviados internos todo el tiempo, a pesar de que éstos sí mostraron descenso posterior a las 15:00 horas.

Por otro lado, es notorio que fue el único caso en que su temperatura media igualó o fue muy cercana a la superficial, convergencia que se alcanzó alrededor de las 13:30 horas, y se mantuvo así lo que restó de la tarde, además de que ambas secciones arrojaron lecturas mayores a la temperatura ambiente todo el tiempo, llegando hasta una diferencia cercana a los 10°C.

4.1.4: Prueba 3: Proceso estancado vs recarga

Para concluir los trabajos de campo, se valoró la eficiencia de la técnica propuesta durante 20 días, con la finalidad de determinar la viabilidad de esta alternativa simulando su aplicación real. Para esta prueba se colocaron dentro del modelo experimental 6 palanganas con tirantes de lixiviados de 350 mm, 3 se dejaron estancados, y los otros 3 se recargaban cada vez que el tirante descendió al menos 10% de su altura inicial; también se dejó una bandeja con lixiviados fuera del invernadero, la cual se recargaba constantemente con la intención de simular la laguna de retención, pero brindándole la misma ubicación dentro del sitio para igualar la incidencia de radiación solar y de viento con los que se dejaron adentro; y una más con agua para obtener datos *in situ* de evaporación y compararlos con los resultados de los lixiviados; ambas con el mismo tirante que las charolas internas. El acomodo de la prueba se señala en la Figura 4.19, en donde “E” simboliza a los lixiviados que se dejaron estancados y “R” a los que se recargaban. Asimismo se tomaron muestras periódicamente para su análisis en laboratorio, para conocer lo que sucede con algunos parámetros fisicoquímicos de los líquidos en estudio. Es importante señalar que esta tercera prueba se llevó a cabo ya entrada la temporada de primavera.

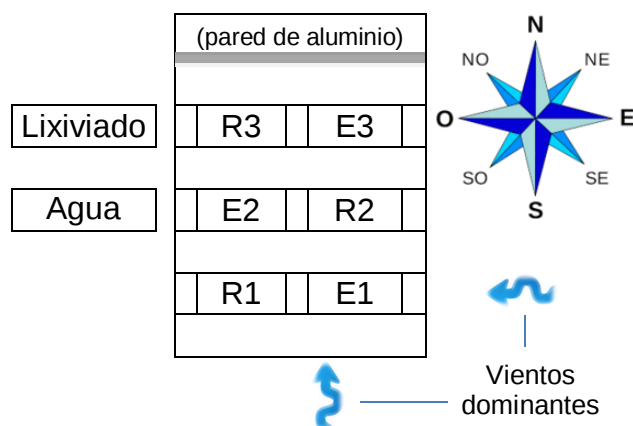


Figura 4.19: Acomodo. Prueba 3

Diminución de tirantes

En la Figura 4.20 se expone la disminución diaria de tirantes de lixiviados durante los 20 días que duró la prueba para las 3 variantes del proceso que se evaluaron: 1) lixiviado con recarga, 2) lixiviado estancado y 3) lixiviado fuera del invernadero; y en la Figura 4.21 se muestra la comparación de la disminución de tirantes de lixiviados y de agua bajo las mismas condiciones. La nomenclatura utilizada en las gráficas es la siguiente

R: Promedio de disminución diaria de tirantes entre las 3 charolas internas en las que el lixiviado se recargaba.

E: Promedio de la disminución diaria de tirantes entre las 3 charolas internas de lixiviado estancado.

L: Disminución diaria de tirante de lixiviado fuera del invernadero.

A: Disminución diaria de tirante de agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

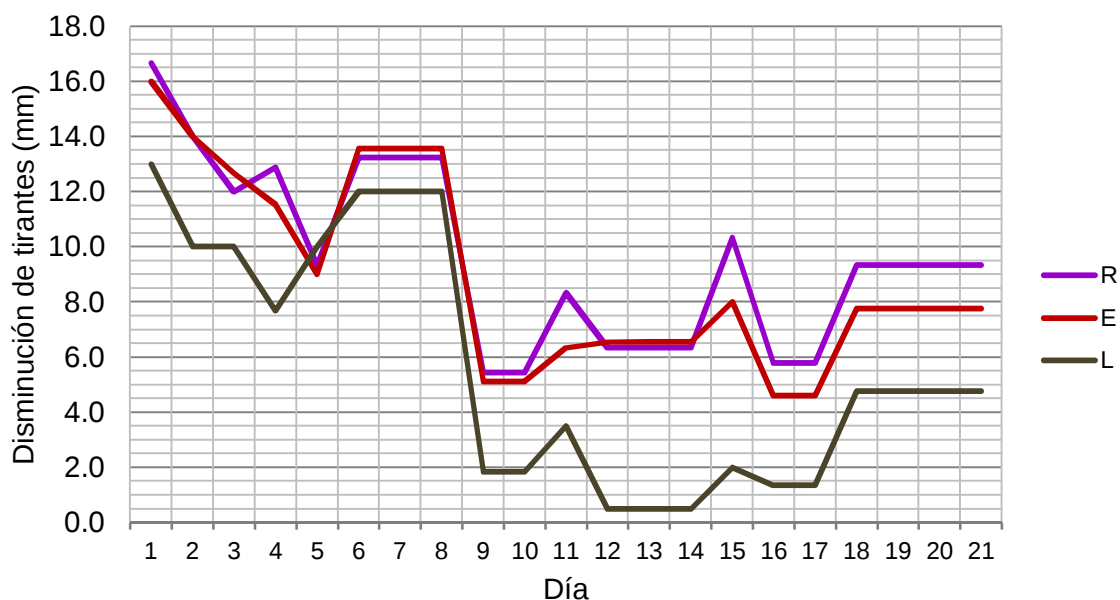


Figura 4.20: Disminución diaria de tirantes de lixiviados. Prueba 3

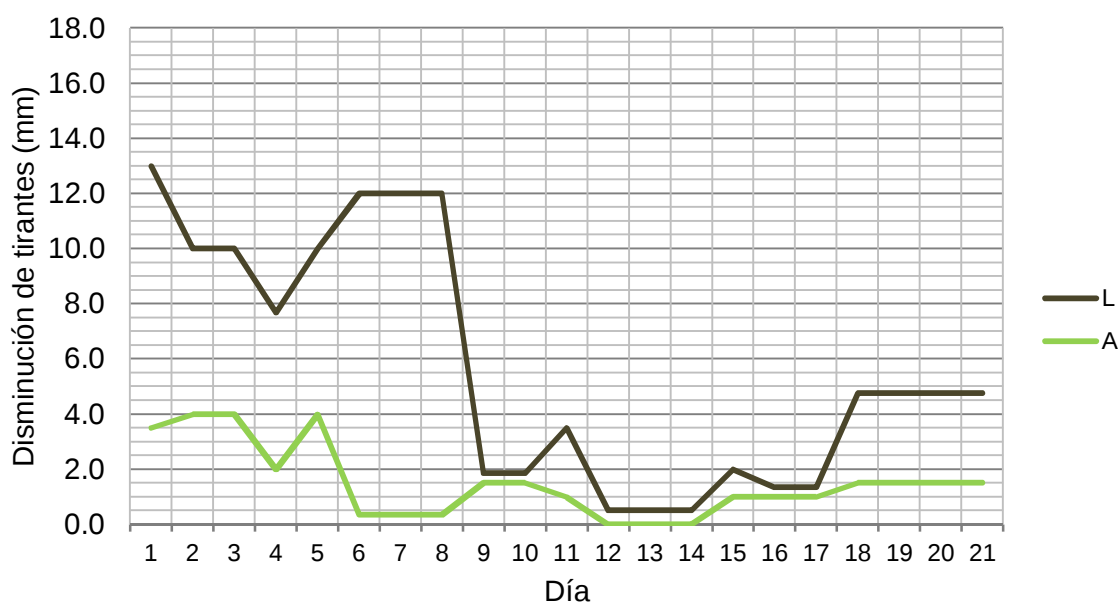


Figura 4.21: Disminución diaria tirantes de líquidos fuera del invernadero. Prueba 3

El comportamiento de la disminución de tirantes de lixiviados en el transcurso de los días, fue muy similar para las 3 variantes del proceso que se evaluaron en la presente prueba: en todas ellas la máxima reducción de volumen se registró el primer día con valores de 16.7 mm, promedio entre las 3 charolas de recarga; 16.0

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

mm, promedio entre las 3 charolas de lixiviado estancado; y de 13.0 mm para los que se dejaron fuera del invernadero; y posteriormente fue descendiendo la eficiencia de este parámetro.

En todos los días, los tirantes de lixiviados disminuyeron más adentro que afuera, a excepción del día 5, siendo importante mencionar que ese día hubo condensación dentro de la estructura. Un evento que se reflejó claramente en los resultados de los lixiviados externos, es que el periodo de lluvias en el sitio de experimentación comenzó el día 10 de la presente prueba, exhibiendo un descenso pronunciado en la reducción de su volumen. Asimismo, es posible que la precipitación pluvial y su consecuente alza de humedad relativa en el ambiente, sean responsables de la baja en la eficiencia de la disminución de tirantes de todos los líquidos, en los días subsecuentes.

Al respecto de los lixiviados que se recargaron los días 4, 9 y 15; en los internos se aprecia un incremento en la disminución de su volumen en los días 4 y 15, a diferencia de los externos; y el lixiviado estancado mostró el mismo comportamiento que el recargado; por lo que se infiere que la recarga no tiene influencia inmediata en la reducción de su tirante.

Es notorio que los lixiviados externos disminuyeron su volumen a una tasa menor que los de adentro del invernadero, y que el lixiviado con recarga resultó ser más eficiente que el estancado, aunque en realidad la diferencia entre el lixiviado estancado y el de recarga se presentó posterior al día 10, siendo significativa a partir del décimo quinto, por lo que se presume que la recarga sí tiene un impacto positivo en este parámetro, pero no de manera inmediata sino posterior a los 15 días de exposición de los líquidos al uso de esta técnica.

Por su parte, la evaporación del agua fue mucho menor a la de los lixiviados, sus mayores valores se registraron los días 1, 2, 3 y 5, y se encuentran entre 3.5 y 4.0 mm; a partir del día 6 la disminución de su tirante fue entre 0 y 1.5 mm.

Resumen de disminución de tirantes: Prueba 3

Para fines de la presentación de resultados, como se muestra en la Tabla 4.2, la prueba se dividió en 4 etapas de 5 días cada una, y tomando como referencia al primero de los 4 periodos: entre el sexto y décimo día, la eficiencia del proceso disminuyó 22.1% para el lixiviado en recarga, 19.5% para el estancado y 21.7% para el de afuera; entre el décimo primero y décimo quinto, la disminución llegó a ser de 41.9, 46.2 y 80.3 % respectivamente; y para los últimos 5 días, de 39.0, 48.6 y 66.6 %, respectivamente. Es decir, que la eficiencia del proceso cayó considerablemente durante los primeros 15 días, pero posteriormente se estabilizó en eficiencias mayores a las inmediatas anteriores.

En lo que respecta a las tasas promedio diarias de reducción de tirantes de lixiviado y de agua, evaluadas bajo las mismas condiciones durante los 20 días de la prueba, se encontró que en promedio el lixiviado del relleno sanitario RESA de la ciudad de Puebla, disminuyó su tirante 281% más rápido que el agua, siendo importante considerar que la prueba se corrió en temporada de primavera, y que durante su segunda mitad, ambos líquidos estuvieron expuestos a la incidencia de precipitación pluvial.

Tabla 4.2: Disminución de tirantes total, promedio diario y cambio en su eficiencia en el transcurso de la prueba

	Periodo (días)									
	1 – 20		1 – 5		6 – 10		11 - 15		16 – 20	
	mm	mm·d ⁻¹	mm·d ⁻¹	%	mm·d ⁻¹	%	mm·d ⁻¹	%	mm·d ⁻¹	%
Lixiviado recargado	192.64	9.63	12.98	100.0	10.11	77.9	7.53	58.1	7.91	61.0
Lixiviado estancado	180.56	9.03	12.64	100.0	10.18	80.5	6.80	53.8	6.49	51.4
Lixiviado afuera	114.30	5.72	10.14	100.0	7.94	78.3	2.00	19.7	3.39	33.4
Agua	30.00	1.50	3.50		0.80		0.40		1.30	

En total, como se presenta en la Tabla 4.3, tomando como referencia a la disminución del tirante de lixiviados externos, el proceso dentro del invernadero demostró ser más eficiente, en un 68.5% para el lixiviado con recarga, y 58.0% para el lixiviado estancado, en comparación con el lixiviado que se dejó fuera del invernadero simulando la laguna de retención.

Tabla 4.3: Eficiencia del proceso

Variante del proceso	Eficiencia (%)
Lixiviado con recarga fuera del invernadero	100
Lixiviado con recarga dentro del invernadero	168.5
Lixiviado estancado dentro del invernadero	158.0
Agua estancada fuera del invernadero	26.2

Comportamiento de la temperatura

Durante la primavera, como se aprecia en la Figura 4.22, el mayor incremento en la temperatura interna del invernadero se mostró en el transcurso de la mañana, y por la tarde, aunque en menor proporción, el parámetro continuó en ascenso.

