



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TESIS**

**“TOXICIDAD DE LIXIVIADOS TRATADOS  
MEDIANTE DESTILACIÓN SOLAR  
UTILIZANDO SEMILLAS DE *LACTUCA  
SATIVA L.*”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTA**

**IBETH ANAHÍ MORALES VÁZQUEZ**

**DIRECTOR**

**DR. CARLOS MANUEL GARCÍA LARA**

**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

**Agosto de 2021**

## ÍNDICE

RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
AGRADECIMIENTOS .....	9
CAPÍTULO I .....	10
1. INTRODUCCIÓN .....	11
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
2.2 Volumen de generación .....	14
2.3 Ausencia de tratamiento. ....	14
3. MARCO TEÓRICO.....	16
3.1 Lixiviados. Producción y características. ....	16
3.2. Alternativas de tratamiento. ....	17
3.2.1 Tratamiento por transferencia.....	17
3.2.1.1. Tratamiento combinado con aguas residuales domésticas. ....	17
3.2.1.2. Recirculación. ....	18
3.2.2. Procesos biológicos.....	18
3.2.2.1. Aerobios.....	18
3.2.2.2. Anaerobios.....	19
3.2.3 Procesos fisicoquímicos. ....	20
3.2.4. Sistemas de membranas. ....	21
3.2.4.1. Microfiltración.....	21
3.2.4.2. Ultrafiltración.....	21
3.2.4.3. Nanofiltración.....	22
3.2.4.4. Osmosis inversa. ....	22
3.3 Panorama estatal.....	22
3.3.1.1. Captación de energía solar.....	23
3.3.1.2. Evaporación del agua .....	24
3.3.1.3. Condensación del vapor .....	24
3.3.1.4. Eficiencia térmica y productividad.....	25
3.3.1.5. Eficiencia de remoción.....	25
3.3.1.6. Bioensayos de toxicidad. ....	25
CAPÍTULO II .....	28

1. JUSTIFICACIÓN.....	29
2. OBJETIVOS.....	31
3. HIPÓTESIS.....	31
4. METODOLOGÍA.....	31
4.1 Recolección de muestra.....	31
4.2. Destilación de la muestra.....	32
4.3. Desarrollo de los bioensayos.....	33
4.4. Diseño experimental.....	35
4.5. Análisis de variables respuesta.....	38
4.6. Determinación de color.....	40
4.6.1. Escala APHA (American Public Health Association) o Pt/Co.....	40
4.6.2. Sistemas de Color CIE.....	40
4.6.2.1. Cálculo de las coordenadas a partir de $R(\lambda)$ .....	41
4.6.2.2. Coordenadas de cromaticidad (x, y) a partir de los valores triestímulo.....	43
4.6.2.3. Diferencias de Color.....	44
4.7. pH.....	47
5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
5.1 Productividad del destilador.....	47
5.2 Bioensayos de toxicidad.....	48
5.3 Color.....	56
5.4 pH.....	61
CAPÍTULO III.....	62
1. CONCLUSIONES.....	63
2. PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES.....	63
3. ANEXOS.....	65
4. REFERENCIAS.....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores típicos esperados en lixiviados de diferentes edades.	17
Tabla 2. Temperaturas y tiempo de germinación de especies hortícolas recomendadas para bioensayos de toxicidad por la USEPA.	34
Tabla 3. Valores de las variables respuesta obtenidos para cada muestra	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama simplificado de un destilador de tipo caseta.	23
Figura 2. Estructura de cada una de los ensayos realizados.	37
Figura 3. Esquema general del desarrollo del bioensayo.	37
Figura 4. Espacio de color CIE L* a* b*	41
Figura 5. Curva espectral de una muestra medida	42
Figura 6. Luz de día iluminante estándar (D65/10°)	42
Figura 7. Curvas del observador estándar CIE 2° y 10°	42
Figura 8. Representación esquemática del paso de reflectancias a valores triestimulares.	43
Figura 9. Diagrama de cromaticidad CIE para coordenadas (x, y).	44
Figura 10. Diferencia de color L a* b* en dos manzanas.	45
Figura 11. Radiación global directa en Ocozocoautla de Espinosa, según GLOBAL SOLAR ATLAS	47
Figura 12. Promedio de temperatura anual alcanzado en Ocozocoautla de Espinosa, según GLOBAL SOLAR ATLAS.	48
Figura 13. Colores de las muestras obtenidas en nixsensor.com mediante las coordenadas La*b* generadas.	58

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Celdas 1 y 2 del relleno sanitario de Ocozocoautla	32
Imagen 2. Laguna de lixiviados del relleno sanitario de Ocozocoautla	32
Imagen 3. Destilador casero donde se observa la condensación del lixiviado.	33
Imagen 4. Ensayo preliminar con dos variedades de lechuga en diferentes medios de soporte.	34
Imagen 5. Semillas de lechuga germinadas sobre algodón y papel filtro.	35
Imagen 6. Desarrollo de los bioensayos, donde se muestran los tres tratamientos probados.	36
Imagen 7. Arreglo para generar la curva espectral de cada muestra	46
Imagen 8. Interfaz del software Ocean Optics SpectraSuite	46
Imagen 9. Muestras de lixiviado crudo, una destilación y dos destilaciones.	57
Imagen 10. Muestras analizadas mediante espectrofotometría, de izquierda a derecha Lixiviado crudo, destilado dos más abono, destilado 1 y destilado 2.	59
Imagen 11. Medición de pH de muestras con tiras reactivas.	61

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Promedio de elongación de radícula e hipocótilo en muestras y control positivo y negativo (diferentes letras indican diferencias significativas).	48
Gráfica 2. Número de semillas germinadas en control y muestra con una destilación y elongación de radícula.	49
Gráfica 3. Longitud de hipocótilo en control y muestra con una destilación.	49
Gráfica 4. Número de semillas germinadas en control y muestra con dos destilaciones y elongación de radícula.	50
Gráfica 5. Longitud de hipocótilo en control y muestra con doble destilación.	50
Gráfica 6. Número de semillas germinadas en control y muestra con doble destilación más abono y elongación de radícula.	51
Gráfica 7. Longitud de hipocótilo en control y muestra con doble destilación.	52
Gráfica 8. GRS, CRR e IG para las muestras tratadas.	54
Gráfica 9. Porcentaje del Índice de Germinación Residual Normalizado para cada muestra tratada.	55
Gráfica 10. Índice de Elongación Radical Normalizado	56
Gráfica 11. Ubicación del color de las muestras analizadas mediante el sistema CIE 1931.	57
Gráfica 12. Ubicación del color de las muestras en CIE Lab en tres dimensiones	59
Gráfica 13. Diferencia total de color (Delta E) respecto a Lx crudo	60

## RESUMEN

Los lixiviados generados en los sitios de disposición final de las ciudades son líquidos que percolan a través de los residuos recogiendo toda característica contaminante contenida en ellos; desde hace tiempo su tratamiento ha sido un reto debido principalmente a su composición.

En la presente investigación se analizó la eficiencia de la destilación solar individual y en serie, como método de tratamiento de una muestra de lixiviado obtenida del relleno sanitario de la ciudad de Ocozocoautla de Espinosa clasificado por su edad como intermedio, a través de la determinación de dos índices de toxicidad representativos sobre semillas de la especie *Lactuca sativa* y la determinación de color por método espectrofotométrico, tanto a la entrada como a la salida del sistema.

Los resultados indican que el sistema no disminuyó la toxicidad del lixiviado a un valor aceptable para *Lactuca sativa*, sin embargo, se obtuvieron eficiencias altas en remoción de color, así mismo, el nivel de pH fue reducido, obteniendo un agua clara y neutra en el efluente.

Palabras claves: Lixiviados, Destilación solar, Tratamiento de lixiviados, Bioensayo de toxicidad.

## ABSTRACT

The leachates generated in the final disposal sites of the cities are liquids that percolate through the waste, collecting all contaminating characteristics contained in them; its treatment has long been a challenge mainly due to its composition.

In the present investigation, the efficiency of individual and serial solar distillation was analyzed as a method of treating a leachate sample obtained from the sanitary landfill of the city of Ocozocoautla de Espinosa classified by its age as intermediate, through the determination of two representative toxicity indices on seeds of the *Lactuca sativa* species and the determination of color by spectrophotometric method, both at the entrance and at the exit of the system.

The results indicate that the system did not reduce the toxicity of the leachate to an acceptable value for *Lactuca sativa*, however, high efficiencies were obtained in color removal, likewise, the pH level was reduced, obtaining a clear and neutral water in the effluent.

Keywords: Leachate, Solar distillation, Leachate treatment, Toxicity bioassay.



## AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por la vida, salud, fortaleza y capacidad.

A mis Padres

Neyla Ibeth Vázquez Tovilla y George Morales Ciprianes

Las metas alcanzadas y lo que soy, reflejan la dedicación, apoyo y amor con los que me han formado. Gracias por ser mi motor y enseñarme que alcanzar lo que vale la pena, requiere sacrificios y trabajo duro.

A mi querida Universidad y a todo el personal docente

Quienes mediante la transmisión de sus conocimientos me han dado las pautas para mi formación, de entre ellos principalmente al Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar y al Dr. Carlos Manuel García Lara, por haberme guiado a lo largo de la carrera universitaria y por transmitir sus conocimientos con una sencillez que manifiesta el arte de la enseñanza; de manera muy especial al Dr. Carlos Manuel García Lara por su inmensa paciencia y apoyo durante el desarrollo de esta investigación, los docentes son un pilar fundamental para nuestro aprendizaje y usted ha logrado ser más que eso.

Así mismo al personal administrativo, principalmente a Heidy Selene Montejo Bautista, que, con su actuar, refleja el significado de calidad profesional y humana.

He leído que existe un gran tesoro detrás de las personas a quienes admiramos, pues son un reflejo de nuestros valores y pasiones, conversar con quien nos genera admiración, es como conversar con nosotros mismos en nuestra mejor versión, y ustedes, representan para mí esa mejor versión... una fuente de inspiración.

Y, por último, a la C. Fidelia Gómez Morales

Directora del departamento de ecología y medio ambiente del H. ayuntamiento de Ocozocoautla, administración 2018-2021, por su apoyo y las facilidades de acceso al relleno sanitario y a la información disponible.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos es una consecuencia inevitable de la actividad humana (Vergara y Tchobanoglus, 2012), a medida que la urbanización, el crecimiento económico y la población mundial aumentan, la generación de residuos sólidos también lo hace (Castaldi, 2014), y, pese a que la conciencia mundial de Reducir, Reusar y Reciclar los materiales, tiene el potencial de mitigar la problemática que esto representa, la aplicación de estas iniciativas ha encontrado numerosos obstáculos que impiden su materialización (Giraldo, 2001), y por tanto, la posibilidad de contribuir en la reducción del problema.

En la mayoría de los países, el vertido ha sido el método preferido para la eliminación de los residuos, debido, a la viabilidad técnica, la facilidad de operación, las supervisiones mínimas y el bajo gasto operativo que supone (Kamaruddin, Yusoff, Aziz & Hung, 2015);

Sin embargo, los grandes volúmenes de residuos generados provocan que en las municipalidades encargadas de su gestión -entendiéndose esta desde la generación, almacenamiento, recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición final- prevalezca el esquema de recolección y disposición final (Pineda & Loera, 2007; Sáez, Urdaneta, & Joheni, 2014).

En México, el destino de los residuos puede ser su disposición en rellenos sanitarios (RS), sitios controlados y sitios no controlados, comúnmente llamados tiraderos a cielo abierto.

Desafortunadamente, en ciudades de países en desarrollo como México es común la falta de sitios adecuados para la disposición final, siendo los residuos depositados en tiraderos a cielo abierto; Chiapas es un claro ejemplo de ello, puesto que, hasta el año 2010, de los 107 sitios de disposición final (SDF) registrados, 101, equivalentes al 94.3% eran tiraderos a cielo abierto (INEGI, 2010), lugares con una amplia problemática, debida entre otras cosas, a los procesos de descomposición de la materia orgánica llevados a cabo por diversas especies de microorganismos, los cuales dan lugar a la generación de dos de los subproductos más agresivos de los residuos sólidos urbanos para el ambiente: el biogás y los lixiviados (Vera y González, 2010) que son causa de graves problemas ambientales y sociales, y que, sin embargo, en estos sitios son liberados al medio sin ningún control.