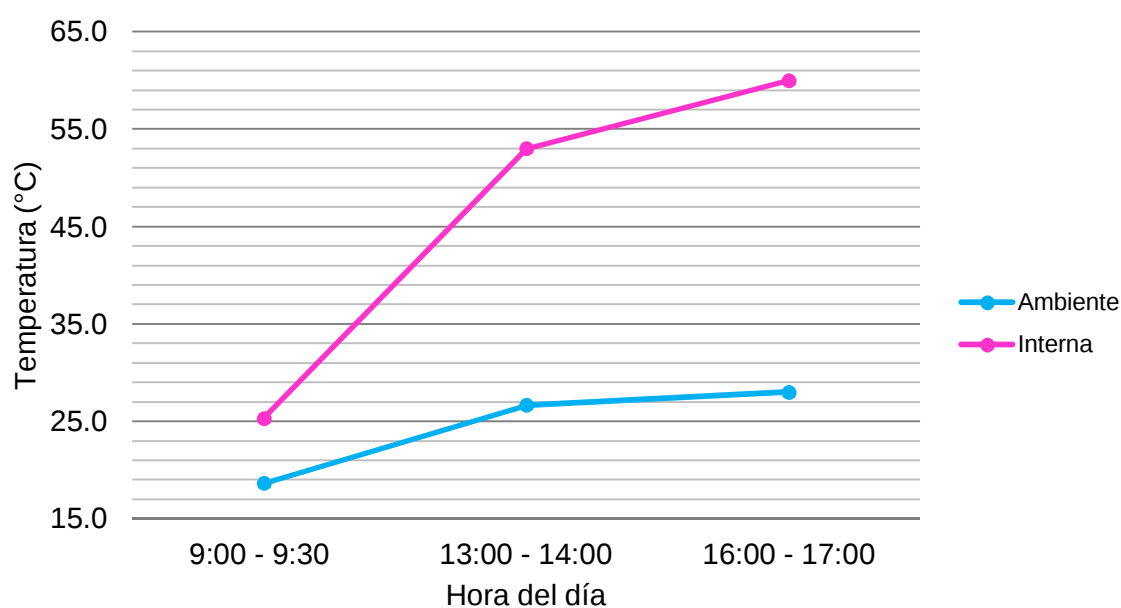


Figura 4.22: Comportamiento promedio de la temperatura durante el día. Prueba 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al respecto del comportamiento de la temperatura de lixiviados durante el día, como se puede ver en la figura 4.23, su mayor incremento a nivel superficial ocurrió en el transcurso de la mañana y posteriormente se mantuvieron muy cerca de lo que fue su registro más alto. Los lixiviados que exhibieron los valores más altos de este parámetro, fueron los que se colocaron al Norte; mientras que aquellos que se ubicaron al Sur fueron los de menor temperatura, aunque su diferencia con los de en medio fue muy pequeña. Por otra parte, los que se dejaron fuera del invernadero tuvieron el mismo comportamiento que los internos, pero sus registros fueron los menores todo el tiempo.

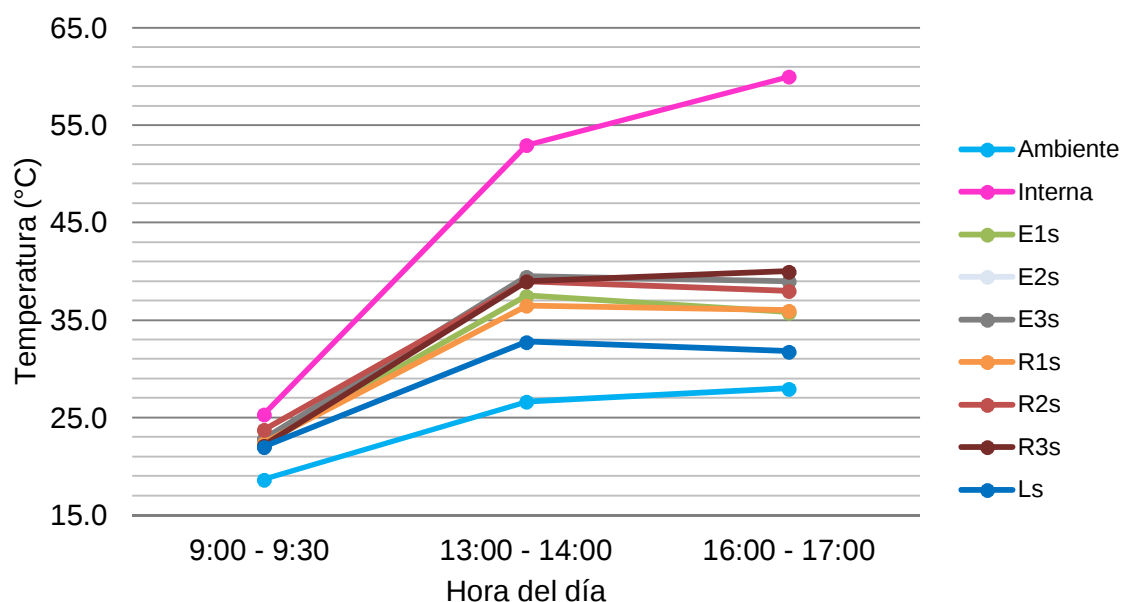


Figura 4.23: Comportamiento promedio de temperaturas superficiales de lixiviados durante el día. Prueba 3

La temperatura media de los lixiviados, como se aprecia en la Figura 4.24, fue muy similar entre todos ellos, siempre ascendente en el transcurso del día; y al igual que a nivel superficial, los que se ubicaron al Norte del invernadero manifestaron las mayores lecturas, mientras que los del Sur y los de afuera arrojaron los menores registros.

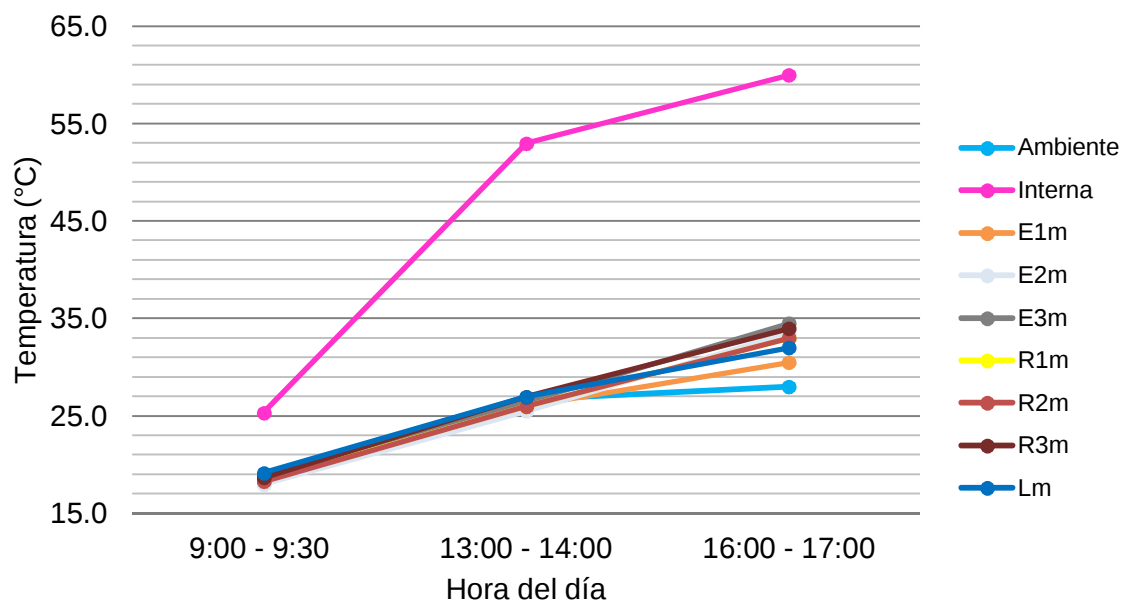


Figura 4.24: Comportamiento promedio de temperaturas medias de lixiviados durante el día. Prueba 3

Al respecto de las temperaturas superficiales de los líquidos que se dejaron fuera del invernadero, la de los lixiviados exhibió valores ligeramente mayores que la del agua desde temprana hora, alcanzando su máximo registro alrededor de las 13:00 horas y posteriormente descendió de manera paulatina; la del agua en cambio, se comportó muy similar a la ambiente, ligeramente mayor en el transcurso del día. Después de las 16:00 horas las temperaturas de ambos líquidos se encontraban muy cercanas, ya que la del agua continuó en ascenso durante la tarde. Se desconoce si en algún momento la temperatura superficial del agua alcanzó o rebasó a la de los lixiviados ya que no se tienen lecturas posteriores a esta hora.

En lo que se refiere a sus temperaturas medias, la del agua, al igual que en su superficie, se mostró ligeramente mayor pero muy semejante a la ambiente; en tanto que en el lixiviado, se manifestó como los datos internos: siempre ascendente en el transcurso del día, pero en este caso, en paralelo con la temperatura ambiente durante la mañana, y por la tarde continuó subiendo a la misma tasa, rebasando a la temperatura media del agua alrededor de las 15:30 horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación del comportamiento promedio de las temperaturas del lixiviado y del agua, en relación con la temperatura ambiente a la que se sometieron, se presenta en las Figuras 4.25 (superficial; Ls, As) y 4.26 (media; Lm, Am), en donde “L” simboliza a los lixiviados, y “A” al agua.

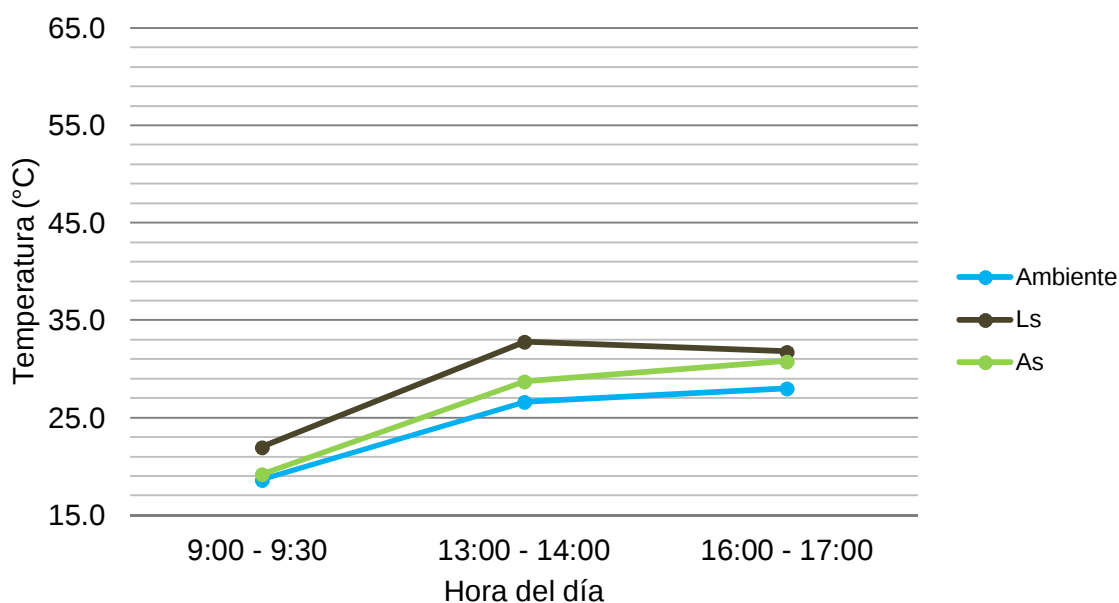


Figura 4.25: Comportamiento promedio de temperaturas superficiales de líquidos fuera del invernadero durante el día. Prueba 3

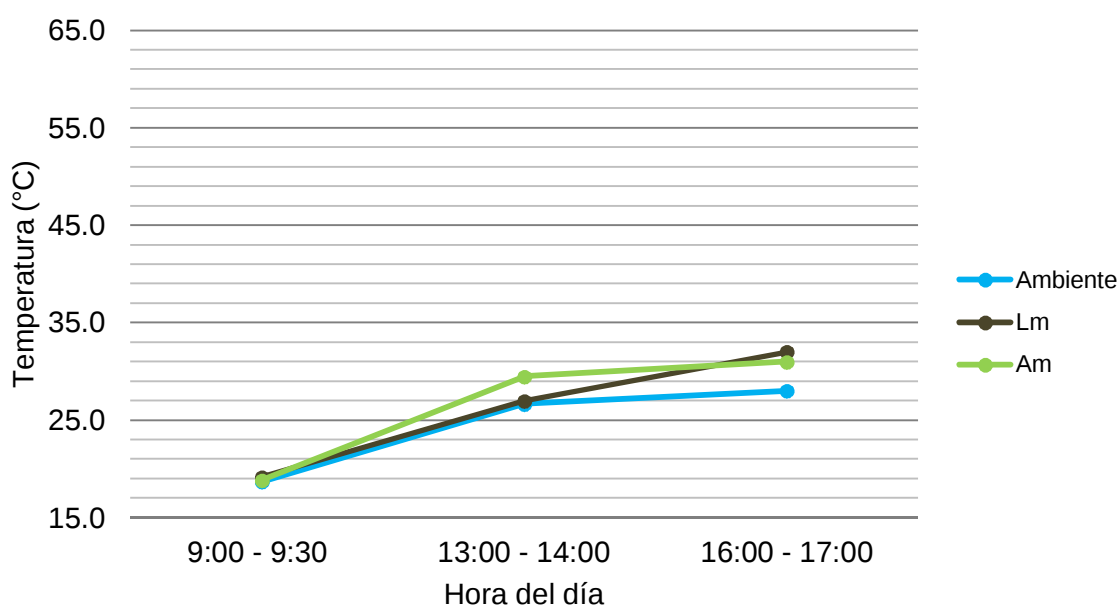


Figura 4.26 Comportamiento promedio de temperaturas medias de líquidos fuera del invernadero durante el día. Prueba 3

Llama la atención que la temperatura media del agua excedió ligeramente a la de su superficie a partir del mediodía aproximadamente; y que la temperatura media de los lixiviados externos rebasó su temperatura superficial después de las 16:00 horas; mientras que en los lixiviados internos esta condición no se presentó.

Parámetros fisicoquímicos de lixiviados

La toma de muestras para su análisis en laboratorio se llevó a cabo los días 1, 5, 10, 15 y 20 de la prueba, y se tomaron a nivel de la superficie. Por razones operativas se reduce el número de parámetros monitoreados.

La nomenclatura utilizada en la Tabla 4.4 y en los gráficos que muestran el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos monitoreados en el transcurso de la prueba es la siguiente

L: Lixiviados fuera del invernadero.

E: Muestra que se compone de las 3 palanganas en las que los lixiviados permanecieron estancados.

R: Muestra que se compone de las 3 bandejas en las que los lixiviados se recargaban.

La composición de las muestras “E” y “R” se realizó proporcionalmente a la disminución del tirante de cada una de las charolas involucradas.

Es importante considerar que las muestras se tomaron de la superficie de los líquidos en estudio, con la intención de no interferir en los procesos de transferencia de calor y de movimiento de partículas; sin embargo, en virtud de que estos líquidos se encontraban en reposo, aquellos compuestos de mayor densidad se habrán ido al fondo entre el primer y quinto día, por lo que es probable que el movimiento de algunos parámetros en la primera etapa de la prueba se deba a esta consideración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.4 Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos de lixiviados monitoreados durante la prueba

Día Muestra	1	5	10	15	20
Turbiedad (NTU)					
L	875.00	1,530.00	1,845.00	1,965.00	2,370.00
E	875.00	1,330.00	1,740.00	2,040.00	2,450.00
R	875.00	1,710.00	1,955.00	2,310.00	2,340.00
ST (mg·L⁻¹)					
L	19,260.00	23,780.00	27,580.00	27,800.00	32,000.00
E	19,260.00	21,480.00	26,560.00	29,000.00	39,000.00
R	19,260.00	21,460.00	25,840.00	28,600.00	34,000.00
SST (mg·L⁻¹)					
L	410.00	920.00	1,190.00	1,300.00	2,100.00
E	410.00	660.00	1,070.00	1,000.00	1,300.00
R	410.00	930.00	1,330.00	1,700.00	1,600.00
SDT (mg·L⁻¹)					
L	18,850.00	22,860.00	26,390.00	26,500.00	29,900.00
E	18,850.00	20,820.00	25,490.00	28,000.00	37,700.00
R	18,850.00	20,530.00	24,510.00	26,900.00	32,400.00
Conductividad (mS)					
L	9.15	14.00	13.93	13.37	13.30
E	9.15	13.43	13.75	13.64	14.66
R	9.15	13.36	13.76	13.77	13.79
pH					
L	8.10	8.27	8.08	8.13	8.21
E	8.10	8.22	8.14	8.24	8.55
R	8.10	8.21	8.12	8.17	8.24
DQO (mg·L⁻¹)					
L	7,050.00	11,250.00	13,400.00	13,350.00	10,050.00
E	7,050.00	9,150.00	14,750.00	11,550.00	10,450.00
R	7,050.00	10,200.00	14,700.00	14,650.00	9,750.00

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.4: Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos de lixiviados monitoreados durante la prueba (continuación)

Día Muestra	1	5	10	15	20
Alcalinidad total ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
L	9,472.66	10,386.05	9,979.81	10,351.78	10,285.02
E	9,472.66	9,547.24	9,283.20	9,584.98	9,269.31
R	9,472.66	9,882.45	9,472.66	11,332.67	11,461.91
Alcalinidad por hidróxidos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Alcalinidad por carbonatos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
L	2,328.00	1,746.00	3,880.00	1,164.00	2,716.00
E	2,328.00	1,552.00	2,328.00	1,164.00	3,492.00
R	2,328.00	2,017.60	2,328.00	970.00	2,328.00
Alcalinidad por bicarbonatos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
L	7,144.66	8,640.05	6,099.81	9,187.78	7,569.02
E	7,144.66	7,995.24	6,955.20	8,420.98	5,777.31
R	7,144.66	7,864.85	7,144.66	10,362.67	9,133.91
Cloruros ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
L	5,333.80	5,597.85	6,844.16	6,601.23	7,287.76
E	5,333.80	5,703.47	6,654.04	7,815.86	9,717.02
R	5,333.80	5,914.70	6,337.18	6,548.42	7,974.29
Sulfatos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
L	10.00	190.00	200.00	210.00	250.00
E	10.00	120.00	230.00	140.00	120.00
R	10.00	120.00	250.00	180.00	110.00
Fosfatos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
L	50.50	22.50	15.50	12.00	20.50
E	50.50	23.50	9.00	15.50	41.00
R	50.50	9.50	11.50	11.50	24.00

De manera general, los resultados de la mayoría de los parámetros fisicoquímicos que se monitorearon durante la prueba, manifestaron un comportamiento

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ascendente conforme transcurrieron los días; únicamente los bicarbonatos contenidos en los lixiviados estancados y los fosfatos, resultaron con valor menor al inicial, sin embargo, no se puede considerar que como tal hayan escapado a la atmósfera ya que no son volátiles, aunque es posible que se hayan descompuesto en formas más simples o reaccionado para formar compuestos que sean factibles de dejar los líquidos.

Al respecto del nitrógeno, que es una medida importante de la contaminación, no se reporta en alguna de sus formas debido a que la disponibilidad de los reactivos no coincidió con las fechas en que se realizaron las determinaciones, a excepción de los nitratos y nitritos, que bajo una dilución de 1:10, se tiene la certeza que se encontraban por debajo del rango de detección del equipo y reactivo utilizado, es decir menor a 0.300 y $0.002 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente.

La turbiedad de los lixiviados fue muy alta desde que inició la prueba; en los primeros 5 días casi se duplicó en la muestra “R”; mientras que la muestra “E” manifestó un comportamiento estable con incrementos de 400 NTU cada 5 días en promedio; al finalizar la prueba, la muestra con mayor turbiedad fue la de lixiviados estancados, seguida por los de recarga y por último los que se dejaron afuera.

Al respecto de los valores de la turbiedad en los lixiviados que se recargaron periódicamente, además del impacto que pueda tener la recarga sobre este parámetro, es importante reiterar que no sólo la tasa a la que se incrementaba la turbiedad descendió después de los primeros días, sino también la de reducción de tirantes, por lo que se presume que el valor de la turbiedad está estrechamente ligado a la disminución del volumen, lo que coincide con la premisa de que, al menos durante el periodo de sol, que según los resultados de la prueba 2 es cuando se alcanza la mayor disminución de tirantes, misma que se da por evaporación, los compuestos y elementos que logren vaporizar serán aquellos líquidos de bajo punto de ebullición, y no los sólidos suspendidos en los líquidos en estudio. En la Figura 4.27 se presentan graficados los incrementos de la turbiedad cada 5 días de la muestra compuesta por los lixiviados que se recargaban constantemente, y su relación con la disminución de sus tirantes para los mismos periodos de tiempo; en

la que se demuestra que: a mayor reducción de tirante, mayor incremento en la turbiedad, y que conforme pasan los días, tanto el descenso de volumen como el aumento en la turbiedad, son menores.

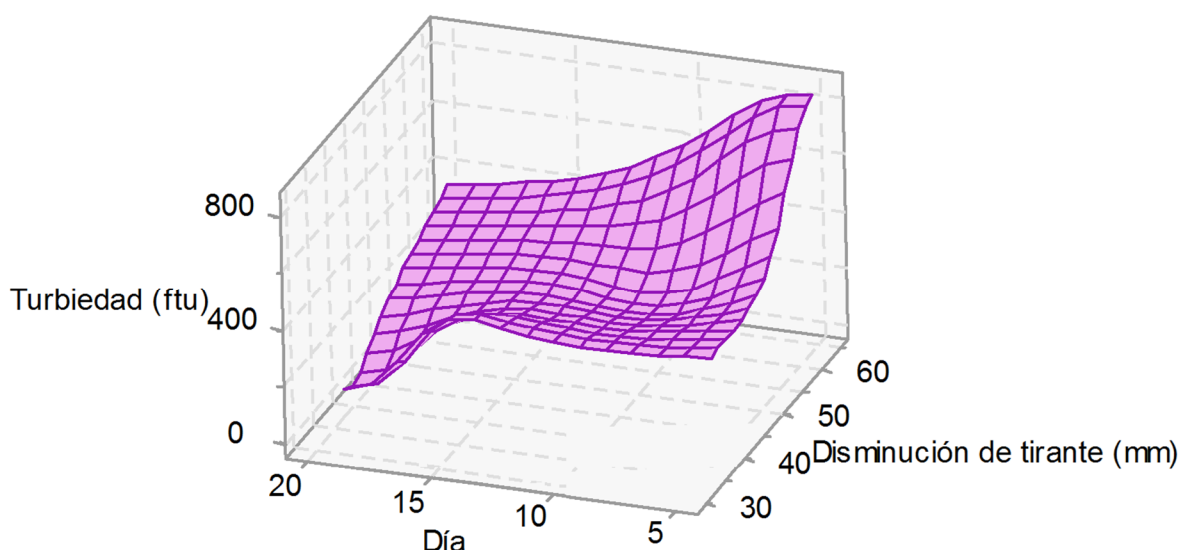


Figura 4.27: Cambios de turbiedad vs disminución de tirantes durante la prueba, muestra "R". Prueba 3

Es importante mencionar que como parte de la preparación de las muestras se intentó filtrar los lixiviados, sin embargo el uso de filtros de papel de 125 nm, acrodisc y centrifugado por más de una hora, no logró buenos resultados, lo que es congruente con los altos valores de turbiedad.

La masa de sólidos por unidad de volumen también aumentó en el transcurso de los días; al inicio de la prueba la muestra que arrojó el mayor incremento en la concentración de este parámetro fue la del lixiviado que se dejó fuera del invernadero; y después de la primera mitad, aunque siguió en ascenso, su tasa descendió; resultados que se atribuyen a que fue la muestra con mayor grado de exposición a factores como polvo y lluvia, por lo que se determina que la concentración de sólidos puede ser afectada por factores ambientales, impactos que se reducen con el uso del invernadero. Al final de la prueba la muestra con mayor concentración de este parámetro fue "E", seguida por "R" y por último "L".

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por otro lado, se considera que la diferencia entre las temperaturas superficiales del agua y del lixiviado externo, que se aprecia en la Figura 4.25, puede ser consecuencia de la alta concentración de sólidos contenidos en los lixiviados, ya que estos también tienen la capacidad de absorber calor.

Como se muestra en las Figuras 4.28 a 4.30, del total de sólidos contenidos en los líquidos en estudio, los sólidos suspendidos representan una contribución muy pequeña y se incrementaron de manera paulatina y conjunta con el paso de los días.

Por su parte, los sólidos disueltos conformaban el 98% del total de sólidos al día 1; los primeros 15 días se incrementaron de manera gradual y conjunta para las 3 muestras; y en los últimos 5 días, los lixiviados estancados manifestaron una elevación en la tasa en que aumentaba su concentración. La muestra que arrojó la mayor concentración de sólidos disueltos al terminar los 20 días de la prueba, fue “E”, seguida por “R” y al final “L”, con valores que representan el 96.7, 95.3 y 93.4 % del total de sólidos, respectivamente; lo que sugiere que la caracterización de estos líquidos comprende un alto contenido de sales menores a 2 micrómetros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