Los lixiviados son generados por el paso del agua de lluvia a través de los residuos y por el contenido inherente de agua en los mismos, que, debido a los procesos de degradación llevados a cabo en las celdas, arrastran grandes cantidades de productos y compuestos dañinos, tanto disueltos como suspendidos, lo que hace que sean considerados uno de los líquidos más contaminados y contaminantes que se conocen (Giraldo, 2001), por lo que a lo largo del mundo y del tiempo se han desarrollado y probado numerosas tecnologías para su tratamiento, principalmente procesos biológicos y fisicoquímicos, cuya aplicación es muchas veces difícil debido a que en algunos casos, la remoción de uno de los grupos de contaminación se ve impedido por la presencia de otros grupos, esto hace que algunas técnicas disponibles sigan siendo complicadas, caras y generalmente requieran adaptación previa definida (Kamaruddin, et. al., 2015), además, debido a la heterogeneidad en su composición y a la variabilidad de los volúmenes generados, no se pueden extrapolar directamente los resultados obtenidos con tratamientos de un lixiviado a otro, por lo que cada lixiviado proveniente de un SDF debe ser evaluado individualmente para encontrar el sistema de tratamiento adecuado para su manejo (Méndez et. al, 2009).

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El manejo de las emisiones líquidas es una de las mayores problemáticas que enfrenta la gestión de un relleno sanitario, esto se debe principalmente a dos factores que caracterizan al efluente: el caudal volumétrico y la composición, que en el caso del lixiviado están relacionados y constituyen un gran inconveniente (Renou et al., 2008).

### **2.1 Composición de los lixiviados.**

Los lixiviados de los SDF contienen todos los mayores grupos de contaminación conocidos, a saber: contaminación por patógenos, materia orgánica, nutrientes y sustancias tóxicas -entre ellas metales pesados- (Martínez, et al., 2014; Kanmani & Gandhimathi, 2013) que, dependiendo de factores como composición de los residuos, grado de compactación y edad del relleno, entre otros, varían en concentración (Kumari, et al., 2017) y determinan el grado de impacto del líquido por la peligrosidad que le confieren.

La contaminación del agua superficial y subterránea, y la bioacumulación en los seres vivos y comunidades circundantes constituyen algunas rutas posibles por las que estos lixiviados afectan tanto al ambiente como a las poblaciones humanas.

Debido al alto contenido de materia orgánica representado por elevados valores de DQO y DBO, los lixiviados tienen la capacidad de agotar el oxígeno disponible en el medio receptor, y, gracias al aumento de los nutrientes como nitrógeno y fósforo, se puede promover el crecimiento descontrolado de algas que generan procesos de eutrofización en las aguas (Pastor Piñeiro, 1994; Espinosa et al., 2010).

Por su parte, los metales pesados, como el arsénico, cadmio, cromo, plomo y mercurio, son tóxicos sistémicos que se sabe que inducen efectos adversos para la salud en humanos, incluidas enfermedades cardiovasculares, anomalías del desarrollo y reproducción, trastornos neurológicos, diabetes, pérdida de audición, trastornos hematológicos e inmunológicos, daños en piel, hígado, riñones, pulmón y varios tipos de cáncer (Tchounwou, Yedjou, Patlolla, & Sutton, 2012; Londoño, Londoño, & Muñoz, 2016; Kumari, Gupta, & Kaur A, 2017)

## **2.2 Volumen de generación**

Las condiciones climáticas, así como el diseño, operación del relleno y área rellenada establecen en gran medida el volumen de lixiviados a generar (Borzacconi, López, & Anido, 1996); en relación al clima, se sabe que la lluvia es el principal contribuyente a la generación de lixiviado (Abdulhussain, et. al, 2009), un vertedero que se encuentra en una región cálida y árida tiende a generar una menor cantidad de lixiviados debido a la baja precipitación y altas tasas de evaporación, mientras que en regiones de climas tropicales la generación suele ser alta a causa de la alta precipitación infiltrada en las celdas.

Diversos estudios llevados a cabo en ciudades importantes del país, ponen de manifiesto que la cantidad de lixiviados se ve incrementada por la incidencia del agua de lluvia en las zonas de almacenamiento, donde los líquidos escapan hasta en 74% de los casos: 24% de manera regular y 50% durante la temporada de lluvias al verse rebasada la capacidad de las fosas de captación debido al alcance de niveles críticos de generación (Bernache, 2012), en otros sitios, los residuos líquidos son desechados directamente en corrientes, formando lagos que se ven desbordados en época de lluvias, afectando así los suelos, aguas superficiales y especialmente aguas subterráneas cercanas, las cuales revelan altas concentraciones de nitratos y metales pesados que exceden incluso los límites máximos permisibles de la normatividad Mexicana (De León, Cruz, Dávila, Velasco, & Chapa).

## **2.3 Ausencia de tratamiento.**

En los mejores casos, el tratamiento aplicado a los lixiviados es mediante la utilización de “tecnologías” cuestionables como recirculación y evaporación mediante lagunas -hasta el año 2007, de los 67 rellenos sanitarios existentes en el país, únicamente 10 contaban con laguna de evaporación- cuyo éxito radica en que son sistemas relativamente fáciles de operar (Nájera, Gómez, García, Gutiérrez, & Rojas, 2010).

En el contexto estatal la situación es aún más crítica, puesto que el nulo manejo constituye la practica común (Nájera, Castañon, Figueroa & Rojas, 2009); actualmente no se documenta la existencia de alguna planta de tratamiento en funcionamiento y más aún, no se tienen datos de los volúmenes estatales de lixiviado generado.

Para el municipio de Ocozocoautla de Espinosa específicamente, el departamento de ecología y medio ambiente carece de los datos de generación del subproducto, sin embargo, la aplicación del modelo suizo para la estimación de la producción de lixiviados permite inferir que la producción anual se sitúa en el orden de los 2400 m<sup>3</sup> de los cuales cierto porcentaje puede ser liberado esporádicamente al ambiente.

Estos hechos ponen de manifiesto la necesidad del desarrollo de tecnologías adaptadas a las condiciones técnicas y económicas del estado para mejorar el manejo de este subproducto antes de su eliminación final.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Lixiviados. Producción y características.**

El lixiviado se genera como consecuencia de la percolación del agua de lluvia a través de los residuos, por los procesos bioquímicos llevados a cabo en las celdas y por el contenido de agua propio de los residuos depositados, estos aspectos, junto con el diseño y operación del relleno, principalmente el grado de compactación, establecen en gran medida el volumen de lixiviados a generar (Borzacconi, López, & Anido, 1996; Abdulhussain, et. al, 2009).

El nivel de percolación esta a su vez en función del área rellenada, porque es a través de ella que se realiza la entrada y el contacto del agua de infiltración con la basura. Al aumentar el área rellenada, aumenta paralelamente la cantidad de lixiviados y teniendo en cuenta que los rellenos son sistemas que duran lustros y décadas en su funcionamiento, igualmente se espera que la cantidad de lixiviados aumente. Este aumento es un aumento gradual, lento, con los años (Giraldo, 2001).

Respecto a la compactación, la producción es generalmente mayor cuando los residuos han sido menos compactados, ya que esta disminuye la tasa de filtración.

En cuanto a la calidad, esta depende, además de los factores mencionados anteriormente, de la composición de los desechos confinados, se sabe que existen diferencias en las calidades de lixiviados de países desarrollados contra los de países en vías de desarrollo, las diferencias se originan principalmente por los altos contenidos de materia orgánica fácilmente biodegradable (MOFBD) que se tiene en los residuos sólidos de los países en desarrollo, pero, particularmente, la calidad varía grandemente debido a la edad del lixiviado, el cual puede clasificarse como joven, intermedio o viejo (tabla 1).



**Tabla 1:** valores típicos esperados en lixiviados de diferentes edades.

	<i>Joven</i>	<i>Intermedio</i>	<i>Viejo</i>
<i>Edad</i>	<5	5-10	>10
<i>pH</i>	<6.5	6.5-7.5	>7.5
<i>DQO (mg/l)</i>	>10000	4000-10000	<4000
<i>DQO/DBO<sub>5</sub></i>	>0.3	0.1-0.3	<0.1
<i>Biodegradabilidad</i>	Importante	Media	Baja
<i>Metales pesados</i>	Bajo- medio	-	Bajo
<i>Compuestos orgánicos</i>	80% VFA	5-30% VFA+ HA+ FA	HA+ FA

VFA= Ácidos grasos Volátiles; HA= Ácidos Húmicos; FA= Ácidos Fúlvicos.

Tomado de: (Renou, Givaudan, Poulain, Dirassouyan, & Moulin, 2008).

En general, el grado de biodegradabilidad de los lixiviados, es inversamente proporcional a su edad, por esta razón, la determinación de la cantidad y la composición de los lixiviados son un paso esencial en el desarrollo de sus sistemas de gestión.

### **3.2. Alternativas de tratamiento.**

Alrededor del mundo, los tratamientos disponibles comprenden una amplia gama de tecnologías comúnmente empleadas para el tratamiento de las aguas residuales (Giraldo, 2001), las cuales pueden ser clasificadas en cuatro grandes grupos: transferencia, biodegradación, métodos químicos y físicos y procesos de membrana.

#### **3.2.1 Tratamiento por transferencia.**

**3.2.1.1. Tratamiento combinado con aguas residuales domésticas.** Hace unos años, una solución común era tratar el lixiviado junto con las aguas residuales municipales en las plantas de tratamiento. Esta alternativa presenta fácil mantenimiento y bajos costos de operación además de que tanto el nitrógeno como el fosforo son aportados por el lixiviado y el agua residual doméstica respectivamente, sin embargo, esta opción ha sido cada vez más cuestionada debido a la presencia de compuestos orgánicos inhibidores y metales pesados en el lixiviado, los cuales reducen la eficiencia del tratamiento e incrementan las concentraciones del efluente (Abdulhussain, et. al., 2009), además de que en países en desarrollo estas son inexistentes en la mayoría de los casos lo que la hace una opción inviable (Giraldo, 2001).

**3.2.1.2. Recirculación.** Uno de los fines de la recirculación es controlar la libre dispersión del lixiviado, estos son retornados al relleno por reinfiltración dentro de los residuos dispuestos mediante aplicación directa, rociado por irrigación o aplicación subsuperficial. Este método es considerado de control porque los lixiviados están continuamente fluyendo a través del relleno tratándose por procesos biológicos, precipitación y adsorción (Martínez et. al. 2014), lo que mejora la calidad del lixiviado y disminuye el tiempo requerido para la estabilización del mismo, sin embargo, las altas tasas de recirculación pueden afectar la degradación anaerobia de los desechos inhibiendo la metanogénesis al causar altas concentraciones de ácidos orgánicos que son tóxicos para los metanógenos (Abdulhussain et. al, 2009).

### **3.2.2. Procesos biológicos.**

Son las tecnologías clásicas para la remoción de materia orgánica, aquí los contaminantes son transformados por microorganismos en CO<sub>2</sub> y lodos principalmente (Abdulhussain et. al, 2009), generalmente se utilizan en lixiviados jóvenes por su alto índice de biodegradabilidad, sin embargo, estos procesos requieren de condiciones especiales de trabajo como temperatura, carga orgánica, concentración de nutrientes y pH (Martínez, et. al., 2014) sin las cuales el sistema no funciona de manera óptima.

**3.2.2.1. Aerobios.** Existe experiencia con una gran variedad de tipos de sistemas, desde las tradicionales lagunas aireadas, lodos activados, biodiscos y filtros percoladores, hasta sofisticados sistemas que acoplan reactores biológicos con procesos de ultrafiltración con membranas. Su rango de aplicación es conocido al igual que los problemas y limitaciones que pueden surgir en su aplicación.

Se utilizan cuando se requiere obtener una baja concentración de DBO en los efluentes. Vale la pena aclarar que como usualmente las concentraciones de DBO en los lixiviados son muy altas es relativamente fácil tener remociones porcentuales superiores al 90% en este parámetro. Sin embargo, la DBO remanente puede ser todavía alta. Los costos de inversión y de operación y mantenimiento son significativamente superiores a los de los procesos anaerobios cuando los lixiviados son concentrados, como es el caso de un lixiviado joven, por lo que se logran mejores relaciones beneficio/costo cuando se utilizan para tratar lixiviados con concentraciones medias o bajas de DBO. Por esta razón, y dependiendo de las exigencias del vertimiento, se usan preferencialmente como postratamiento a los sistemas anaerobios, o para lixiviados viejos con bajos niveles de DBO.

En los reportes operativos se mencionan problemas con la generación de espumas, con la precipitación de hierro, y en el caso de los lodos activados, problemas para aceptar altas variaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas que caracterizan a los lixiviados, como ya se ha mencionado anteriormente. Esto último puede implicar que los sistemas requieran tanques de ecualización de caudales como parte del tratamiento. Igualmente, y dependiendo de la forma de operación del proceso, se tiene una alta generación de lodos residuales, en mayor cantidad que los procesos anaerobios, que es necesario procesar aumentando los costos de inversión y de operación y mantenimiento. Por otra parte, en casos en donde los lixiviados traigan cantidades importantes de COVs, el aire que se usa en el proceso de la aireación del tanque biológico debe ser tratado a su vez para remover los COV que se arrastran. Esto igualmente hace más compleja la operación de los sistemas de tratamiento y aumenta los costos.

Por la naturaleza misma del proceso que se tiene, la operación de un proceso aerobio requiere mayor capacidad técnica por parte del operador, al igual que mayor necesidad de mantenimiento de equipos (Giraldo, 2001).

**3.2.2.2. Anaerobios.** Estos tratamientos se basan en el mismo principio de depuración vía aerobia, pero mediante una población bacteriana en ausencia de oxígeno, lo que lo hace un proceso más simple con menor generación de lodos, esto se refleja en menores costos de inversión de capital y de operación y mantenimiento, y en menores requisitos técnicos en el personal que opera el sistema. Sin embargo, existen varias precauciones que hay que tener en cuenta al aplicar este tipo de procesos. Los altos contenidos de amoníaco y de minerales disueltos pueden generar problemas de toxicidad para los microorganismos.

Esto implicaría una remoción previa del amoníaco en caso de que este fuera el problema, o la aplicación de cargas de trabajo reducidas debido a las limitaciones en la actividad microbiana por motivo de la toxicidad.

Por otra parte, puede generarse una acumulación muy significativa de material inorgánico precipitado dentro del reactor y en los lodos mismos del sistema anaerobio, este es un problema práctico de gran significancia para la operatividad de los sistemas. La acumulación de material precipitado dentro del reactor termina por formar incrustaciones que limitan el volumen activo del reactor, limitan la actividad de los lodos, y taponan los sistemas de conducciones de los reactores acabando finalmente en un colapso del sistema de tratamiento, o alternativamente,

en costos y complicaciones muy grandes en la operación y mantenimiento de las plantas, por lo que es necesario bien sea hacer pretratamientos que minimicen los efectos de la toxicidad y/o de los materiales incrustantes, o, trabajar con diseños de reactores anaerobios que sean más resistentes a estos fenómenos.

Igualmente debe tenerse en cuenta que las variaciones de los caudales y cargas orgánicas en sistemas como los reactores UASB pueden fácilmente desestabilizar el proceso, y por lo tanto con frecuencia se puede requerir una homogenización de los caudales, si se esperan variaciones significativas en los flujos y cargas (Giraldo, 2001).

Se han reportado trabajos aplicando este tipo de tratamiento con diversos sistemas, que van desde los más sencillos como lagunas anaerobias hasta los más sofisticados como sistemas de lecho fluidizado, filtros anaerobios y reactores anaerobios de flujo ascendente conocidos como UASB (Martínez et al., 2014).

### **3.2.3 Procesos fisicoquímicos.**

Son sistemas que incluyen procesos físicos y/o la adición de sustancias químicas, son comúnmente usados cuando la presencia de compuestos refractarios -como ácidos húmicos y fulvicos, metales pesados, compuestos orgánicos halogenados (AOXs) y bifenilos policlorados (PCBs)- no permite la aplicación de procesos biológicos (Kamaruddin, Yusoff, Aziz, & Hung, 2015) como ocurre en el caso de lixiviados viejos.

Entre estas tecnologías se listan los procesos de coagulación-floculación, adsorción y oxidación química, donde se engloban los procesos de oxidación avanzada (POA) (Abdulhussain, et. al., 2009) estos últimos han tenido gran relevancia en la remoción de contaminantes presentes en el agua (Martínez et al., 2014) ya que involucran la generación y uso de especies transitorias altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{HO}\cdot$ ) que posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica. La principal ventaja de estos procesos es que no solo cambian de fase al contaminante, sino que lo transforman químicamente, pero, debido a esto conllevan un aumento en los costos de inversión y mantenimiento puesto que demandan reactivos químicos y empleo de personal altamente calificado en la operación; en el caso de los POA fotoquímicos involucran costos adicionales por

consumo de energía eléctrica y su eficiencia depende del diseño del reactor (tipo de lámparas, geometría, hidrodinámica, etc.).

#### **3.2.4. Sistemas de membranas.**

De forma general, estos sistemas consisten en forzar el paso del líquido a filtrar a través de una membrana colocada sobre un soporte sólido; funcionan debido a que permiten el paso a través de ellas de partículas con unas características particulares, mientras que impiden el paso de aquellas que no poseen esas mismas características y son ampliamente utilizadas por la capacidad de producir separaciones de forma muy eficiente a temperatura ambiente (Tuset, 2019).

Los principales procesos aplicados al tratamiento de lixiviados son la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y osmosis inversa (RO) (Renou et al., 2008).

##### **3.2.4.1. Microfiltración.**

La MF sigue siendo interesante cada vez que se requiere un método eficaz para eliminar coloides y materia en suspensión como, por ejemplo, en el pretratamiento para otro proceso de membrana (UF, NF o RO) o en asociación con tratamientos químicos. Pero no se puede usar sola ya que no se logran tasas de retención significativas alcanzando reducciones de DQO entre 25 y 35% (Renou et al., 2008). También se ha observado el acoplamiento de microfiltración con procesos biológicos de tratamiento aerobio en reemplazo de sedimentadores (Giraldo, 2001).

##### **3.2.4.2. Ultrafiltración.**

La ultrafiltración es eficaz para eliminar las macromoléculas y las partículas, pero depende en gran medida del tipo de material que constituye la membrana, por lo que también es usada como pre o post tratamiento en sistemas acoplados ya que la eliminación de sustancias contaminantes nunca es completa (DQO entre el 10 y el 75%). La UF puede utilizarse como herramienta para fraccionar la materia orgánica y así evaluar la masa molecular preponderante de contaminantes orgánicos en un lixiviado dado. Además, las pruebas con permeados de membrana pueden proporcionar información sobre la recalcitrancia y la toxicidad de las fracciones permeadas (Renou et al., 2008).

#### **3.2.4.3. Nanofiltración.**

La nanofiltración ofrece un enfoque versátil para cumplir con múltiples objetivos de calidad del agua, como el control de contaminantes orgánicos, inorgánicos y microbianos, la alta tasa de rechazo de iones sulfato y de materia orgánica disuelta junto con un pequeño rechazo de cloruro y sodio reduce el volumen de concentrado, sin embargo, su aplicación exitosa requiere un control eficiente del ensuciamiento de la membrana. Específicamente en la nanofiltración de lixiviados un amplio espectro de componentes puede contribuir al ensuciamiento de la membrana como sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas, partículas coloidales y en suspensión.

#### **3.2.4.4. Osmosis inversa.**

La osmosis inversa parece ser uno de los métodos más prometedores y eficientes entre los nuevos procesos para el tratamiento de lixiviados de vertederos. En el pasado, varios estudios, realizados tanto a escala de laboratorio como industrial, demostraron el rendimiento de la ósmosis inversa en la separación de contaminantes de los lixiviados de vertederos, se reportaron valores del coeficiente de rechazo referidos al parámetro DQO y concentraciones de metales pesados superiores al 98 y 99%, respectivamente (Renou et al., 2008).

Sin embargo, se han identificado dos problemas que siguen siendo hoy en día, los principales inconvenientes para la implementación de procesos de membranas impulsados por presión, y particularmente RO, para el tratamiento de lixiviados de vertederos: el ensuciamiento de la membrana (que requiere un pretratamiento extenso o limpieza química de las membranas, da como resultado una vida útil corta de las membranas y disminuye la productividad del proceso) y la generación de un gran volumen de concentrado (que es inutilizable y debe ser descargado o tratado) (Renou et al., 2008).

### **3.3 Panorama estatal.**

Generalmente, en los sitios de disposición final debidamente constituidos (rellenos sanitarios) del estado, los lixiviados son enviados a piscinas de almacenamiento o bandejas de evaporación, el método consiste principalmente en formar espejos de lixiviado sin la inducción mecánica de movimiento, los cuales al interactuar con la radiación solar, logran evaporar parte del agua contenida en el lixiviado,

desafortunadamente, la exposición del mismo no se limita a la radiación solar sino también a precipitaciones, viento y contaminación de otras fuentes, además de que, al ser un sistema abierto a la atmósfera, no posee sistema alguno de retención de la radiación, volviendo el proceso ineficiente.

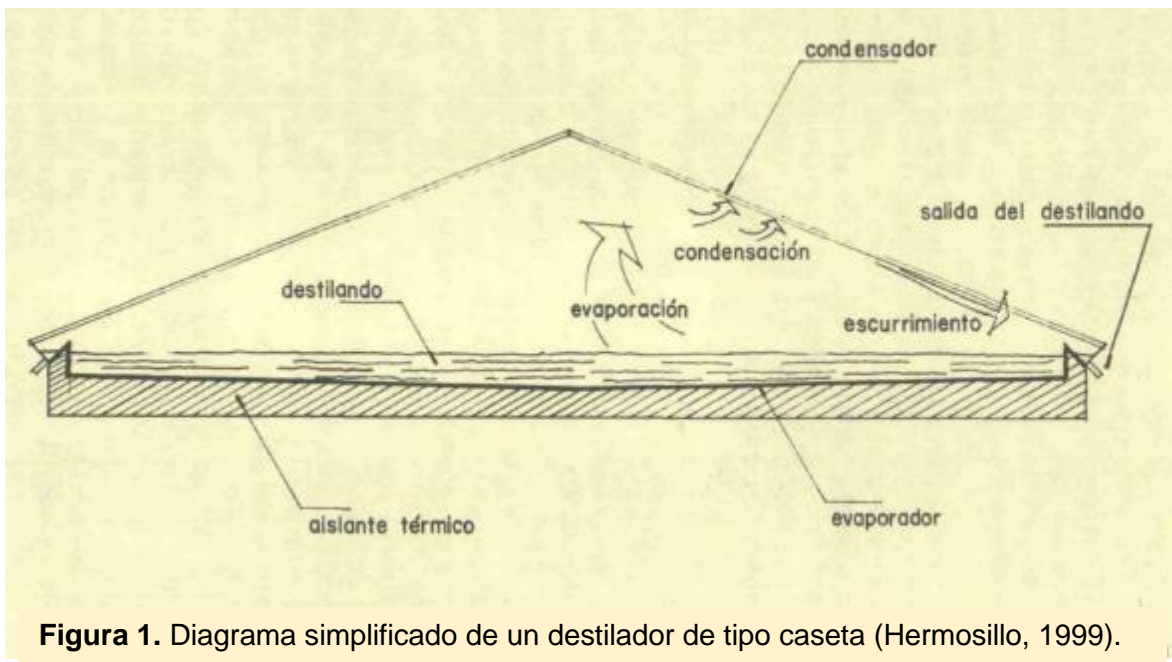
Una forma de aprovechar de mejor manera la radiación solar es mediante el proceso de destilación, el cual se aborda en el presente trabajo.