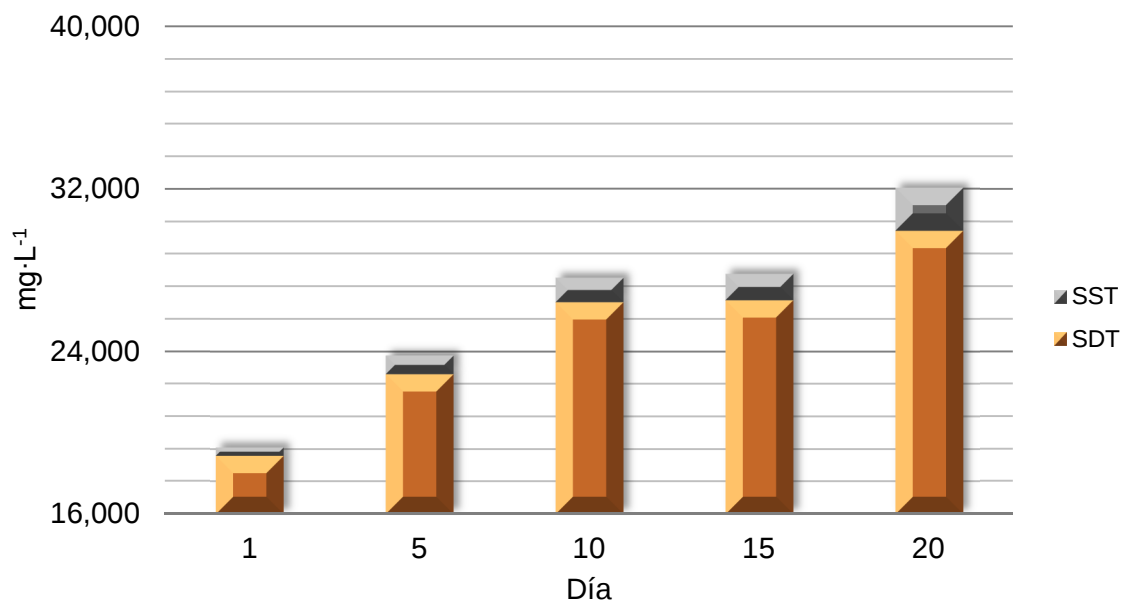


Figura 4.28: Concentración de sólidos durante la prueba, muestra "L". Prueba 3

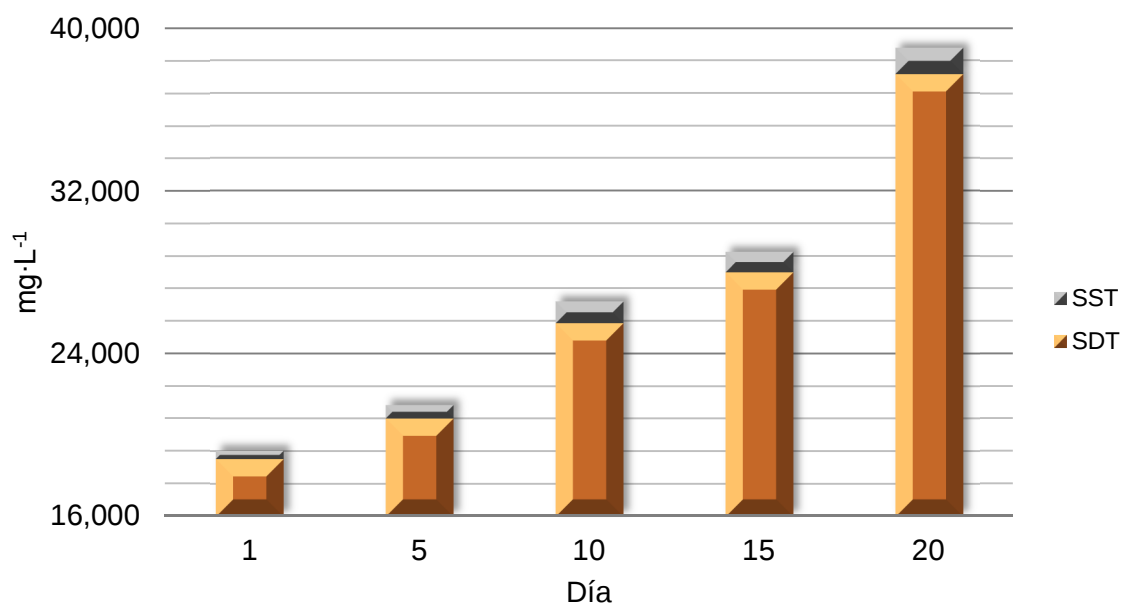


Figura 4.29: Concentración de sólidos durante la prueba, muestra "E". Prueba 3

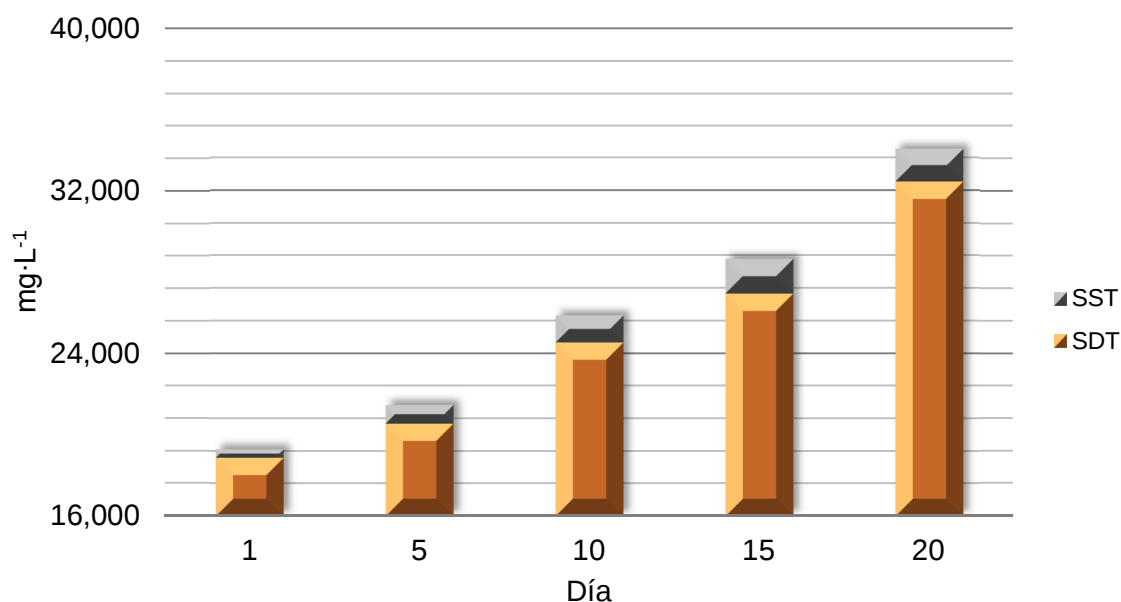


Figura 4.30: Concentración de sólidos durante la prueba, muestra "R". Prueba 3

La conductividad eléctrica de las muestras fue considerablemente alta, medida en (milisiemens), lo que es coherente con la suposición de que las muestras son ricas en sales. El mayor cambio se experimentó en los primeros 5 días y posteriormente el movimiento fue despreciable, finalizando la prueba en una mayor conductividad para las muestras de lixiviado estancado, seguido por el lixiviado con recarga, y por último el que se dejó fuera del invernadero, al igual que la turbiedad y los sólidos. Llama la atención que la conductividad del lixiviado externo mostró un ligero descenso posterior al día 10, posiblemente por la incidencia de precipitación pluvial sobre esta charola.

Al respecto del pH, el inicial fue de 8.10 y su valor prácticamente se mantuvo durante los 20 días de la prueba.

Como se aprecia en las figuras 4.31 a 4.33, de acuerdo a las reacciones previstas de alcalinidad, según los datos arrojados por la determinación de alcalinidad total y alcalinidad a la fenolftaleína: no existió alcalinidad por hidróxidos, la mayor contribución a la alcalinidad total fue debida a bicarbonatos y muy poca a carbonatos, y ambos parámetros exhibieron comportamientos contrarios en su concentración durante la prueba, por lo que la alcalinidad total prácticamente

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

permaneció en su nivel inicial, excepto para la muestra “R” que entre los días 10 y 15 experimentó un incremento de bicarbonatos que se reflejó en un alza de su alcalinidad total.

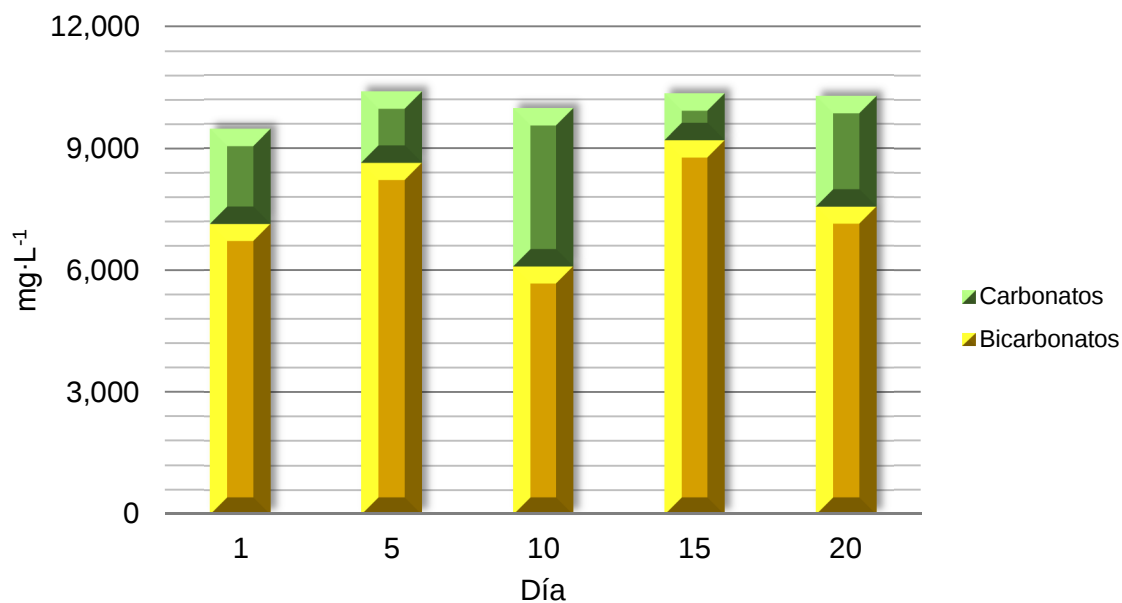


Figura 4.31: Alcalinidad durante la prueba, muestra “L”. Prueba 3

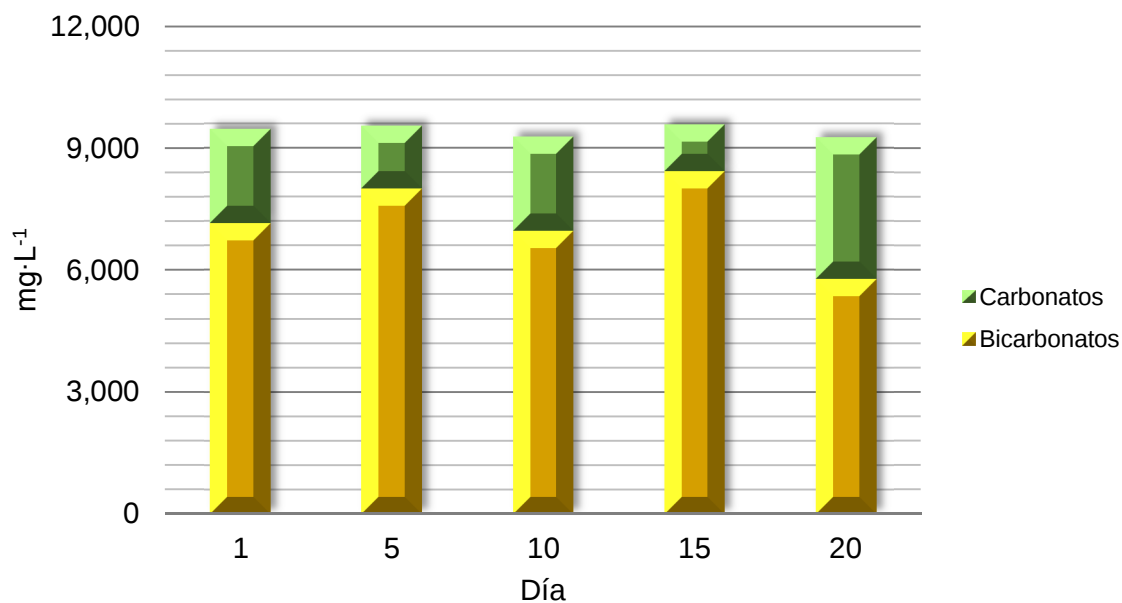


Figura 4.32: Alcalinidad durante la prueba, muestra “E”. Prueba 3

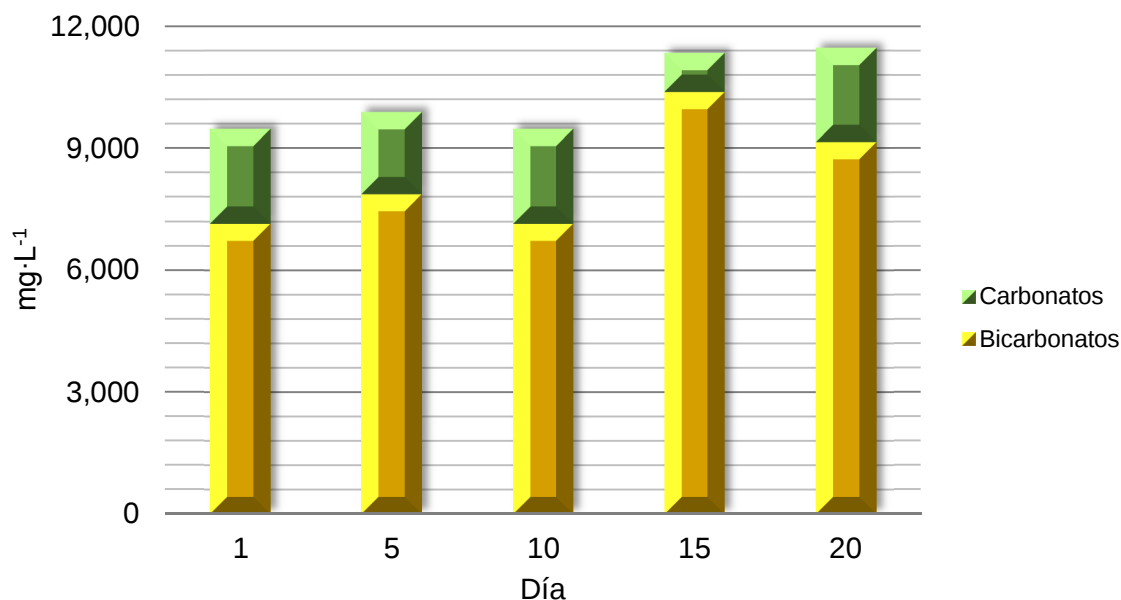


Figura 4.33: Alcalinidad durante la prueba, muestra "R". Prueba 3

Al respecto de las sales contenidas en los líquidos problema, la concentración de cloruros fue muy alta y, al igual que la mayoría de los parámetros hasta ahora analizados, se incrementó en el transcurso de los días y finalizó la prueba con mayor concentración en la muestra "E", seguida por "R" y por último "L"; durante los primeros 10 días su incremento fue paulatino y similar entre las 3 muestras, y posteriormente las tasas de ascenso en sus concentraciones cambiaron para las 3 muestras: mientras que en "E" subió, "R" mostró un incremento apenas superior que en la primera mitad, y en "L", aunque continuó en aumento, fue menor que en los primeros 10 días.

Cabe mencionar que los residuos de la determinación de cloruros mediante titulación con nitrato de plata, se dejaron varias horas en reposo con la intención de inducir la precipitación, sin embargo éstos no llegaron a separarse, por lo que se intuye que los cloruros presentes en las muestras son del tipo coloidal, lo que es congruente con los altos valores de turbiedad y con la elevada concentración de los sólidos disueltos totales que sugieren la presencia de sales menores a 2 micrómetros. En la Figura 4.34, se presenta la relación entre los incrementos en la concentración de cloruros ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y de sólidos disueltos totales ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en el

transcurso de la prueba, para la muestra compuesta por los lixiviados que se dejaron estancados; de la que se determina que la formación de sales de cloro produce un aumento en la cantidad de sólidos disueltos, por lo que se presume que una importante proporción del total de los sólidos disueltos en los líquidos en estudio fue dada por los cloruros.

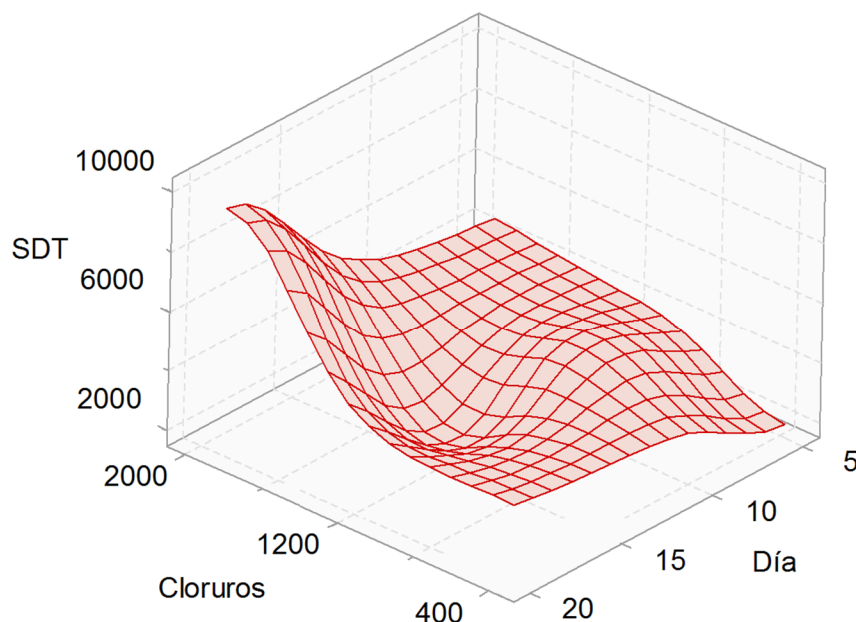


Figura 4.34: Cambios en la concentración de: SDT vs cloruros, muestra “E”.
Prueba 3

En lo que respecta a los sulfatos, comenzaron la prueba con concentraciones bajas, durante los primeros 10 días el valor del parámetro ascendió; y posteriormente “R” y “E” volvieron a descender, mientras que la concentración de los lixiviados externos continuó en ascenso, aunque a menor tasa que en la primera mitad. Por su parte, los fosfatos se comportaron de manera contraria a los sulfatos: experimentaron una reducción en su concentración, siendo el periodo de mayor descenso los primeros 5 días de la prueba, posteriormente hasta el día 15 su movimiento fue menor, y durante los últimos días viró hacia una mayor concentración. Es posible que las sales que constituyen estos dos parámetros se encuentren en constante reacción de doble sustitución entre ellas, disociación que genera iones capaces de transportar la electricidad, lo que es congruente con los altos valores de conductividad. En la Figura 4.35 se presenta la interacción entre fosfatos y sulfatos,

ambos en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, y su relación con la conductividad, en mS, de la que se determina que la presencia de sulfatos, es favorecida por incremento en la conductividad, y es minimizada cuando los fosfatos están en alta concentración.