### 3.3.1. Destilación Solar

La destilación solar ha sido considerada una alternativa atractiva y ampliamente usada desde tiempos antiguos como una opción eficiente y de bajo costo para la desalinización del agua de mar debido principalmente a su fácil construcción, operación simple y bajos costos tanto de mantenimiento como de operación (Kulkarni, 2014; Torchia, Porta y Cervantes, 2010).

#### 3.3.1.1. Captación de energía solar

El destilador solar requiere de un elemento que transforme la energía solar en un incremento de temperatura del agua, para poder evaporarla: el colector solar. En los destiladores solares más simples, el colector solar consiste en una charola horizontal, de color negro, que contiene el agua que se quiere destilar denominada destilando.



**Figura 1.** Diagrama simplificado de un destilador de tipo caseta (Hermosillo, 1999).

Donde la superficie negra de la charola absorbe la radiación solar, lo que se traduce en un ligero calentamiento que inmediatamente se transmite al agua. Así, el destilando va aumentando su temperatura hasta llegar a un máximo un poco después del mediodía. Para evitar flujos de calor indeseables, es necesario que la charola esté aislada térmicamente por la parte inferior. De lo contrario, parte de la energía captada por el colector se perderá como calor que escapa hacia el ambiente sin haber hecho el efecto buscado.

### **3.3.1.2. Evaporación del agua**

El calentamiento del destilando da lugar a un incremento en su *presión de vapor*, que es una medida o manifestación de su tendencia a evaporarse. Para facilitar la evaporación, conviene que el evaporador (charola) tenga un área grande comparada con el volumen de destilando que puede contener. Esta conveniencia coincide con la necesidad de tener también la mayor área posible para colección de energía solar. Por eso, en el destilador simple se combinan el colector y el evaporador en un solo elemento: una charola extensa, poco profunda y con acabado negro mate.

### **3.3.1.3. Condensación del vapor**

Una vez que el agua se encuentra en forma de vapor, es necesario volverla a la fase líquida sobre una superficie limpia para después extraerla del destilador. Esto se logra en lo que se conoce como el *condensador* y generalmente es una cubierta de vidrio o algún otro material transparente que se coloca sobre el evaporador a una distancia e inclinación adecuadas.

La cubierta debe ser transparente para permitir la llegada de luz hasta el colector-evaporador. Por otro lado, al ser transparente, absorbe mucha menos radiación que el colector y como se encuentra en contacto directo con el ambiente su temperatura es menor a la del destilando en la charola, gracias a esta diferencia de temperaturas que se establece entre el evaporador (temperatura alta) y el condensador (temperatura baja) hay una tendencia neta del agua a evaporarse de la charola y a condensarse en la cubierta transparente.



#### **3.3.1.4. Eficiencia térmica y productividad.**

Este concepto es útil para comparar el funcionamiento de dos destiladores diferentes o para saber qué tan efectiva es una modificación que se haga. La eficiencia térmica es una medida de la fracción de calor que se emplea realmente en el proceso evaporación-condensación. Una eficiencia de 1.00 significaría que toda la energía solar se emplea en dicho proceso, 0.50 significaría que sólo la mitad se emplea para destilar y la demás se pierde al ambiente.

Otra forma de comparar los funcionamientos de los destiladores es mediante su *productividad*, que suele ser una medida más práctica y desde luego, está relacionada con la eficiencia térmica. La productividad es el volumen de destilado que puede producir un destilador por cada metro cuadrado de colector-evaporador y por cada día de operación. Suele tomarse como dato característico de un destilador su productividad promediada durante un mes o más. La productividad de los destiladores solares de caseta suele ser de alrededor de 3 litros por metro cuadrado por día. En otras variantes simples puede ser de unos 5 litros por metro cuadrado por día y en los más sofisticados, hasta alrededor de 15 o 20 (Hermosillo, 1999).

#### **3.3.1.5. Eficiencia de remoción.**

La eficiencia de remoción de contaminantes puede determinarse mediante la cuantificación de parámetros fisicoquímicos como sólidos suspendidos (SSF, SSV y SST), materia orgánica biodegradable (DQO, DBO, COT), nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), y metales pesados (Zn, Ni, Pb, Cd, Cr, Cu y Hg) los cuales por sí solos no permiten evaluar los posibles efectos tóxicos para la biota presente en el medio receptor (Zaltauskaite, Sujetoviene, & Cypaite, 2011)

#### **3.3.1.6. Bioensayos de toxicidad.**

Un instrumento alternativo y que complementa los tradicionales análisis químicos para la determinación de toxicidad de muestras ambientales es la utilización de bioensayos (Pérez et al., 2015), en contraste con los análisis físico-químicos, los bioensayos de toxicidad integran los efectos biológicos de todos los compuestos presentes y otros factores como la biodisponibilidad e interacción de tóxicos (Zaltauskaite et al., 2011).

Las plantas superiores son ampliamente usadas por ser organismos eucarióticos, y por lo tanto más comparables a la mayoría de especies de flora y fauna superiores; constituyen una herramienta eficiente para medir alarma de peligro ambiental con la ventaja de ser simples y económicos y solo requieren una cantidad relativamente pequeña de muestra. Además, las semillas se pueden utilizar durante mucho tiempo y tienen gran variedad de puntos finales de evaluación como germinación, biomasa, crecimiento y parámetros bioquímicos (Hernández et al., 2016; Zaltauskaite et al., 2011; Priac, Badot y Crini, 2017).

Por otro lado, los bioensayos con semillas permiten evaluar la fitotoxicidad de muestras coloreadas o con elevada turbiedad -como en el caso de lixiviados de rellenos sanitarios- de manera directa y sin necesidad de filtración previa, simplificando así el procedimiento de prueba (Sobrero y Ronco, 2004).

Diversos estudios han usado plantas para evaluar la toxicidad de lixiviados de rellenos sanitarios: García, Márquez, & Sánchez (2015) evaluaron la toxicidad de un lixiviado sobre *Phaseolus vulgaris* L., Márquez & Sánchez (2014) compararon el índice de contaminación calculado de dos lixiviados con su efecto tóxico sobre *Phaseolus vulgaris* L., Sang et al. (2010) estudiaron las respuestas fisiológicas de *zea mays* a diferentes concentraciones de un lixiviado de relleno sanitario, Budi, Suliasih, Othman, Heng, & Surif (2016) evaluaron la toxicidad de lixiviados sobre semillas de *Lycopersicon esculentum* y Klauck, Rodriguez, & Silva (2015) evaluaron la toxicidad de lixivados sobre *Lactuca sativa* L. antes y después de su tratamiento biológico.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, mediante la guía de prueba de efectos ecológicos (EPA, 1996), recomienda ciertas especies de plantas para realizar estos bioensayos: *Cucumis sativus* (pepino), *Lactuca sativa* (lechuga), *Glycine max* (soya), *Lycopersicon esculentum* (tomate), *Brassica oleracea* (repollo), *Avena sativa* (avena), *Lolium perenne* (raigrás perenne), *Allium cepa* (cebolla), *Daucus carota* (zanahoria) y *Zea mays* (maíz).

Entre ellas *Lactuca sativa* L. se ha posicionado como un buen indicador tanto para sustancias con altos niveles de toxicidad al evaluar el índice de germinación, como para niveles muy bajos al evaluar la elongación de radícula e hipocotilo (Sobrero y Ronco, 2004; Zaltauskaite et al., 2011; Bagur et al., 2011; Torres, García, Hernández, & Fernández, 2006; Pérez et al., 2015; Hernández et al., 2016; Bohórquez & Campos, 2012).

El bioensayo de toxicidad con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) es una prueba estática de toxicidad aguda (120 horas de exposición) en el que se pueden evaluar los efectos fitotóxicos de compuestos puros o de mezclas complejas en el proceso de germinación de las semillas y en el desarrollo de las plántulas durante los primeros días de crecimiento; como puntos finales para la evaluación de los efectos fitotóxicos se determina la inhibición en la germinación y de la elongación de la raíz la cual constituye un indicador subletal muy sensible debido a que permite ponderar el efecto de compuestos presentes en niveles tan bajos que no son suficientes para inhibir la germinación. Entre sus aplicaciones se encuentran el monitoreo de muestras ambientales y control de efluentes (Sobrero & Ronco, 2004).

# CAPÍTULO II

## 1. JUSTIFICACIÓN

Como es bien sabido cualquier proceso de tratamiento requiere energía, por lo que hoy en día el uso de energías renovables se presenta como una opción atractiva y sustentable para este fin, debido a que no se consumen ni se agotan en una escala humana durante su transformación y uso.

Con el fin de proporcionar una solución alternativa al manejo actual de los lixiviados producidos en los rellenos sanitarios de los municipios, en el que estos son simplemente recirculados o acumulados y no existe eliminación ni recuperación de algún componente que pudiese tener algún valor, como el agua, se propone el uso de la energía solar mediante el empleo de destiladores solares, estos sistemas han sido utilizados durante cientos de años y han evolucionado para diferentes aplicaciones.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es la relación costo/beneficio que presenta ya que supone menores costos de operación y mantenimiento y menores requisitos técnicos en el personal operativo que otros sistemas de tratamiento (Andrade, Borja y Segundo, 2020), otro punto a tomar en cuenta es que el área requerida para su instalación esta usualmente disponible en los rellenos sanitarios.

Por su parte desde el punto de vista ambiental este método no presenta sustancias residuales en el agua como ocurre generalmente en tratamientos con adición de químicos, tal es el caso del sulfato de aluminio, uno de los coagulantes inorgánicos más ampliamente usados que presenta muy baja biodegradabilidad en suelo y agua y del cual existe una preocupación creciente debido a la posible asociación entre los radicales libres que libera y enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer (Solis, Laines, & Hernández, 2012).

En cuanto a remoción de contaminantes, la destilación solar aprovecha la energía del sol para eliminar los contaminantes del agua incluyendo sales, metales pesados y microbios; al extraer parte del contenido de agua presente en estas corrientes se genera un residuo sólido o semi-sólido, altamente concentrado, lo que permite su disposición segura y en menor volumen del residuo final y la obtención de una corriente líquida con una composición de elementos contaminantes considerablemente menor, que puede ser aprovechada en las instalaciones del relleno e incluso como aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional y ser aptas para uso en riego agregando como beneficios económicos

ahorros de costos asociados a la recirculación del efluente y a la compra de agua potable para riego.

En estudios recientes realizados con lixiviados, se analizó la remoción obtenida con este tratamiento en conjunto con humedales, según el estudio, los costos de implementación del sistema son justificados por el beneficio ambiental que este representa al disminuir la carga contaminante del lixiviado hasta valores que se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles de descarga a cuerpos de agua dulce (Andrade et. al.,2020).

Respecto al manejo actual de este líquido en los sitios de disposición, la utilización de destiladores presenta varias ventajas sobre el método tradicional de lagunas predominante en el estado: ya que concentran la radiación solar en un espacio cerrado y permiten tener un mejor control de los parámetros que afectan el proceso de evaporación, lo que aumenta la evaporación del líquido y permite recuperar el agua para usos posteriores, además de que eliminan la exposición directa del lixiviado al medio ambiente (Szantó, Piraino, & Arancibio, 2011), lo que representa una gran ventaja, ya que el aumento de volumen de lixiviado debido a precipitación ya no sería un factor.

Según Szantó, et. al. (2011) la introducción de un sistema de evaporación cerrado para lixiviados permitiría mejorar la eficiencia del proceso al optimizar las condiciones del mismo y por lo tanto mejorar el manejo actual que estos reciben en los sitios de disposición final del estado.

## 2. OBJETIVOS

General: Evaluar la fitotoxicidad de lixiviados crudos y tratados -mediante destilación solar- sobre *Lactuca sativa L.*

Específicos:

1. Construir un destilador solar como sistema de tratamiento del lixiviado proveniente de la ciudad Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas.
2. Establecer los bioensayos con semillas de *Lactuca sativa L.* variedad iceberg mediante el método de Sobrero y Ronco (2004) adaptado.
3. Determinar el color de las muestras tratadas y sin tratar.
4. Determinar la fitotoxicidad de cada muestra mediante los índices de germinación y elongación radical.

## 3. HIPÓTESIS

El empleo de un tren de tratamiento a base de destilación solar seriada en lixiviados, mejora el índice de germinación de las semillas y elongación de las raíces debido a una mayor remoción de contaminantes.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Recolección de muestra.

La muestra de lixiviado fue recolectada en el relleno sanitario de Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas (16° 42' 48.6" N, 93° 31' 28.8 W) el cual cuenta con dos celdas que se encuentran aproximadamente al 80% de su capacidad para el depósito de los residuos (véase imagen 1), y, una laguna de evaporación para el almacenamiento de los lixiviados generados (imagen 2), dicho relleno sanitario lleva 4 años en operación por lo que la generación del lixiviado es relativamente reciente.



**Imagen 1.** Celdas 1 y 2 del relleno sanitario de Ocozocoautla

La recolección de la muestra se realizó en el mes de marzo de 2020 aplicando el método indicado en la norma NMX-AA-003-1980.



**Imagen 2.** Laguna de lixiviados del relleno sanitario de Ocozocoautla

#### **4.2. Destilación de la muestra.**

El destilador solar fue fabricado a partir de dos botellas de plástico transparente de 5 l. El diámetro y altura del destilador armado fueron 16 cm y 36 cm respectivamente, en su interior fue colocado un recipiente de color negro como contenedor, con capacidad de 350 ml. en el cual fue colocada la muestra de lixiviado crudo a destilar.

El costo total de construcción del destilador fue de 50 pesos.





**Imagen 3.** Destilador casero donde se observa la condensación del lixiviado.

Se obtuvieron muestras de una y dos destilaciones, esto con el propósito de que la segunda destilación removiera sustancias que no pudieron ser eliminadas en la primera destilación. En la primera destilación fueron colocados 100 ml de lixiviado crudo que al evaporarse y condensarse pasaron a la parte inferior del destilador donde fueron extraídos 35 ml, posteriormente una porción de ese destilando fue colocada otra vez en un nuevo evaporador para ser sometida a un segundo proceso de destilación.

#### **4.3. Desarrollo de los bioensayos.**

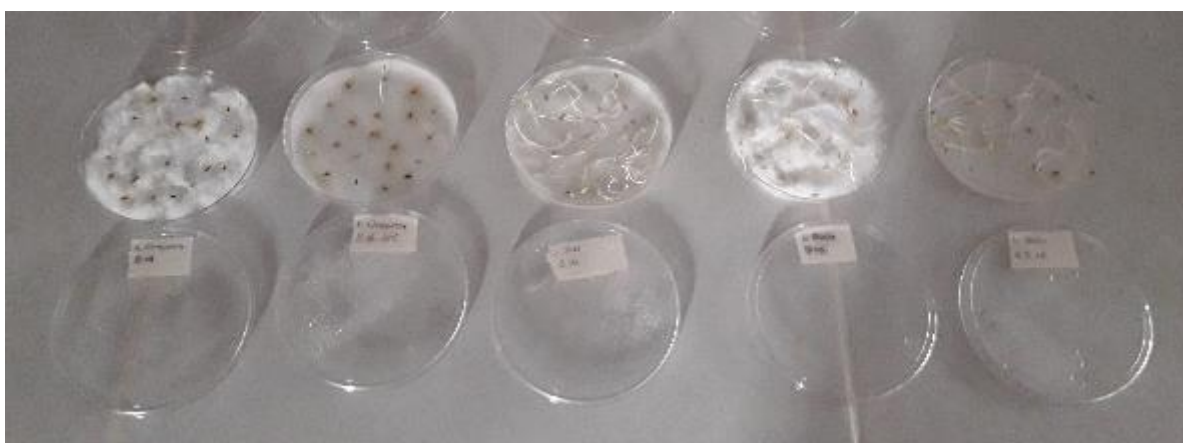
De las especies recomendadas por la agencia de protección ambiental de los EE.UU se eligió la lechuga por presentar un tiempo corto de germinación y temperatura optima de germinación en el rango de la especificada por la guía de pruebas toxicológicas, así como ser de fácil adquisición local y cumplir con las características especificadas en la guía mencionada, principalmente libre de cualquier tratamiento, a diferencia de otras especies disponibles en el mercado local como tomate, pepino, cebolla y rábanos con tratamiento de thiram, así mismo el porcentaje de germinación de 94% obtenido en las pruebas preliminares desarrolladas con agua purificada la hizo apta para su elección.

ESPECIE	TEMPERATURA DE GERMINACIÓN (°C)	TIEMPO DE GERMINACIÓN (DÍAS)
Tomate	20-25	7-10
Pepino	>30	4-6
Lechuga	20-25	4-6
Repollo	25-30	7-10
Cebolla	25-30	4-6
Maíz	25-30	4-6
Rábano	20-25	1-3
Zanahoria	25-30	7-10

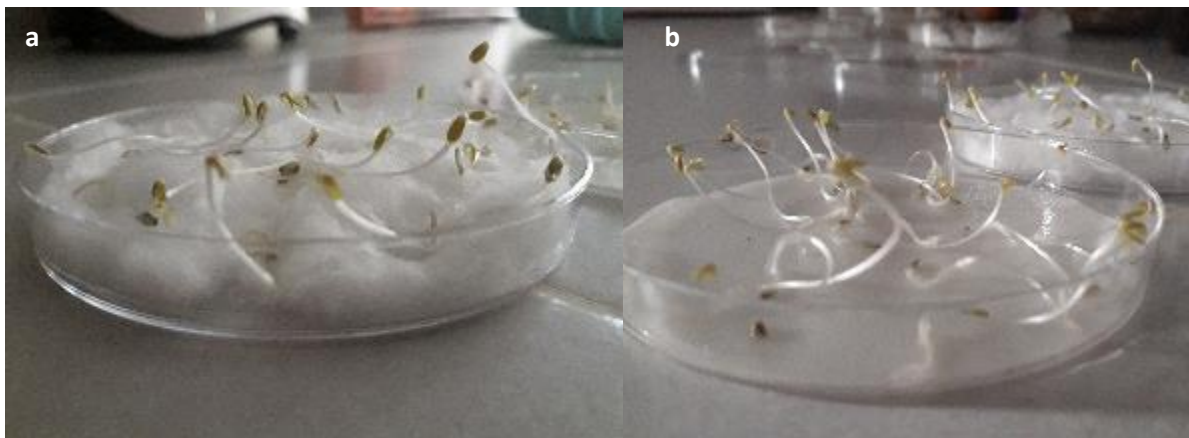
Elaboración propia con datos de: <https://www.ecoagricultor.com/temperatura-tiempo-germinacion-semilla/>

**Tabla 2.** Temperaturas y tiempo de germinación de especies hortícolas recomendadas para bioensayos de toxicidad por la USEPA.

Previo a la implementación de las pruebas definitivas se realizaron ensayos preliminares con dos variedades de lechuga: iceberg y longifolia (imagen 4), de las cuales la variedad iceberg resulto la más apta debido a un mayor porcentaje de germinación a pesar de que en las especificaciones del fabricante la variedad longifolia figura con un 88%, 1% más que lo especificado para la variedad iceberg; también fueron probados algodón y papel filtro como medios de soporte (imagen 5), de donde se eligió el papel filtro ya que el algodón presentaba dificultades a la hora de disponer de las plántulas; adicionalmente se ensayaron diferentes cantidades de muestra añadida determinándose los 3 ml como la cantidad ideal.



**Imagen 4.** Ensayo preliminar con dos variedades de lechuga en diferentes medios de soporte



**Imagen 5.** Semillas de lechuga germinadas sobre algodón (a) y papel filtro (b)

Las muestras de agua, consistentes en 3 ml para cada replica, fueron tomadas directamente del destilador y usadas inmediatamente después de su extracción.

Los bioensayos definitivos fueron desarrollados de acuerdo a la técnica de Sobrero y Ronco (2004) con semillas de lechuga variedad icerberg o tipo bola de calidad comercial pertenecientes al lote T481 de Rancho los molinos, con un índice de germinación indicado del 87%, el cual, sin embargo, fue mayor al 90% para el control tanto en las pruebas preliminares como definitivas.

#### **4.4. Diseño experimental**

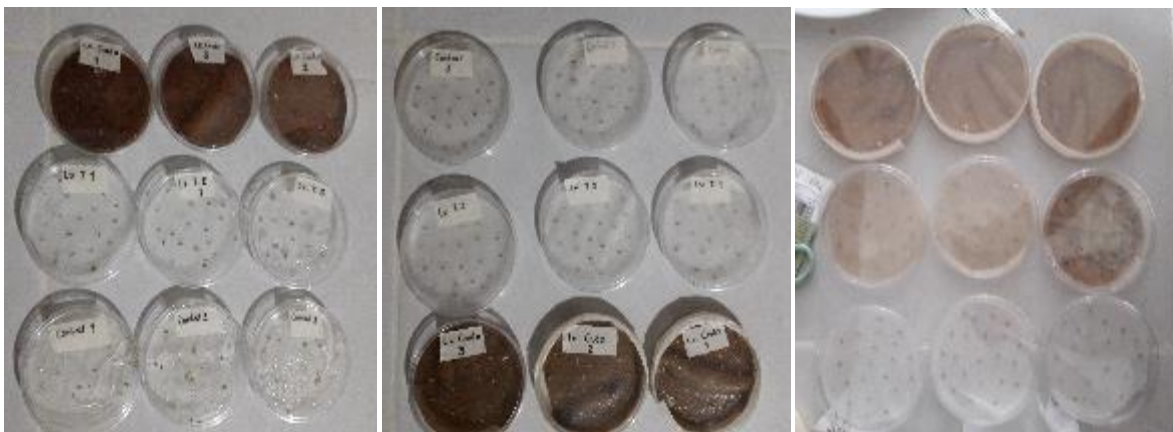
Veintidós semillas elegidas de acuerdo a un tamaño, forma y color uniformes fueron colocadas en cajas Petri de plástico de 90 mm de diámetro sobre papel filtro de 8  $\mu$ m de tamaño de poro y luego regadas con 3 ml de cada muestra; las cajas fueron colocadas durante 5 días (120 h) en oscuridad a  $24 \pm 1$  °C.

El diseño experimental elegido fue un arreglo de 3x2 el cual es representado por 3 variables independientes consistentes en las muestras de agua estudiadas: lixiviado tratado con el destilador solar (Destilado 1), lixiviado tratado en un sistema seriado de doble destilación (Destilado 2) y lixiviado tratado con el sistema seriado de doble destilación más adición de 5 gramos de abono (Destilado 2+Abono); y como variables de salida o dependientes se toman las dos más significativas durante la realización del proyecto, siendo, Índice de germinación normalizado (IGN) e Índice de elongación radical normalizado (IRN).

Como variables de control se utilizaron agua purificada (Control Negativo) y lixiviado crudo (Control positivo), se emplearon un total de 594 semillas divididas en tres grupos, utilizando los dos primeros grupos para las variables de control y al último grupo se subdividió en tres, con un total de 66 semillas cada uno utilizados con las variables de entrada.

Se llevaron a cabo tres ensayos -uno por cada muestra de agua- los cuales se efectuaron realizando el montaje mostrado en la Figura 2 e imagen 6.

La figura 3 muestra un esquema general de todo el proceso desarrollado que se complementa con las siguientes constantes:



**Imagen 6.** Desarrollo de los bioensayos, donde se muestran los tres tratamientos probados; de izquierda a derecha destilado 1, destilado 2 y destilado 2+ abono.