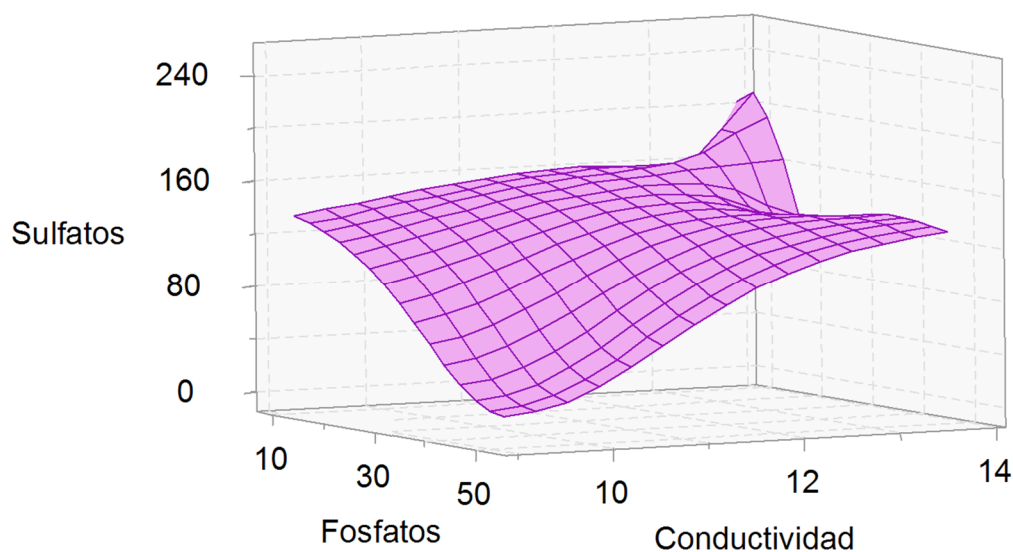


Figura 4.35: Sulfatos vs fosfatos vs conductividad, muestra “R”. Prueba 3

Por último, la demanda química de oxígeno exhibió una concentración muy alta, y se incrementó durante la primera mitad de la prueba, posteriormente su concentración decreció; es posible que este descenso sea resultado de la actividad microbiana desarrollada en los líquidos en estudio durante la primera mitad.

4.2: Discusión de resultados

4.2.1: Pruebas preliminares

A pocas horas de haber comenzado la primera prueba con lixiviados, se hizo evidente que éste evapora más rápido que el agua, lo que lleva a pensar que su calor específico es menor, llegando a saturar de humedad el microclima interno del invernadero, y concluyendo en condensación en paredes y techo internos de la planta piloto, por lo que fue necesario abrir más ventilas. Aunque la temperatura interna del invernadero sí disminuyó considerablemente debido al aumento de ventilación, las temperaturas superficiales y medias de los líquidos no descendieron de manera significativa, y la diferencia de tirantes fue mayor para todas las charolas, con lo que se deduce que una mayor temperatura ambiente interna del invernadero, no necesariamente se traduce en mayor evaporación, ya que si el aire interno se llega a saturar de humedad, se alcanzaría un estado estable en el que los procesos evaporación – condensación ocurren a la misma velocidad; para evitar esto es necesario proporcionar ventilación de entrada que desplace el aire húmedo y caliente, ocasionando inevitablemente una baja de temperatura.

Llama la atención la rapidez con la que descendió la temperatura interna del invernadero, ya que su disminución se presentó en cuanto aumentó la intensidad del viento, lo que lleva a conjeturar que el microclima interno del invernadero es altamente sensible a la entrada de aire; no obstante, las temperaturas superficiales y medias del líquido no bajaron de manera significativa, y el líquido siguió evaporando, por lo que se intuye que una vez que el ambiente logra proporcionar al líquido el calor latente de vaporización, gracias a la retención de calor que muestra el líquido, el proceso de ebullición continúa.

4.2.2: Prueba 1: Determinación del tirante óptimo de lixiviados

Disminución de tirantes

Lejos de los que se tenía pensado, que el lixiviado de la palangana con menor volumen evaporaría más rápido, fue el que menor reducción de tirante arrojó; sin

embargo los recipientes que se utilizaron son de la misma medida conteniendo diferente volumen de líquido, y pudiera ser este un factor de impacto significativo sobre todo en la disminución del líquido durante la noche por acción del viento.

Por otro lado, las palanganas que más evaporación presentaron contenían alturas del líquido iniciales de 150, 300 y 415 mm, siendo importante señalar que estas 3 charolas se encontraban ubicadas en el extremo Norte del invernadero. Se esperaba que la mayor disminución de volumen se encontrara en tirantes iniciales de medidas consecutivas, no obstante, la mayor evaporación se dio en las charolas que se colocaron al Norte, por lo que se puede considerar que tiene mayor influencia la ubicación dentro del invernadero, que la altura de la lámina del líquido.

Comportamiento de la temperatura

En lo que se refiere a las temperaturas de los líquidos en estudio, es importante mencionar que el instrumento usado para las mediciones fue un termómetro de mercurio, y que debido al color de los lixiviados no fue posible tomar las temperaturas de fondo para las charolas con tirantes mayores a 100 mm, sin embargo, en virtud de que las únicas dos palanganas en las que se pudo monitorear este parámetro, arrojaron lecturas por arriba de las temperaturas medias del líquido las demás palanganas, se presume que el cuerpo negro que representa la geomembrana tiene influencia en la temperatura a nivel de fondo.

A pesar de que las mayores temperaturas superficiales se encontraron en el lado Oeste del invernadero y que fueron las de mayor tirante, las palanganas que más disminución de volumen mostraron fueron las ubicadas en el extremo Norte; lo que lleva a pensar que el valor de la temperatura pudiera ser proporcional a la altura de la lámina del líquido, mientras que en la disminución de tirantes tiene mayor influencia su ubicación dentro del invernadero.

4.2.3: Prueba 2: Eficiencia en la disminución de tirantes de lixiviados según su ubicación dentro del invernadero

Disminución de tirantes

La evaporación de lixiviados durante el día fue mayor con el uso del invernadero que sin él, sin embargo no toda la superficie de la base fue eficiente en este tenor, sino únicamente los extremos Norte y Oeste; mientras que por la noche de manera general, la reducción de tirantes sí fue mayor en toda el área de la estructura, lo que indica que con la ventilación del diseño del modelo experimental se logró mayor turbulencia que fuera de éste, mejorando el contacto del aire seco con la superficie del líquido. Al adicionar los datos obtenidos en ambos lapsos, en general se obtuvo mayor descenso de tirantes con el uso del invernadero que sin él.

Disminución de tirantes según su ubicación dentro del invernadero

Al respecto de la disminución de volumen de lixiviados de acuerdo a su ubicación dentro del invernadero, destacó el extremo Norte por ser donde mayores lecturas se registraron, y se hace evidente no sólo que la eficiencia del parámetro decrece hacia el Sur, sino además que este extremo presenta dificultades para la evaporación, ya que es durante el periodo de luz cuando se precisó la mayor contribución en el descenso de tirantes.

Es importante reiterar, que en virtud de que la trayectoria del Sol va del Este al Oeste pasando por el Sur, no fue importante brindarle a la pared Norte la transmitancia que requieren las demás paredes y techo, sino que por el contrario, se consideró preferible proveer este extremo con materiales capaces de devolver al interior de la estructura la radiación que entra por las demás paredes y techo, así como el albedo que los líquidos proporcionan; por lo que la pared Norte no es igual a las demás, sino que se colocó una pared interna de madera forrada con aluminio, con la intención de refractar la luz hacia las charolas, y es probable que sea este aditamento el que haya provocado una mayor eficiencia en la evaporación de las bandejas cercanas.

Comportamiento de la disminución de tirantes en el transcurso del día

Llama la atención que la disminución del tirante de los lixiviados que se dejaron fuera del invernadero se favoreció entre las 13:30 y 16:00 horas, a diferencia de los internos. Es posible que el viento sea responsable del incremento de este parámetro en esta charola, ya que fue la única que durante el periodo vespertino se encontraba expuesta al viento, y como se explicó en el apartado 3.1.2, en el sitio de experimentación el aire toma fuerza por la tarde; por lo que es probable que proporcionar al invernadero por la tarde la ventilación nocturna, favorezca a la disminución de tirantes de los lixiviados internos en este horario. Por otro lado, también fue el único caso en que sus temperaturas media y superficial fueron iguales o muy parecidas, alcanzando la convergencia de estos últimos dos parámetros alrededor de las 13:30 horas, y permaneciendo así hasta las 16:30 horas, que fue la última medición del día. Analizando la dirección en la que se transfiere el calor; la radiación incide directamente sobre la superficie del líquido y se desplaza hacia abajo por convección, sin embargo, para el caso de esta palangana, no existe pérdida de calor de su superficie a su parte media a partir de las 13:30 horas debido a que ambas secciones se encuentran a la misma temperatura, y es probable que como consecuencia de esto, la radiación que entre por la superficie del líquido a partir de esta hora se convierta en calor latente de vaporización, a pesar de que esta bandeja exhibió todo el tiempo las menores temperaturas tanto superficiales como media, lo que lleva a pensar que la igualdad de temperatura entre ambas secciones beneficia al proceso de evaporación; y de acuerdo a los datos obtenidos en la primera prueba, con el uso de geomembrana actuando como cuerpo negro, se logra elevar la temperatura de fondo, la cual contribuye al aumento de la temperatura media en tirantes bajos.

Tasas de disminución de tirantes

Resulta difícil determinar una tasa promedio diaria de disminución de tirantes, ya que se manifestó estrechamente relacionada a su ubicación dentro del invernadero,

que a su vez se comportó diferente de acuerdo al periodo del día. En general durante la mañana, los lixiviados dentro del invernadero exhibieron mayor tasa de evaporación que fuera de éste, a excepción de los que se colocaron al Suroeste, donde evaporaron a la misma velocidad, sin embargo es la única ubicación en que durante la tarde, evaporaron más rápido que los externos; al finalizar el día, sólo los lixiviados al Norte y al Oeste arrojaron mayor tasa de evaporación que afuera, haciendo evidente que el invernadero presenta dificultades en su parte Sureste para el proceso de ebullición. Al integrar los datos obtenidos en los diferentes periodos del día, en general los lixiviados internos arrojaron mayor tasa de disminución de tirantes que los que se dejaron afuera, siendo importante señalar que los valores más altos se encontraron en el lapso de la mañana, así como en los que se ubicaron al Norte, parámetro que decrece hacia el Sur.

Comportamiento de la temperatura

Llama la atención que las temperaturas superficiales de todos los lixiviados que se colocaron dentro del invernadero, para el mediodía ya habían alcanzado o rebasado a la temperatura ambiente interna, y posteriormente continuaron subiendo, permaneciendo más altas desde entonces. Es posible que el líquido continuara absorbiendo temperatura del microclima interno, aunque esto no es congruente con la teoría de transferencia de calor que especifica que el transporte ocurre del cuerpo de mayor al de menor temperatura, sí se puede inferir que el lixiviado presenta buena absorción y retención de calor, además del hecho de que los lixiviados ubicados al Noroeste exhibieron temperatura superficial por encima de la temperatura interna desde temprana hora.

Durante la tarde en cambio, cuando las temperaturas superficiales de los lixiviados dentro del invernadero disminuían, sus temperaturas medias seguían en ascenso, lo que sí es coherente con las teorías del flujo de transferencia de calor, ratificando que es una cantidad vectorial y que fluye de la sección de mayor a la de menor temperatura, en este caso de la superficie del líquido hacia su parte media.

Por último, es notorio que en la prueba 2 no hubo tanta diferencia entre la temperatura ambiente interna del invernadero y la ambiente externa del sitio de experimentación como la que se reportó en las pruebas preliminares, sin embargo, también es notorio que las diferencias de tirantes fueron mayores en esta segunda prueba. Es posible que los grados de diferencia en el microclima del invernadero se hayan convertido en calor latente de vaporización, ya que tampoco se aprecia una diferencia significativa en las temperaturas superficiales de los lixiviados entre ambas pruebas.

Resulta complicado comprender el comportamiento del microclima interno del invernadero, así como la absorción de calor de los líquidos dentro de éste, presumiendo que en estos procesos de transferencia de calor se ven involucrados otros parámetros. Asimismo, no es posible relacionar directamente a la temperatura de los líquidos con su evaporación, ya que existen diversos factores jugando un papel importante en el cambio de fase, como son la humedad, el viento, la nubosidad y la presión de vapor. En el Anexo 1 se presenta información complementaria de la experimentación relacionada con estos fenómenos.

4.2.4: Prueba 3: Proceso estancado vs recarga

Disminución de tirantes

En los gráficos presentados en el apartado 4.1.4 se aprecia de manera general, un decremento en la cantidad en que se redujeron los lixiviados al paso de los días, siendo especialmente notorio al inicio de la prueba, lo que pudiera llevar a pensar que es debido al tiempo de exposición de los líquidos al uso del invernadero; sin embargo, en el sexto día volvió a aumentar el descenso diario de volumen no sólo para los casos en los que el lixiviado ya había sido recargado, sino también en los estancados; y para el día 9, que se volvieron a recargar, el valor de este parámetro cayó bruscamente para las 3 variantes del proceso en estudio; por lo que no se puede considerar que la eficiencia de la técnica propuesta haya disminuido como consecuencia del tiempo de exposición de los lixiviados para su minimización, toda vez que la reducción del tirante de la charola de afuera, misma que simula la laguna

de retención, se vio afectada de la misma manera. Es posible atribuir este comportamiento al clima acaecido en el sitio de experimentación durante los días en que se llevó a cabo la prueba, por lo que, para analizar el comportamiento del descenso de tirantes en el transcurso de la prueba, es necesario relacionar los resultados con los eventos meteorológicos ocurridos en el sitio de experimentación y los del microclima interno del invernadero. En la Tabla A.2 del Anexo 1 se exponen las observaciones de relevancia que tuvieron lugar durante la etapa experimental y que pudieran tener un impacto significativo en los resultados de esta prueba.

Por último, resulta evidente según la Figura 4.21, que el lixiviado tiene mayor facilidad para el proceso de evaporación que el agua, por lo que se presume que el calor latente de vaporización del lixiviado es menor al del agua.

Comportamiento de la temperatura

En primavera, el microclima interno del invernadero se comportó distinto a como lo hizo en las dos primeras pruebas, las cuales se realizaron en temporada de invierno. Mientras que al inicio del año la temperatura interna de invernadero llegó a su máximo valor alrededor de las 13:30 horas, en primavera el mayor incremento también se exhibió en el transcurso de la mañana, pero posteriormente no descendió como en las primeras pruebas sino que continuó en ascenso, siendo importante mencionar que la temperatura ambiente externa también continuó en aumento, aunque éste fue muy pequeño.

Al respecto de los lixiviados que se colocaron dentro del invernadero, se observó que el comportamiento de su temperatura, tanto superficial como media, es muy similar al de las pruebas anteriores, con la diferencia de que en primavera, el descenso de este parámetro a nivel de la superficie fue despreciable durante la tarde, mientras que en invierno decrece marcadamente. Debido a los horarios de monitoreo se desconoce el comportamiento de la temperatura posterior a las 17:00 horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En general, la superficie de los lixiviados sometidos a las mismas condiciones que el agua, exhibió mayor temperatura desde temprana hora, sin embargo, durante la tarde descendió mientras que la del agua continuó en subiendo, de manera que entre las 16:00 y las 17:00 horas ambas temperaturas se encontraban muy cercanas. Esto lleva a pensar que la absorción de calor por parte de los lixiviados es más rápida que para el caso de agua, pero su retención de calor es menor.

De acuerdo con la gráfica de temperaturas medias de los líquidos que se dejaron fuera del invernadero, la del agua subió a mayor velocidad que la del lixiviado, no obstante, aproximadamente a las 15:30 horas, la del lixiviado sobrepasó a la del agua, ya que continuó ascendiendo durante la tarde mientras que la del agua, aunque sí se incrementó, éste fue muy pequeño para el segundo lapso del día; con lo que se intuye que la velocidad a la que se transfiere el calor por convección en el agua, de su superficie hacia su parte media, es mayor que para el lixiviado, además del hecho de que a partir del mediodía aproximadamente, la temperatura media del agua no sólo igualó sino que rebasó ligeramente a la de su superficie. Es probable que la disminución de la temperatura superficial del lixiviado en el transcurso de la tarde se deba a la transferencia de calor por convección de la superficie hacia su parte media, ya que esta última siguió incrementándose.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se exponen las conclusiones que arrojaron los trabajos de campo y los hallazgos de mayor relevancia que tuvieron lugar en la experimentación, así como las recomendaciones para el uso de la técnica aquí propuesta y para la continuidad en su línea de investigación.

5.1: Conclusiones

- La hipótesis planteada en el presente trabajo se cumplió debido a que, en un periodo de 20 días en que terminó la prueba, la disminución de tirantes volumen de lixiviados que se logró dentro del invernadero fue: del 52% para los lixiviados que se dejaron estancados durante este periodo, y del 55% para los lixiviados que se recargaban constantemente; mayor al 50% establecido como meta mínima.
- El lixiviado que se dejó fuera del invernadero simulando la laguna de retención pero bajo las mismas condiciones a las que se expuso el modelo experimental, redujo su volumen en un 33% durante los 20 días de la prueba.
- Al respecto del aumento en la concentración de algunos compuestos fisicoquímicos contenidos en los lixiviados, la hipótesis planteada en el presente trabajo se cumplió debido a que, en un periodo de 20 días en que terminó la prueba, los valores de turbiedad, sólidos, DQO, cloruros y sulfatos se incrementaron.
- Dentro el invernadero los lixiviados disminuyeron su volumen a mayor tasa que fuera de este.
- Para el caso estudio durante la temporada de invierno, la disminución de volumen de lixiviados con el uso del invernadero por 24 horas, puede ser hasta 46% mayor que la del lixiviado que se dejó afuera simulado la laguna de retención.
- Para el caso estudio durante la primavera, el uso del invernadero por un periodo de 20 días demostró ser más eficiente para la disminución de tirantes

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

de lixiviados, en un 58.0% para los lixiviados que se dejaron estancados durante este periodo, y 68.5% para los lixiviados que se recargaban constantemente, en comparación con los que se dejaron afuera simulando la laguna de retención.

5.1.1: Hallazgos relevantes

- El microclima interno del invernadero es altamente sensible a la entrada de aire y en general a las condiciones climáticas externas.
- Es posible brindarle al invernadero ventilación tal que provoque mayor turbulencia adentro que la que se presenta afuera.
- La función de cuerpo negro que juega la geomembrana, influye sensiblemente en la temperatura de fondo del líquido.
- El efecto de la pared de madera forrada de aluminio ubicada en la pared Norte de la estructura, provoca un aumento en las temperaturas superficiales de los líquidos, y por ende, en su evaporación.
- Una mayor temperatura ambiente interna del invernadero, no necesariamente se traduce en mayor evaporación; ya que si el aire se llega a saturar de humedad, se alcanza un estado estable en el que los procesos evaporación – condensación ocurren a la misma velocidad, para evitarlo es necesario proporcionar ventilación de entrada que desplace el aire húmedo y caliente, lo que ocasionará una baja de temperatura.
- Por otro lado, en los casos en los que se presenta condensación significativa, es decir humedad en paredes y gotas gruesas en techo, el proceso de condensación rebasa al de evaporación, lo que se traduce en mayor ganancia que pérdida de líquido; estado que se evita aumentando la ventilación, por lo que se concluye que la ventilación es una parte fundamental para el buen funcionamiento de la técnica.
- La condensación afecta significativamente el proceso de evaporación.
- Altos valores de punto de rocío y humedad relativa facilitarán la condensación a temperaturas relativamente bajas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Una vez que el microclima interno del invernadero logra proporcionar a los lixiviados el calor latente de vaporización, aunque el viento de entrada alcance a disminuir considerablemente la temperatura del microclima, gracias a la retención de calor del líquido, el descenso en su temperatura es mínima y el proceso de evaporación continúa.
- Desde temprana hora, los lixiviados exhiben mayor temperatura superficial que el agua.
- Se presume que la capacidad de absorción de calor de los lixiviados es mayor que la del agua, pero su retención de calor y la velocidad a la que éste se transfiere es menor.
- Se presume que el calor específico y el calor latente de vaporización del lixiviado son menores que para el agua.
- En temporada de primavera, los lixiviados que se generan en el relleno sanitario RESA S. A. de C. V. de la ciudad de Puebla, Puebla, disminuyeron en promedio 281% más rápido que el agua, bajo las mismas condiciones.
- La evaporación de lixiviados está estrechamente ligada a su temperatura superficial, sin excluir otros parámetros.
- Se presume que si se logra igualar las temperaturas media y superficial de los lixiviados, se promoverá el proceso de evaporación.
- La temperatura media de los lixiviados está estrechamente relacionada a su tirante: a menor tirante mayor temperatura media.
- La diferencia en la eficiencia de la disminución de tirantes entre los lixiviados que se dejaron estancados durante 20 días, y los que se recargaban frecuentemente, empieza a hacerse notar en el día 10, siendo significativa a partir del décimo quinto día, por lo que se concluye que la recarga de lixiviados no tiene influencia inmediata en la disminución de tirantes, pero sí tiene un impacto positivo en este parámetro posterior al día 15 de exposición de los lixiviados al uso de esta técnica.
- Durante los primeros días de exposición del lixiviado al uso de esta técnica, la presencia de nata depende de su ubicación dentro del invernadero, encontrándose un gradiente marcadamente favorecido hacia el Sureste de la

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

estructura; después de la segunda semana, aquellos que se dejaron estancados presentaron nata gruesa y los que se recargaban constantemente presentaron burbujas. Es probable que sea esta la razón por la que la eficiencia en la disminución de tirantes de lixiviados estancados descendió en el último periodo de la prueba.

- Antes de la aparición de burbujas y nata en la superficie de los lixiviados, la disminución de tirantes es consecuencia del clima, y no del tiempo de exposición de los líquidos para su minimización, por lo que se presume que evitar la presencia de burbujas y nata favorecerá sensiblemente a la eficiencia de esta técnica.
- En el día 19 se observó en las paredes de los recipientes que contenían los lixiviados, que los líquidos tomaron un color rojizo.
- Con el uso del invernadero se reducen los impactos que, factores como lluvia y polvo, pudieran generar sobre los lixiviados.
- De manera general, la concentración de los parámetros fisicoquímicos que se monitorearon ascendió en el transcurso de la prueba.
- Al final de la prueba, los únicos parámetros monitoreados que disminuyeron su concentración fueron la alcalinidad debida a bicarbonatos y fosfatos.
- Se refuta la viabilidad de que alguno de los compuestos que se monitorearon haya escapado a la atmósfera.
- Los lixiviados que se generan en el relleno sanitario RESA de la ciudad de Puebla son ricos en sales menores a 2 micrómetros, y se presume que estas sales se encuentran en constante reacción de doble sustitución entre ellas, lo que genera disociaciones que contribuyen a los valores de su conductividad.
- Los lixiviados que se generan en el relleno sanitario RESA de la ciudad de Puebla presentan un alto contenido de materia orgánica.
- Se presume que con el uso del invernadero en el transcurso de los días, se desarrollan consorcios microbianos en los lixiviados.

5.2 Recomendaciones

A continuación se presentan algunas recomendaciones para continuar con la línea de investigación que el presente trabajo sugiere, así como aspectos de importancia a la hora de diseñar un invernadero para aplicar la técnica propuesta.

- Cada sitio exhibe condiciones climáticas distintas. Aunque para el caso estudio la ventilación óptima se encontró de 1.27 y 52.86 % del área de la base para el día y para la noche respectivamente, con la mayor entrada de aire nocturno por los extremos Este y Sur; será necesario correlacionar datos climáticos específicos del sitio y su ubicación, a la hora de diseñar un invernadero para evaporación.
- Se recomienda que los materiales para la construcción del invernadero sean duraderos: la estructura de acero inoxidable para evitar corrosión; techo y paredes Este, Sur y Oeste de vidrio transparente, cuya transmitancia es mayor que la del plástico además de ser más fácil de limpiar; pared Norte de material aislante térmico y espejo en su parte interna, que disminuirán la salida de calor por este extremo y proporcionarán mejor reflejo que el aluminio; sistema de fácil manipulación de ventilas para el cambio de ventilación en los diferentes periodos del día.
- En la presente investigación, la mayor eficiencia en la evaporación dentro del invernadero se encontró del lado Noroeste, en tanto que el Sureste presentó dificultades para el proceso de ebullición; mientras que en las pruebas preliminares, que se llevaron a cabo sin el uso de la pared de aluminio, la mayor evaporación ocurrió en extremo Sur, por lo que se determina que la pared de aluminio no se colocó con la inclinación adecuada o no cumplía con las dimensiones necesarias para que reflejara la luz sobre toda la base del invernadero. Se recomienda calcular estos parámetros de diseño para lograr eficiencia en la evaporación de toda el área del invernadero y no sólo en las zonas cercanas a este aditamento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El recipiente que contenga los lixiviados deberá ser ligeramente más alto a su tirante para evitar que obstaculice el paso del aire. Se deja la línea abierta a la determinación de la altura óptima del líquido bajo estas condiciones.
- Es probable que el proceso en general mejore con agitación lenta, ya que se unificaría la temperatura, lo cual ayudaría al proceso de evaporación, además de que se evitaría la formación de nata en la superficie.
- En virtud de que el lixiviado externo logró mayor disminución de tirante cuando su temperatura media igualó a la de su superficie, y que los casos de mayor temperatura media se registraron para los tirantes más bajos; se recomienda el uso de tirantes menores a 300 mm, y se deja la línea abierta a la investigación del tirante ideal en que, con el uso de geomembrana fungiendo como cuerpo negro, la temperatura de fondo contribuya al aumento de la temperatura media para igualar a la temperatura superficial.
- El análisis climatológico integrado ayudará a la operación de esta tecnología. Cuando el día se presente con alta temperatura de rocío, alta humedad relativa, poco viento y/o alta temperatura, se recomienda proporcionar ventilación extra a la de diseño, con el propósito de evitar la condensación.
- Cuando haya condensación, es preferible retirar la humedad de paredes y techo para evitar que se regrese.
- Se deja la línea abierta a la investigación para determinar lo siguiente
 - Lo que origina el cambio de color de los lixiviados.
 - La viabilidad de brindar la ventilación nocturna al periodo vespertino con la intención de optimizar el proceso de reducción de tirantes en este lapso.
 - El recambio de aire necesario para la evaporación óptima dentro del invernadero y las temperaturas de fondo, con equipos de medición apropiados.
 - El comportamiento de las temperaturas después de las 16:30 horas.
 - La caracterización completa del efluente del invernadero.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el caso estudio, se recomienda la aplicación de la técnica propuesta en el presente trabajo, como etapa intermedia entre el tren de filtrado y la plata tratadora, ya que se presume que con el efluente del invernadero para evaporación, al ser de menor volumen y ostentar mayores concentraciones de contaminantes, se logrará mayor eficiencia en las operaciones unitarias subsecuentes, disminuirá los costos de operación y facilitará el manejo de los lixiviados.