- Número de semillas expuestas, 22 por cada caja.
- Tiempo de exposición (120 horas), ya que se evalúa la toxicidad aguda.
- Volumen de muestra que se adiciona a las semillas expuestas (3ml), y,
- Fotoperiodo de oscuridad, ya que además de los principales factores requeridos para la germinación como temperatura, humedad y oxígeno, la luz es también un factor que puede intervenir en el proceso porque actúa de diferentes formas sobre la germinación (Osuna, Osuna Fernández, & Fierro, 2017), cuando la luz incide positivamente en la germinación, se dice que las semillas tienen fotoblastismo positivo; en cambio, si la germinación se ve inhibida en presencia de luz, estas tienen fotoblastismo negativo, entre las especies fotoblásticas negativas se encuentra la lechuga (Ronco, Beltrano, & Daniel, 2011) por lo que el desarrollo de los ensayos se llevó a cabo en ausencia de luz.

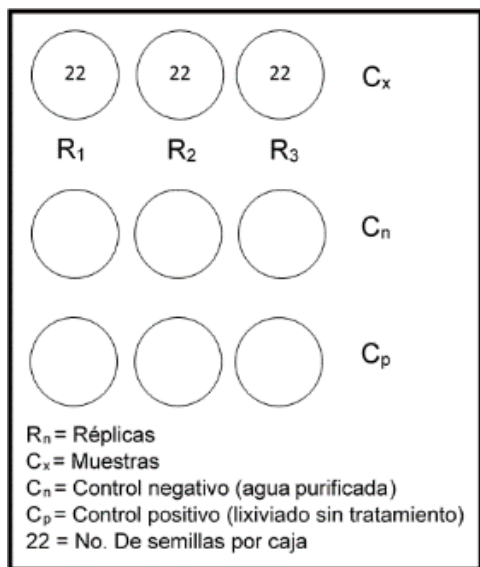


Figura 2. Estructura de cada uno de los ensayos realizados.

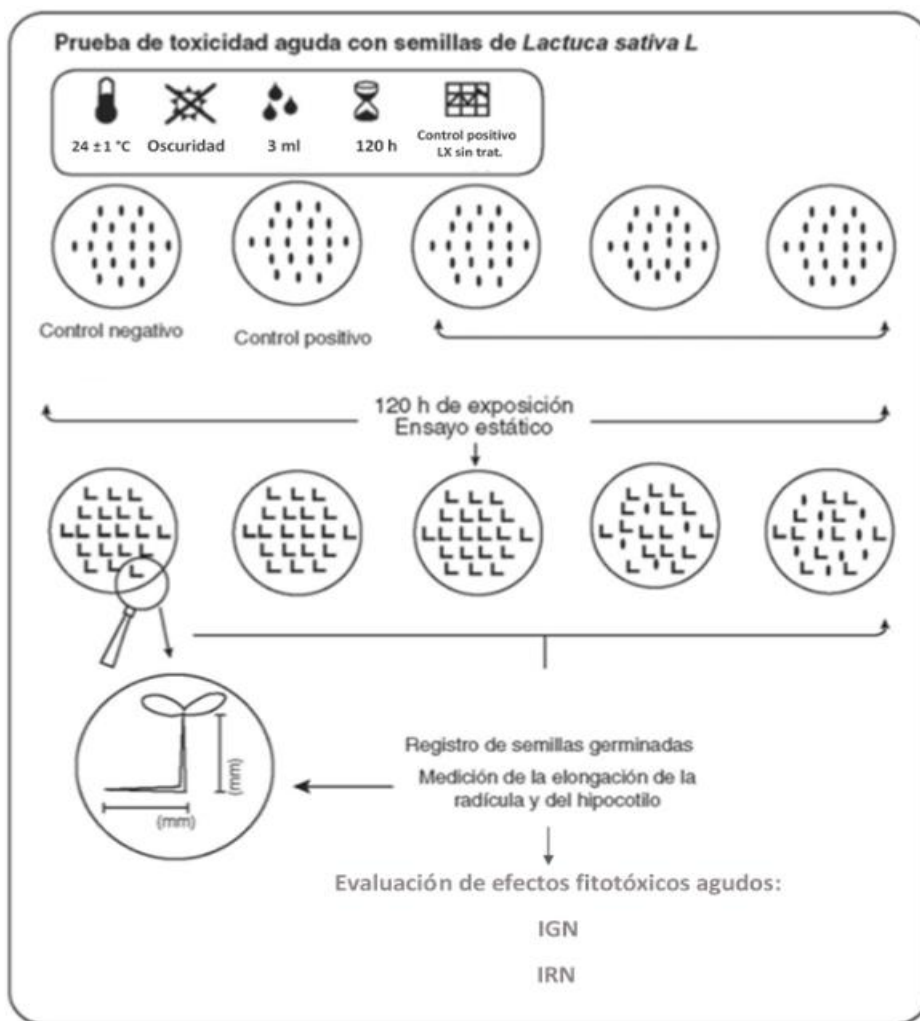


Figura 3. Esquema general del desarrollo del bioensayo.

#### **4.5. Análisis de variables respuesta.**

Finalmente, los resultados obtenidos se expresaron como porcentaje de germinación relativa de semillas (GRS), crecimiento relativo de radícula (CRR) e índice de germinación (IG) de acuerdo a Mañas & Heras (2017) y Priac et al. (2017) mediante las siguientes expresiones:

##### **4.5.1. Porcentaje de germinación relativa de semillas (GRS)**

$$GRS (\%) = \frac{\text{Número de semillas germinadas en la muestra}}{\text{Número de semillas germinadas en el control}} \times 100$$

Donde GRS, representa el porcentaje de semillas germinadas en el agua de las diferentes muestras de estudio con respecto a aquellas germinadas en el control.

##### **4.5.2. Crecimiento relativo de la radícula (CRR)**

$$CRR (\%) = \frac{\text{Longitud promedio de radícula en la muestra}}{\text{Longitud promedio de radícula en el control}} \times 100$$

Donde CRR, representa el porcentaje de crecimiento de la radícula de las semillas expuestas a las diferentes muestras de estudio con respecto a aquellas del control.

##### **4.5.3. Índice de germinación.**

$$IG = \frac{GRS \times CRR}{100}$$

El IG representa el producto de la germinación relativa de las semillas por el crecimiento relativo de la radícula. Constituye un indicador de la interacción de los factores que promueven o inhiben la germinación, así como de los respectivos factores que favorecen o impiden el crecimiento de la radícula. Este índice expresa tanto el porcentaje de semillas germinadas como el porcentaje de crecimiento que alcanza la radícula durante el bioensayo (Rodríguez et al., 2014).

Valores de IG mayores o iguales a 80% indican que no hay sustancias fitotóxicas o estas se encuentran en muy bajas concentraciones, valores de IG menores o iguales a 50% indican una fuerte presencia de sustancias fitotóxicas mientras que

valores comprendidos entre 50 y 80% pueden indicar una presencia moderada de estas sustancias (Mañas & De las Heras, 2017).

Adicionalmente, los datos fueron usados para determinar dos índices de toxicidad: índice del porcentaje de germinación residual normalizado (IGN) y de elongación radical residual normalizado (IER), de acuerdo con Bagur et al. (2011).

#### **4.5.4. Índice del porcentaje de germinación residual normalizado (IGN)**

$$IGN = \frac{PGM \times PGC}{PGC}$$

Donde PGM es el porcentaje promedio de semillas germinadas en cada muestra y PGC es el porcentaje de semillas germinadas en el control.

#### **4.5.5. Índice de elongación radical residual normalizado (IER)**

$$IER = \frac{ERM \times ERC}{ERC}$$

Donde ERM es la longitud promedio de la radícula de las semillas germinadas en cada muestra, y ERC es la longitud promedio de la radícula de las semillas germinadas en el control.

Ambos índices están diseñados de tal manera que sus valores pueden variar de -1 (fitotoxicidad máxima) a > 0, lo que permite establecer la siguiente escala: (a) 0 a -0,25 baja toxicidad, (b) -0,25 a -0,5 moderada, (c) -0,5 a -0,75 alta y (d) -0,75 a -1 muy alta. Valores de IER > 0 indicarían estimulación del crecimiento de la radícula (hormesis) (Bagur et al. 2011).

## **4.6. Determinación de color**

El término color, aplicado a muestras de agua, se refiere al valor numérico expresado en porcentaje de luminancia, pureza, longitud de onda dominante y tono que se obtiene de la medición de la luz transmitida después de eliminar sólidos suspendidos y partículas (NMX-AA-17-1980) norma que establece método de prueba espectrofotométrico para la determinación de color en aguas.

Su medición se basa originalmente en la comparación con los estándares de color existentes, como ejemplos reales, tablas, etc. Y para ello existen diversas escalas de color.

### **4.6.1. Escala APHA (American Public Health Association) o Pt/Co**

Generalmente para evaluar los niveles de contaminación en las aguas residuales y para el control del agua potable, se utiliza una escala de color específica, llamada escala Pt/Co, con un rango de 0 a 500 en ppm (partes por millón) de cobalto de platino a agua destilada, que es el punto cero (también llamado agua blanca) (Optek, s.f.).

### **4.6.2. Sistemas de Color CIE**

La CIE o Commission Internationale de l'Eclairage (que se traduce como Comisión Internacional de la Iluminación) es la institución responsable de las recomendaciones internacionales para la fotometría y colorimetría.

Esta comisión desarrolló dos importantes sistemas para la evaluación de color en términos de números, basados en la medición de reflectancia espectral de una muestra dada, dichos sistemas usan tres coordenadas para ubicar un color en un espacio de color, el primer sistema creado en 1931, está basado en la teoría que establece que el ojo humano posee receptores de los tres colores primarios: rojo, verde y azul y todos los colores son mezclas que se derivan de ellos;

Estos tres números son los llamados valores triestímulo X, Y, Z y no constituyen colores reales sino una estructura matemática (La guía metas, 2009; García Alonso, 2016).



El segundo sistema creado en 1976 es referido a los espacios de color  $L^* a^* b^*$ , siendo estos sistemas los más utilizados en la actualidad por los instrumentos de medición de color (X-Rite Incorporated, 2002; La guía metas, 2009).

El espacio de color  $L^* a^* b^*$ , es actualmente la referencia estándar para evaluar el color de un objeto, es ampliamente usado porque correlaciona los valores numéricos de color consistentemente con la percepción visual humana. Investigadores lo usan para expresar precisamente sus resultados a otros en términos numéricos (Konica Minolta, S. f.).

CIE  $L^* a^* b^*$  describe todos los colores visibles, utilizando un espacio tridimensional (ver figura 4), la luminosidad  $L^*$  se coloca verticalmente sobre la capa de color  $a^* b^*$  -el brillo crece con la altura, pero no es perceptible en representaciones bidimensionales por ser el de menor relevancia (García Alonso, 2016)-  $a^*$  representa las coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde) y  $b^*$  las coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul) (Konica Minolta, S. f.).

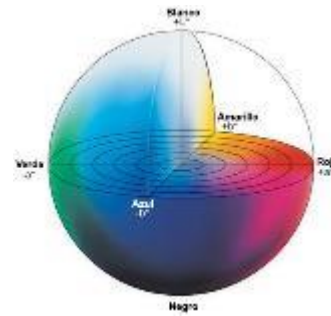


Figura 4. Espacio de color CIE  $L^* a^* b^*$

Las ventajas más importantes son la evaluación del color independiente del dispositivo de prueba, bajo condiciones estándar definidas y reproducibles (Optek, s.f.).

#### 4.6.2.1. Cálculo de las coordenadas a partir de $R(\lambda)$

Nuestros ojos requieren tres cosas para ver color: una fuente de luz, un objeto y un observador/procesador, lo mismo debe ser cierto para un instrumento que vea color. Los instrumentos de medición de color reciben el color de la misma manera que lo reciben nuestros ojos: mediante la captación y filtrando las longitudes de onda de la luz **reflejada** por un objeto. El instrumento percibe las longitudes de onda de la luz reflejada como valor numérico. Estos valores se registran como puntos dentro del espectro visible y se llaman datos espectrales. Los datos espectrales se representan como una curva espectral. Esta curva es la huella digital del color (figura 5).