REFERENCIAS

- Arley, L., & Palacio, J. (2006). *Evaluación del sistema alternativo de evaporación forzada de lixiviados para el relleno sanitario "Don Juanito" de Villavicencio, Meta. Facultad de ingeniería ambiental y sanitaria, Universidad de La Salle. Bogotá D. C.*
- Bódalo, A., Hidalgo, A., Gómez, M., Murcia, M., & Marín, V. (2007). Tratamiento de residuos. Tecnologías de tratamiento de lixiviados de vertedero (I). Tratamientos convencionales. *Ingeniería Química (451)*, 142 - 149.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGRAW-HILL.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Servicio Meteorológico Nacional. Glosario Meteorológico*. Obtenido de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=154:v&catid=13
- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Servicio Meteorológico Nacional. Normales Climatológicas. Estación 21163 El Batán. (1971 - 2000)*. Puebla, Pue.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Servicio Meteorológico Nacional. Normales Climatológicas. Estación 21163 El Batán. (1981 - 2010)*. Puebla, Pue.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Servicio Meteorológico Nacional. Observatorio Sinóptico. Normales Climatológicas. (1981 - 2000)*. Puebla, Pue.
- Contreras, J. (2006). *Uso de electrocoagulación para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Tesis para optar a título de ingeniero ambiental. Facultad de ingeniería, ciencias y administración, Universidad de la Frontera. Chile.*
- Contreras, J., Teutli, M., Villarroel, M., & Navia, R. (2009). Treating landfill leachate by electrocoagulation. *Waste Management & Research, ISSN 0734-242X(2009: 27: 534-541)*, 534-541.

REFERENCIAS

- Corena, M. (2008). *Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios. Tesis para optar a título de ingeniero civil. Facultad de Ingeniería, Univeridad de Sucre. Sincelejo.*
- Eastern Research Group, Inc. y Carbon Trade, Ltd. (2007). *Estudio de Prefactibilidad del Potencial del Biogás, Relleno Las Iguanas.* Guayaquil, Ecuador.
- Estudios y técnicas especializadas en ingeniería S. A. de C. V. (2007). *Generación y control de lixiviados. Proyecto Ejecutivo de las Estaciones de Transferencia de Residuos Sólidos y del Relleno Sanitario Regional de Frontera Chica, Tamaulipas. (pp 8-1 - 8-11).* Tamaulipas, México.
- Fenn, D., Hanley, K., & Degeare, T. (1975). *Use of water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites.* Cincinnati, Ohio: U. S. Environmental Protection Agency.
- Fornieles, J. (2011). Tratamiento de Lixiviados. *Seminario Nacional de Limpieza Pública, SENALIMP.*
- García-Badell, J. (2003). *Cálculo de la energía solar.* Madrid: Bellisco, Ediciones técnicas y científicas. I. S. B. N. 84-95279-72-X.
- Giraldo, E. (2010). Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.*, 44 - 55.
- Gobierno de Chile. (2005). *Servicio de Evaluación Ambiental, SEA.* Recuperado el 2013, de <http://www.sea.gob.cl/>
- Perry, R., Green, D., & Maloney, J. (1992). Perry. Manual del Ingeniero Químico. En *Tomo 1* (págs. 11-34:11-48). México, Buenos Aires, Caracas, Guatemala, Lisboa, Madrid, Nueva York, San Juan, Santafé de Bogotá, Santiago, Sao Paulo, Auckland, Londres, Milán, Montreal, Nueva Delhi, San Francisco, Singapur, St. Louis, Sidney, Toronto: McGraw-Hill.

REFERENCIAS

- Ramadan, H., & Ponce, V. (16 de Oct de 2009). *Design and Performance of Waste Stabilization Ponds*. Obtenido de <http://stabilizationponds.sdsu.edu/>
- Ramos, R., & Aguilar, A. (2005). Modelación del comportamiento de las isotermas, isoyetas y cálculo de la radiación solar para el estado de Puebla durante el mes de junio del 2004. *Elementos*, (57)(59 - 62), pp. 59-62.
- Romero, P., Choi, C., & López, I. (2010). Mejora de las tasas de ventilación de invernaderos bajo condiciones climáticas del centro de México. *Agrociencia*, (44)(44: 1-15), 1-15.
- Salazar, L., & Saavedra, I. (2009). Tratamiento de lixiviados, casos prácticos en diferentes temperaturas. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Barranquilla.
- Savage, G., Díaz, L., Golueke, C., Martone, D., & Ham, R. (1998). *Guidance for Landfilling Waste in Economically Developing Countries*. Dinamarca: ISWA and CalRecovery Inc. ISBN No. 87-90402-07-3.
- Secretaría de sustentabilidad ambiental y ordenamiento territorial. Dirección de calidad del aire y cambio climático. (2012). *Programa de gestión de calidad del aire 2012-2020 del estado de Puebla*. Puebla, México.: Gobierno del estado de Puebla.
- SEMARNAT. (2004). NOM-083-SEMARNAT-2003. *Diario Oficial de la Federación*.
- SEMARNAT. (2015). *Sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos (Número)*. Recuperado el 13 de octubre de 2013, de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RS M01_11&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- Shaw, W., Brosdal, J., & Echeandia, S. (2011). Tratamiento de aguas residuales. Estrategias para minimizar el vertido de aguas residuales. Procesos de vertido líquido cero. *Ingeniería Química* (495)(495), 76-84.

REFERENCIAS

- Szantó, M., Piraino, E., & Arancibia, C. (2011). Criterios para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios mediante evaporación por radiación solar. *4SIIR*, (ISBN 978-607-607-015-4), pp. 598-601.
- Vicente, D. (2013). *Optimización del proceso de evaporación de lixiviados en el relleno sanitario Santiago Poniente. Tesis para optar a título de ingeniero civil. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile. Santiago de Chile.*
- Weather underground. (2015). Obtenido de www.wunderground.com

ANEXOS

Anexo 1: Información complementaria de la experimentación

Prueba 2

Todo el tiempo, incluso cuando el invernadero se encontraba abierto, la temperatura interna fue mayor a la externa, sin embargo, no se puede considerar que la diferencia entre ellas sea proporcional, o al menos no de forma directa, ya que al analizar el comportamiento de la temperatura de las corridas por separado, llama la atención en la tercera corrida, la temperatura interna llegó a 39°C; mientras que en la primera alcanzó sólo 34°C; cuando la temperatura externa estaba en 21°C para ambos casos.

Por otro lado, a pesar de que la temperatura interna del invernadero para la tercera corrida fue mayor que para la primera por 5°C, la temperatura máxima superficial alcanzada por los lixiviados es muy similar para ambas corridas, favoreciendo ligeramente a la primera entre 0.5 y 2 °C; asimismo, las máximas temperaturas medias de la corrida 1 se encuentran por encima de las de la tercera entre 1 y 6 °C; es decir, que aunque la temperatura interna fue mayor en la corrida 3, las temperaturas máximas tanto superficiales como medias que alcanzaron los líquidos fueron menores.

En las Figuras A.1 y A.2 se muestran las temperaturas máximas, tanto ambiente externa e interna del invernadero, como de la superficie y de la parte media de los líquidos, en relación con la disminución de sus tirantes, para las corridas 1 y 3 de esta prueba; y para la comparación de estos parámetros los valores se presentan escalados. En estas gráficas se hace evidente que, aunque la temperatura ambiente externa fue la misma para ambas corridas, la interna del invernadero fue menor en la corrida 1, no obstante, las temperaturas de los líquidos tanto superficiales como medias, y su evaporación, fueron mayores para esta misma.

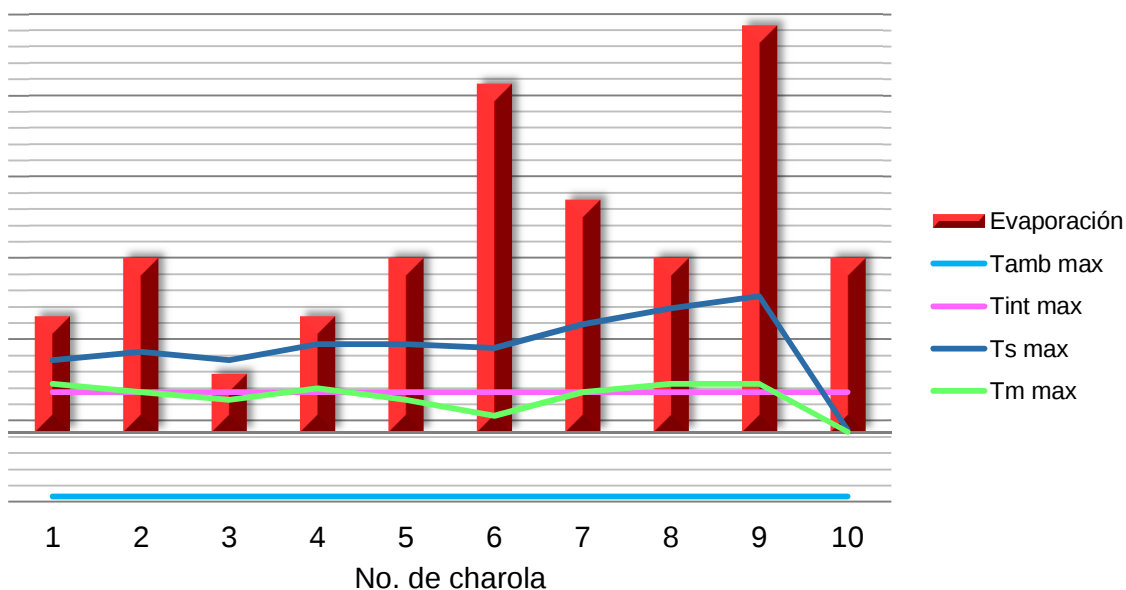


Figura A.1: Temperaturas máximas vs evaporación de lixiviados, corrida 1. Prueba 2

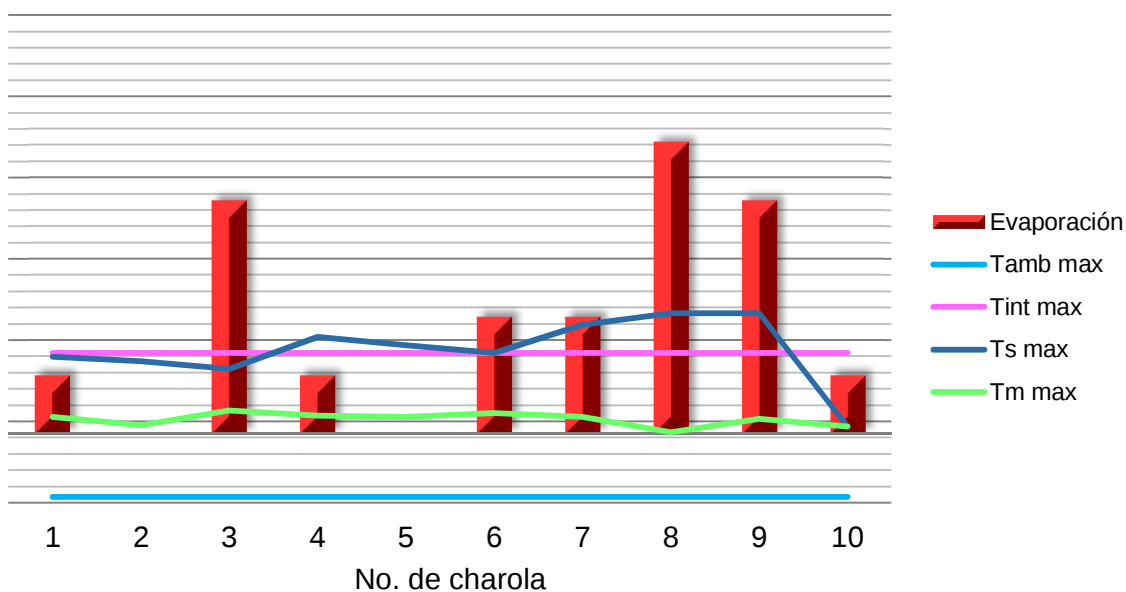


Figura A.2: Temperaturas máximas vs evaporación de lixiviados, corrida 3. Prueba 2

Es importante mencionar que en la corrida 3, alrededor del mediodía se presentó condensación en techo interno del invernadero, y que además destacó el lapso de la mañana como el de mayor evaporación, ya que posterior a las 13:00 horas la

disminución de tirantes fue despreciable, por lo que se infiere que la condensación sí afectó significativamente el proceso de ebullición, llegando a un estado estable en el que los procesos evaporación – condensación ocurrieron simultáneamente.

Para plantear suposiciones al respecto de porqué condensó en la tercera corrida y no en la primera, si ambas fueron expuestas a la misma temperatura ambiente externa, además de sometidas a las mismas condiciones para el recambio de aire que se utilizó en pruebas en que la temperatura interna alcanzó 47°C sin llegar a la condensación, es necesario recurrir a registros climáticos externos pero cercanos al sitio de experimentación. En la Tabla A.1 se presentan datos que arroja la estación meteorológica RAMM 12 de la página web wunderground.com para los días en que se llevaron a cabo las corridas 1 y 3, ubicada en la ciudad de Puebla con coordenadas geográficas latitud Norte 19° 04' y longitud Oeste 98° 20', a 2,150 m.s.n.m., localizada a 8.9 km del relleno sanitario; con los que se hace evidente que para la tercera corrida en el transcurso de la mañana, tanto el punto de rocío como la humedad relativa fueron superiores que para la primera, situación que se invierte a partir de las 14:45 horas; por lo que se presume que fueron estas condiciones las que provocaron la condensación dentro del invernadero, a pesar de que en su microclima predominaba una temperatura relativamente baja.