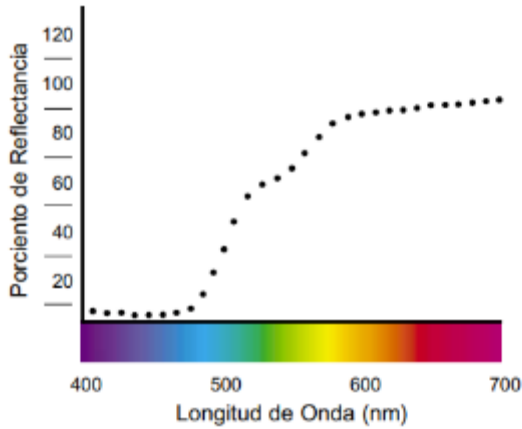


Figura 5. Curva espectral de una muestra medida

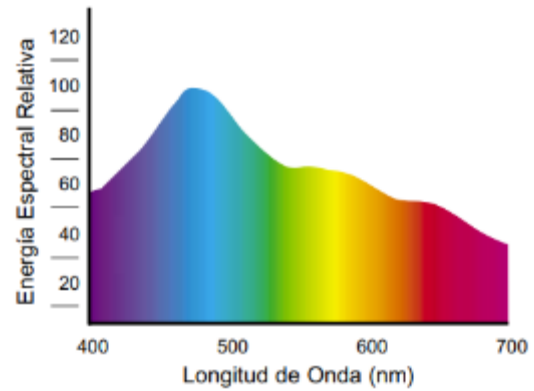


Figura 6. Luz de día iluminante estándar (D65/10°)

Una vez obtenida la curva de reflectancia sus valores son multiplicados por los datos de un iluminante estándar CIE (ej. Figura 6). El iluminante es una representación gráfica de la fuente de luz bajo la cual se ven las muestras. Cada fuente de luz tiene una distribución de energía que afecta el modo en que vemos el color. Como ejemplos de los diferentes iluminantes tenemos A – incandescente, D65 – luz de día (figura 6) y F2 – fluorescente.

Multiplicamos el resultado de este cálculo por cada una de las tres curvas que conforman el observador estándar CIE, dichas curvas son:  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ .

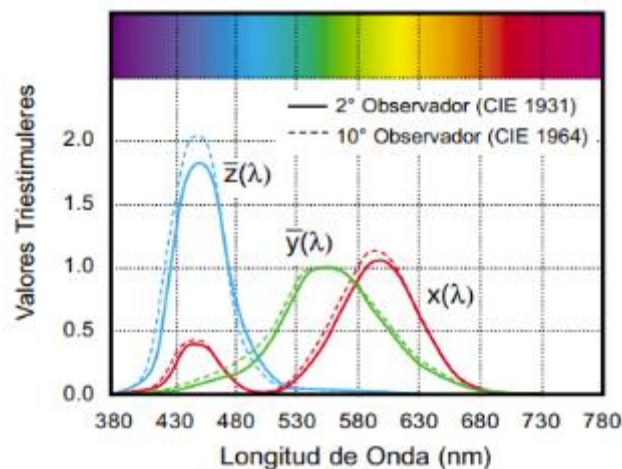
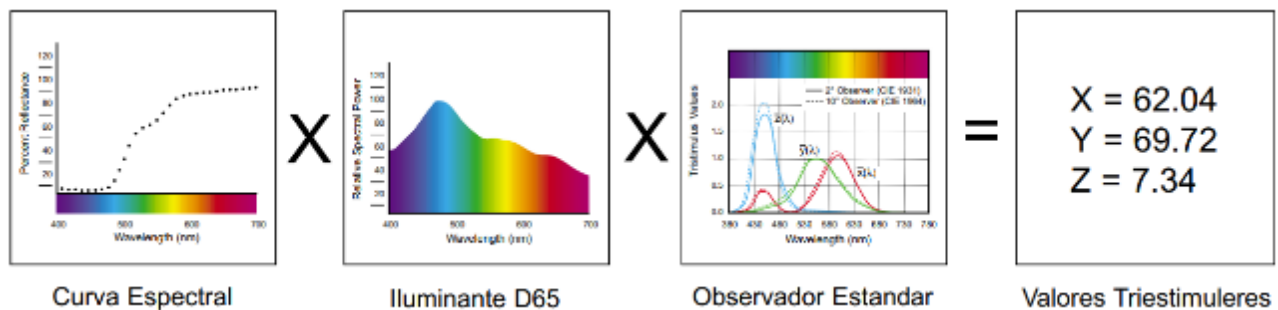


Figura 7: CIE 2° Y 10° observador estándar

El observador estándar se basa en la respuesta humana promedio a las longitudes de onda de la luz (Figura 7), es decir representa cómo la persona promedio percibe el color a través del espectro visible.

Una vez calculados estos valores obtenemos los triestímulo XYZ (figura 8) que pueden identificar el color numéricamente (Westland, 2001; X-Rite Incorporated, 2002; García Alonso, 2016).



**Figura 8.** Representación esquemática del paso de reflectancias a valores triestímulo

#### 4.6.2.2. Coordenadas de cromaticidad (x, y) a partir de los valores triestímulo.

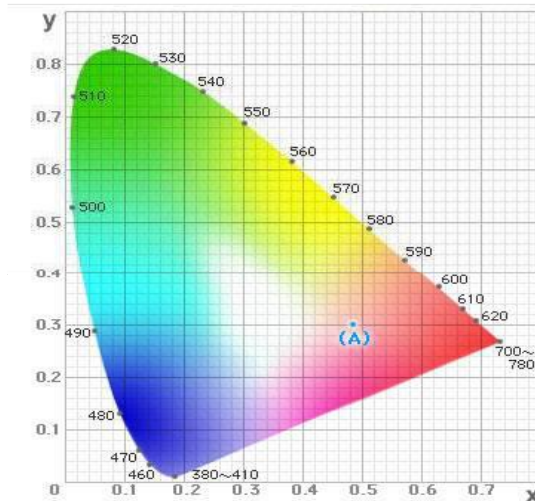
Los valores triestímulo XYZ son importantes para definir el color, pero los resultados no son fáciles de visualizar. Debido a esto, la CIE definió un espacio de color para graficar el color en dos dimensiones independientes de luminosidad; esto es el espacio de color Yxy en el cual Y es la luminosidad y x e y son las coordenadas cromáticas calculadas del valor triestímulo XYZ. Las coordenadas cromáticas x e y se obtienen a partir de los valores triestímulo por medio de la transformación proyectiva:

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

Siendo la cromaticidad total  $x + y + z = 1$

De esta manera un color puede mostrarse en un sistema cartesiano llamado diagrama de cromaticidad (figura 9) como un punto de coordenadas (x,y).



**Figura 9.** Diagrama de cromaticidad CIE para coordenadas (x, y).

#### 4.6.2.3. Diferencias de Color.

Aún si dos colores parecen los mismos a una persona, se pueden encontrar diferencias ínfimas cuando son evaluados con un instrumento de medición de color.

La diferencia de color es definida como la comparación numérica de una muestra con el estándar. Indica las diferencias en coordenadas absolutas de color y se la conoce como Delta ( $\Delta$ ). Deltas por  $L^*$  ( $\Delta L^*$ ),  $a^*$  ( $\Delta a^*$ ) y  $b^*$  ( $\Delta b^*$ ) pueden ser positivas (+) o negativas (-).

La diferencia total, Delta E ( $\Delta E^*$ ), sin embargo, siempre es positiva. Éstas son expresadas como:

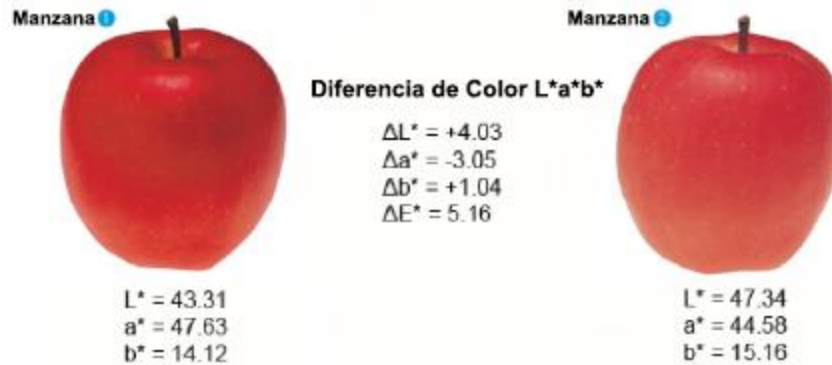
$\Delta L^*$  = diferencia en luz y oscuridad (+ = más luminoso, - = más oscuro)

$\Delta a^*$  = diferencia en rojo y verde (+ = más rojo, - = más verde)

$\Delta b^*$  = diferencia en amarillo y azul (+ = más amarillo, - = más azul)

$\Delta E^*$  = diferencia total de color

Un ejemplo de dicha diferencia es el presentado en la figura 10:



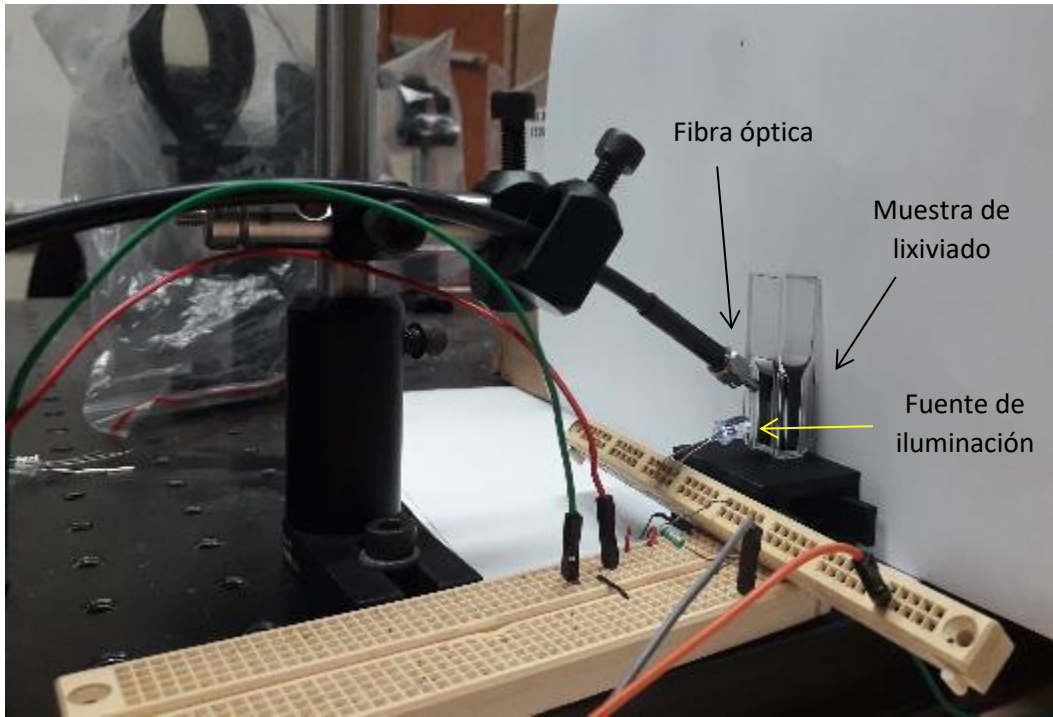
**Figura 10.** Diferencia de color L\* a\* b\* en dos manzanas.