Tabla A.1: Datos meteorológicos

Hora	Corrida 1		Corrida 3	
	Punto de rocío (°C)	Humedad relativa (%)	Punto de rocío (°C)	Humedad relativa (%)
09:45	5	55	7	72
11:45	4	37	9	56
13:45	5	35	8	46
14:45	7	38	4	19
15:45	8	43	5	37
16:45	7	43	4	37

Fuente: (Weather underground, 2015)

Prueba 3

Tabla A.2: Observaciones durante la prueba

Día	Observaciones
3	En los lixiviados internos empieza a haber presencia de nata en su superficie, con gradiente marcadamente favorecido hacia el Sureste de la estructura.
4	• Los lixiviados internos ubicados al Sur tienen nata gruesa, los de en medio tienen burbujas sin nata y los del Norte no tienen nada. • Día de recarga.
5	• En la mañana los lixiviados internos tienen nata dura, tostada y partida; para la tarde sólo hay nata muy delgada en E1, R1 y R2. • Hubo condensación al mediodía dentro del invernadero.
9	Día de recarga.
10	Aproximadamente a las 15:00 horas da inicio el periodo de lluvias en el sitio de experimentación, abriendo con un evento de precipitación pluvial muy fuerte que continuó toda la tarde y gran parte de la noche cuando el invernadero ya se encontraba abierto.
11	Desapareció la nata en los lixiviados cercanos a las ventanas grandes.
15	Día de recarga.
18	• En la mañana: lixiviados estancados con nata; R1 con nata gruesa; R2 con nata delgada y; R3 con nata delgada y coágulos adheridos a las paredes de los recipientes; los líquidos externos tienen polvo en su superficie. • A las 17:00 horas: lixiviados estancados con nata gruesa y los de recarga con burbujas.
19	En las paredes de los recipientes de lixiviados internos se aprecia cambio de color a rojo transparente; en los de lixiviados estancados de la base a la superficie, y en los de recarga en partes cercanas a la superficie.

De acuerdo a la Figura 4.20, en el día 5 hubo un descenso considerable en la disminución de tirantes de lixiviado dentro del invernadero, al contrario de los que se dejaron afuera, siendo éste el único día en que los externos redujeron su volumen más que los internos. Según la Tabla A.2, en este día ocurrieron 2 eventos: 1) el lixiviado interno presentó nata dura y tostada en su superficie, y 2) condensación dentro la estructura. Por un lado, es probable que las moléculas de vapor que

trataban de escapar de los líquidos, fueron incapaces de romper la nata de la superficie, quedando inmersas en esta fase y evitando así la disminución del tirante; sin embargo, de ser así no habría llegado a condensar, ya que para que esta condición se presente se requiere de cantidades relativamente altas de humedad en el microclima del invernadero, así como de ventilación insuficiente para desplazarla; por lo que se determina que el principal factor que influyó en el descenso de la reducción del líquido no fue su nata superficial sino la condensación, que a su vez es consecuencia de ventilación insuficiente. Es importante señalar que aunque en la sección de resultados de esta prueba sólo se presenta la disminución diaria de tirantes, las lecturas se tomaron a las 8:30, 12:30 y 16:30 horas, y que los datos que se obtuvieron de este día para los lixiviados internos, revelan que durante la mañana se lograron valores de evaporación por encima de los días anteriores, y fue cerca del mediodía cuando se detectó la presencia de humedad en techo interno, y posteriormente también en paredes y gotas gruesas caían del techo; para el final del día, todas las charolas internas ganaron un poco del líquido que habían perdido en el transcurso de la mañana, lo que indica que la tasa de condensación puede llegar a rebasar a la de evaporación, resultando en ganancia de líquido.

El día 10 de esta prueba, aproximadamente a las 15:00 horas, comenzó la temporada de lluvias en el sitio de experimentación, abriendo con un evento muy fuerte de precipitación pluvial que duró hasta gran parte de la noche cuando el invernadero ya se encontraba abierto, y es probable que haya caído agua en las charolas R1, E1, R2, y E3, ubicadas cerca de las ventanas grandes del Sur y del Este, ya que al día siguiente desapareció la nata en estas bandejas.

Se puede considerar que en los primeros días, la aparición de nata, coágulos, burbujas y/o huevecillos en la superficie de los lixiviados, dependió de su ubicación dentro del invernadero, encontrándose mayor cantidad en las charolas ubicadas al Sureste, y disminuyendo hacia el Noroeste de la estructura. Después de la segunda semana de exposición de los líquidos a esta técnica, tuvo mayor influencia en la presencia de los mencionados, si la charola había sido recargada con lixiviado nuevo o si se había dejado estancado. En las Figuras A.3 y A.4, se evidencian estas

observaciones, y de la A.5 a la A.7 se aprecia el color rojizo transparento en las paredes de los recipientes que contenían los líquidos en estudio: de la base a la superficie en las palanganas de lixiviados estancados, y cerca de la superficie en los de recarga.



Figura A.3: Nata en la superficie de E1, día 18



Figura A.4: Burbujas en la superficie de R2, día 18



Figura A.5: E2, día 19



Figura A.6: R3, día 19



Figura A.7: R2 (izquierda) y E3 (derecha), día 19

No se encontró relación directa entre la presencia de nata, burbujas y huevecillos con el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos que se monitorearon; pero sí se considera probable que el descenso en los valores de la disminución de tirantes en los últimos días de la prueba, sea consecuencia de la aparición de estas especies

Por último, es notorio que durante la primavera, a diferencia de los resultados que arrojaron las primeras pruebas, las temperaturas superficiales y medias de los lixiviados no lograron alcanzar en ningún momento del día a la temperatura interna del invernadero. Asimismo, comparando las temperaturas máximas en esta prueba con las de la prueba 2, se puede determinar que en primavera, la temperatura media es más cercana a la superficial, y que sin el uso del invernadero las temperaturas de ambas secciones del líquido consiguen igualarse, condición que probablemente favorezca a la evaporación, como se discutió en el apartado 4.2.3. En la Figura A.8 se muestran las temperaturas máximas promedio alcanzadas en esta prueba, tanto por el ambiente externo e interno del invernadero, como por los líquidos en estudio contenidos en cada una de las charolas, y para la facilidad en su comparación con

las Figuras A.1 y A.2, los valores se presentan adimensionales a la misma escala que las gráficas anteriores.

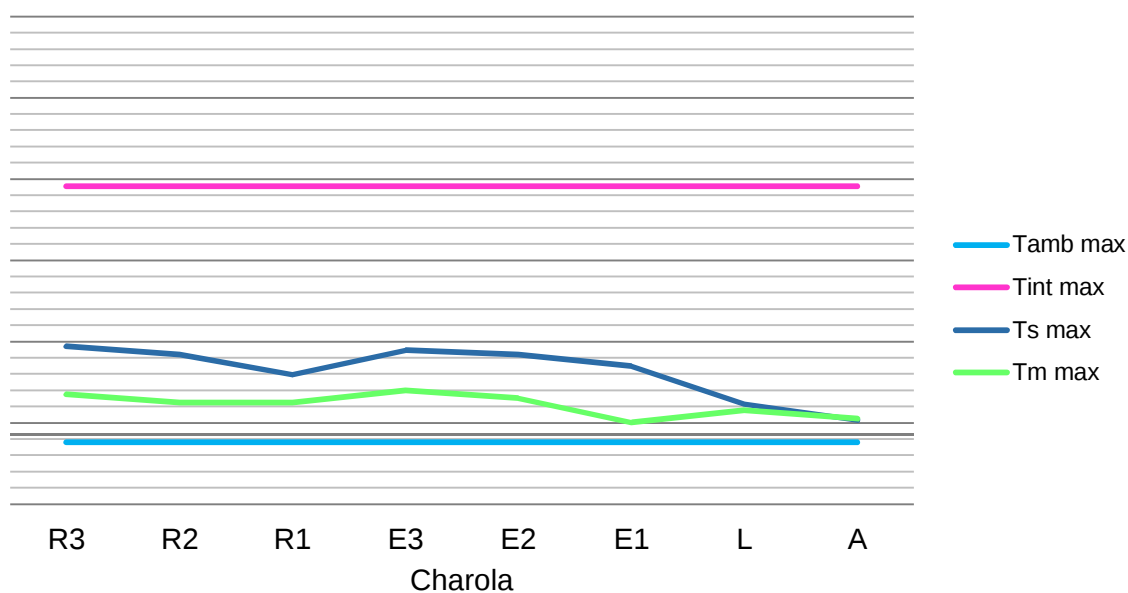


Figura A.8: Temperaturas máximas promedio. Prueba 3

Anexo 2: Información complementaria del caso estudio

En la Tabla A.3 se exponen los resultados que arrojaron los cálculos del balance hídrico de generación de lixiviados para el caso estudio, de acuerdo a las bases teóricas que se presentaron en el apartado 3.3; de la que se determina que, en teoría, la empresa Rellenos Sanitarios RESA, S.A. de C.V., en Puebla, Puebla, genera $26,374 \text{ m}^3$ de lixiviados anualmente, que equivalen a 72.26 m^3 diarios; cantidad muy cercana al dato empírico reportado de 75 m^3 al día, en promedio (datos al 2013).

Tabla A.3: Balance hídrico de generación de lixiviados. Caso estudio

Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
T (°C)	13.31	14.71	16.99	18.97	19.74	19.25	18.17	18.53	18.23	17.14	15.42	14.06	
I	4.40	5.12	6.37	7.53	8.00	7.70	7.05	7.27	7.09	6.46	5.50	4.78	77.28
a	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	
PE (mm)	4.09	4.87	6.24	7.55	8.09	7.75	7.01	7.25	7.05	6.34	5.28	4.50	
Ajuste	0.92	0.96	1.00	1.05	1.09	1.11	1.10	1.07	1.02	0.98	0.93	0.91	
PET (mm)	3.77	4.67	6.24	7.93	8.82	8.60	7.71	7.76	7.19	6.21	4.91	4.10	
P (mm)	5.10	7.20	12.80	25.80	99.40	190.10	126.00	160.70	152.60	81.40	7.80	3.30	872.20
C (R/O)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	
R/O (mm)	1.79	2.52	4.48	9.03	34.79	66.54	44.10	56.25	53.41	28.49	2.73	1.16	305.27
I (mm)	3.32	4.68	8.32	16.77	64.61	123.57	81.90	104.46	99.19	52.91	5.07	2.15	566.93
I-PET (mm)	-0.45	0.01	2.08	8.84	55.79	114.96	74.19	96.69	92.00	46.70	0.16	-1.95	489.01
$\Sigma(I-PET)$ (mm)	-2.40										0	-1.95	
ST (mm)	147.00	147.01	149.08	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	148.00	
ΔST (m)	-1.00	0.01	2.08	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.00	
AET (mm)	4.32	4.67	6.24	7.93	8.82	8.60	7.71	7.76	7.19	6.21	4.91	4.15	79.00

Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
I-AET (mm)	-1.00	0.01	2.08	8.84	55.79	114.96	74.19	96.69	92.00	46.70	0.16	-2.00	
PERC (mm)	0.00	0.00	0.00	7.92	55.79	114.96	74.19	96.69	92.00	46.70	0.16	0.00	488.41
A (m²)	54,000	54,000	54,000	54,000	54,000	54,000	54,000	54,000	54,000	54,000	54,000	54,000	
Lixiviados (m³)	0	0	0	428	3,013	6,208	4,006	5,221	4,968	2,522	9	0	26,374

T: Temperatura media mensual

i: Índice de calor mensual

a: Coeficiente en función de la suma de los índices de calor mensual

PE: Evapotranspiración potencial

Ajuste: Coeficiente de corrección de radiación solar debido a la latitud

PET: Evapotranspiración

P: Precipitación

C(R/O): Coeficiente de escurrimiento

I: Infiltración

ST: Capacidad de almacenamiento de humedad

AET: Evapotranspiración actual

PERC: Percolación

A: Área

Lixiviados: Volumen de generación de lixiviados

Fuente: Elaborado por el autor

Anexo 3: Humedad retenida por el suelo después de diferentes cantidades de evapotranspiración potencial

Tabla A.4: Tabla para suelos con máxima capacidad de almacenamiento de humedad de 150 mm

$\Sigma \text{Neg}(\text{I-PET})$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Agua retenida en el suelo										
0	150	149	148	147	146	145	144	143	142	141
10	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131
20	131	130	129	128	127	127	126	125	124	123
30	122	122	121	120	119	118	117	115	115	114
40	114	113	113	112	111	111	110	109	108	107
50	107	106	106	105	104	103	103	102	101	100
60	100	99	98	97	97	97	96	95	94	93
70	93	92	92	91	90	90	89	89	88	87
80	87	86	86	85	84	84	84	83	83	82
90	82	81	81	80	79	79	78	77	77	76
100	76	75	75	75	74	74	73	72	72	71
110	71	71	70	70	69	69	68	68	67	67
120	66	66	66	65	65	64	64	63	63	62
130	62	62	61	61	60	60	60	59	59	58
140	58	58	57	57	56	56	55	55	54	54
150	54	53	53	53	52	52	52	52	51	51
160	51	51	50	50	50	49	49	48	48	47
170	47	47	47	46	46	46	45	45	45	44
180	44	44	44	43	43	43	42	42	42	41
190	41	41	41	40	40	40	40	39	39	39
200	39	38	38	38	37	37	37	37	36	36
210	36	36	35	35	35	35	35	34	34	34
220	34	34	33	33	33	33	33	32	32	32
230	32	31	31	31	31	31	30	30	30	30
240	30	29	29	29	29	29	28	28	28	28

$\Sigma \text{Neg}(I-\text{PET})$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Agua retenida en el suelo										
250	28	27	27	27	27	27	26	26	26	26
260	26	26	25	25	25	25	25	24	24	24
270	24	24	24	23	23	23	23	23	23	23
280	22	22	22	22	22	22	22	22	21	21
290	21	21	21	20	20	20	20	20	20	20
300	20	19	19	19	19	19	19	19	18	18
310	18	18	18	18	18	18	18	17	17	17
320	17	17	17	17	17	17	17	16	16	16
330	16	16	16	16	16	16	16	15	15	15
340	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14
350	14	14	14	14	14	14	14	13	13	13
360	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12
370	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11
380	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
390	11	11	11	10	10	10	10	10	10	10
400	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9
410	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
420	9	9	9	8	8	8	8	8	8	8
430	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
440	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7

I: Infiltración

PET: Evapotranspiración

Fuente: (Fenn *et al.* 1975)