Para determinar la diferencia total de color entre las tres coordenadas, se usa la siguiente fórmula:

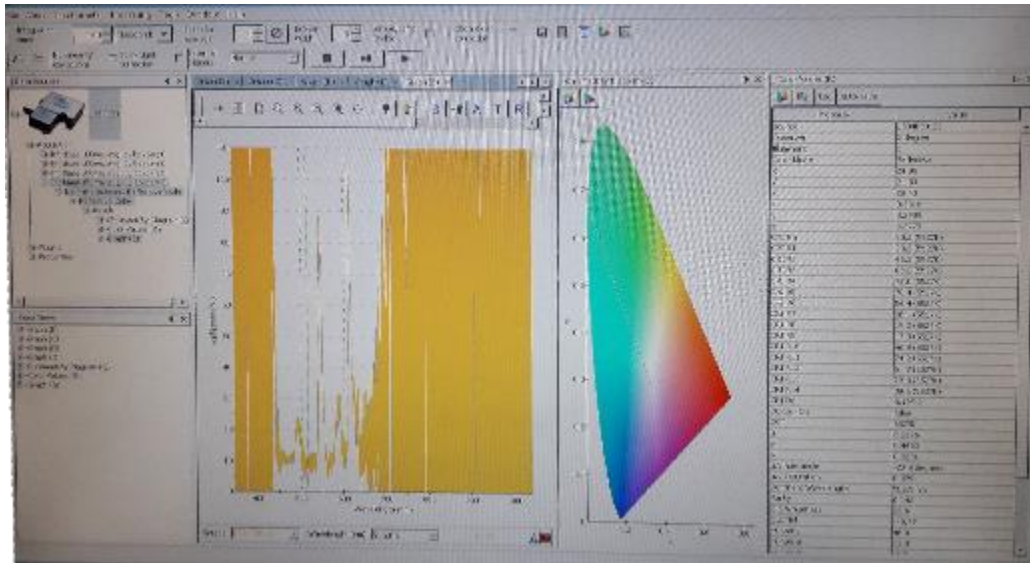
$$\Delta E^* = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2} \text{ (Konica Minolta, S. f.)}$$

Para generar la curva espectral de cada muestra, se utilizó el espectrómetro ocean optics USB4000 con resolución de 344 a 1040 nm, las muestras fueron colocadas en cuvettes de plástico en el arreglo mostrado en la imagen 7 donde puede apreciarse que la fuente y la fibra óptica (conectada al espectrómetro) se colocan frente a la muestra -esta se encuentra a su vez sobre un fondo blanco ya que dicho color devuelve por reflexión casi íntegramente la radiación recibida para todas las frecuencias (Rela, 1991)- para recibir los datos de reflectancia.

El software utilizado para las mediciones fue Ocean Optics SpectraSuite en el cual se configuro el iluminante C por ser el que mejor se ajustaba a la luz emitida por el led, con el observador 2, al exponer la muestra a la luz, la fibra óptica recibe y transmite los valores de reflectancia al espectrómetro y este a su vez al software el cual arroja los valores de cromaticidad, coordenadas x, y, z y L, a, b para ser representadas gráficamente (ver imagen 8).



**Imagen 7.** Arreglo para generar la curva espectral de cada tipo de agua.



**Imagen 8.** Interfaz del software Ocean Optics SpectraSuite donde se observan de izquierda a derecha la gráfica del porcentaje de reflexión para cada longitud de onda, la ubicación del color medido en el diagrama de cromaticidad y por último los valores de color obtenidos para cada uno de los espacios de color.

## 4.7. pH

La medición de pH se llevó a cabo con la utilización de tiras reactivas, sumergiendo el papel indicador en cada una de las muestras a analizar durante unos dos segundos.

Transcurridos 10 segundos fueron comparados los colores obtenidos en la tira sumergida con los de la escala de colores de pH, determinando así la acidez o alcalinidad de la muestra tanto a la entrada como a la salida.

## 5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

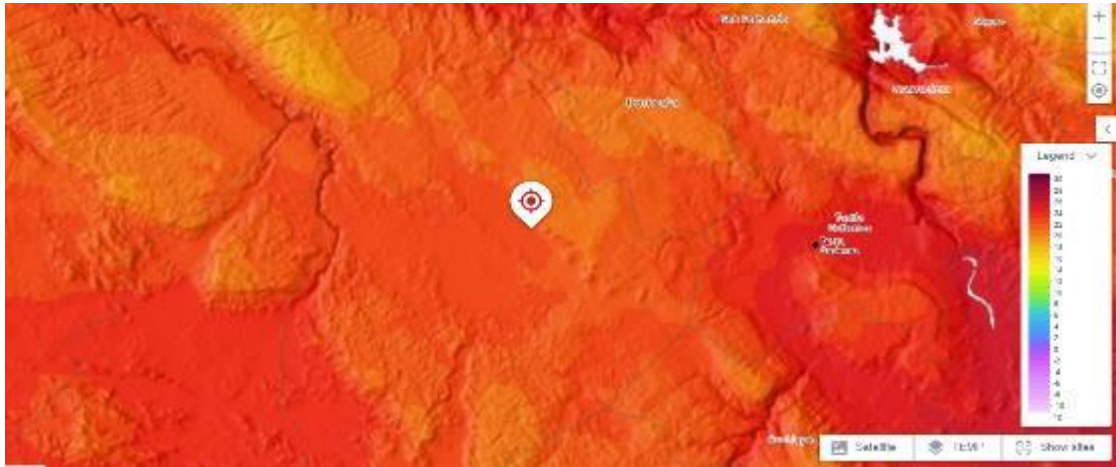
### 5.1 Productividad del destilador

De acuerdo a la forma del prototipo de destilador usado en la investigación, se obtuvo un promedio de 31 ml de destilado por día en un área de 0.0095 m<sup>2</sup> alcanzando así una productividad de 3.255 l/m<sup>2</sup>-día lo que lo sitúa dentro de la productividad alcanzada por un destilador común de tipo caseta como menciona Hermosillo (1999).



**Figura 11.** Radiación global directa en Ocozocoautla de Espinosa, según Global Solar Atlas.

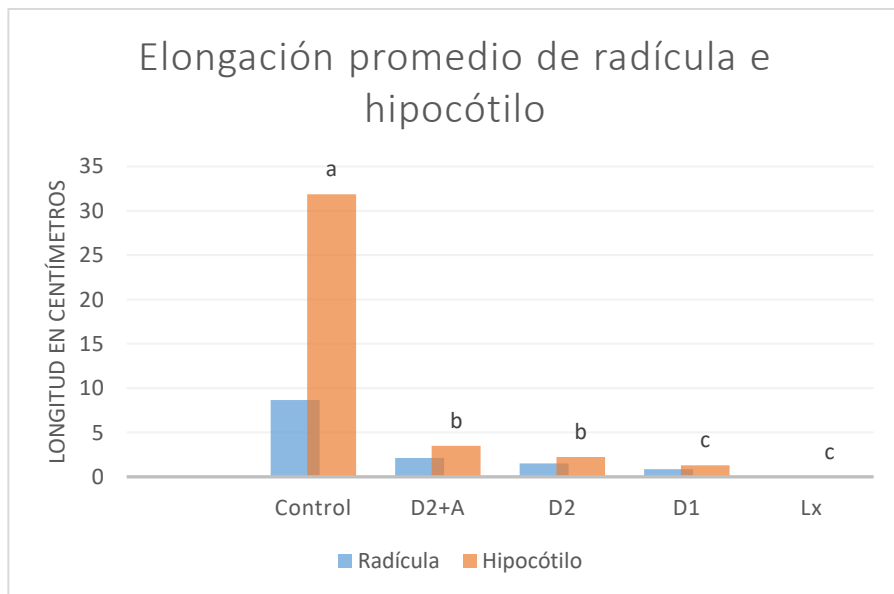
En relación a la radiación promedio en el lugar, según el sitio GLOBAL SOLAR ATLAS esta se encuentra alrededor de los 1710 kWh/m<sup>2</sup> anuales (figura 8) lo que representa un promedio de 390 W/m<sup>2</sup> diarios, mientras que las temperaturas alcanzan un promedio de 22.3 °C anuales (Figura 11).



**Figura 12.** Promedio de temperatura anual alcanzado en Ocozocoautla de Espinosa, según Global Solar Atlas.

## 5.2 Bioensayos de toxicidad

Para la realización de los tres ensayos definitivos se utilizaron un total de 594 semillas de lechuga, de las cuales, 198 pertenecientes al control positivo no iniciaron el proceso de germinación, en relación al crecimiento de radícula e hipocótilo, ninguna muestra destilada permitió crecimiento similar al alcanzado con el control negativo, sin embargo, cuando los datos fueron sometidos a ANOVA seguido de la comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  se encontraron diferencias significativas entre los destilados dos y el lixiviado crudo, pero no así entre lixiviado crudo y destilado uno como puede apreciarse en la gráfica 1.

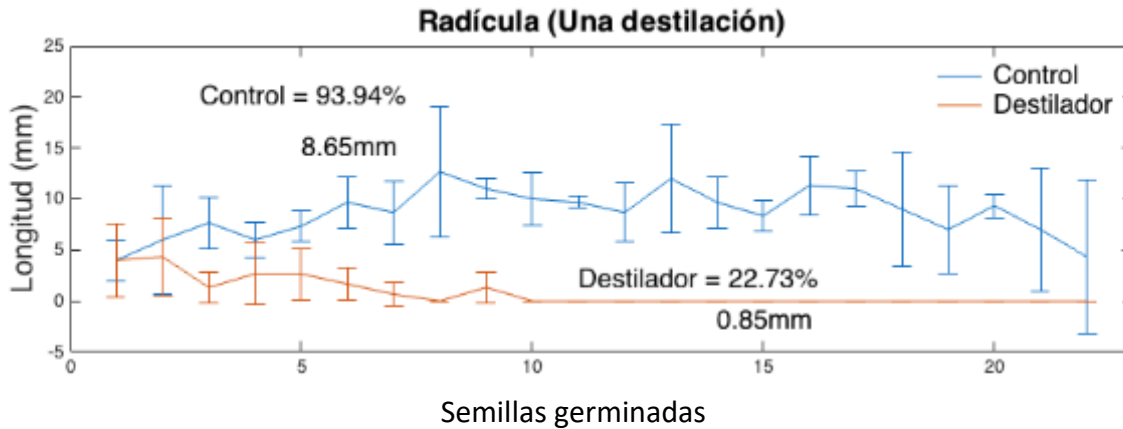


**Grafica 1.** Promedio de elongación de radícula e hipocótilo en muestras y control positivo y negativo (diferentes letras indican diferencias significativas).



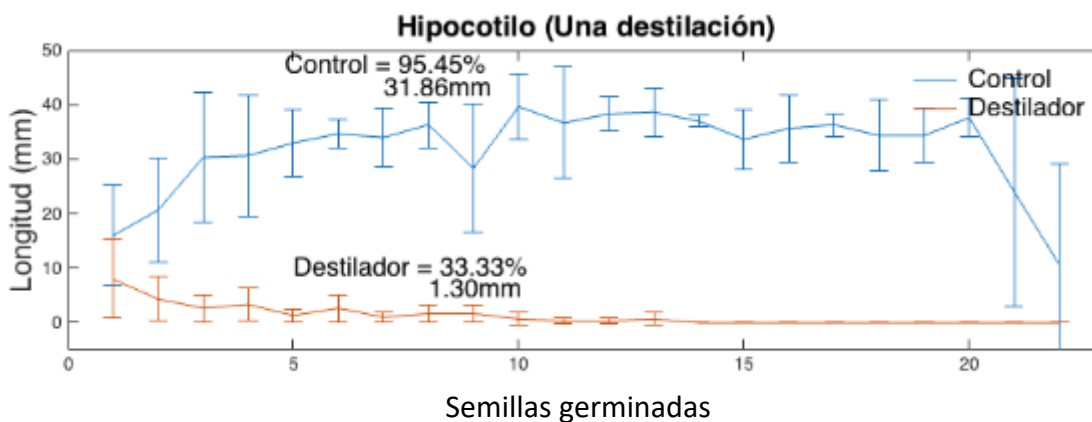
A pesar de que se observan mejoras a medida que el nivel de tratamiento es mayor la especie resultó muy sensible al efluente aplicado para su germinación.

### 5.2.1 Muestra tratada una destilación



**Gráfica 2.** Número de semillas germinadas en control y muestra con una destilación y elongación de radícula.

La gráfica dos, presenta el número de semillas germinadas y la longitud de raíz alcanzada en el control y en la muestra con una sola destilación, puede verse que el número de semillas germinadas en la muestra tratada alcanza casi el 50% de las obtenidas en el control; sin embargo, la longitud de la raíz es mucho menor que la del control, que representa aproximadamente 10 veces el valor de la muestra.

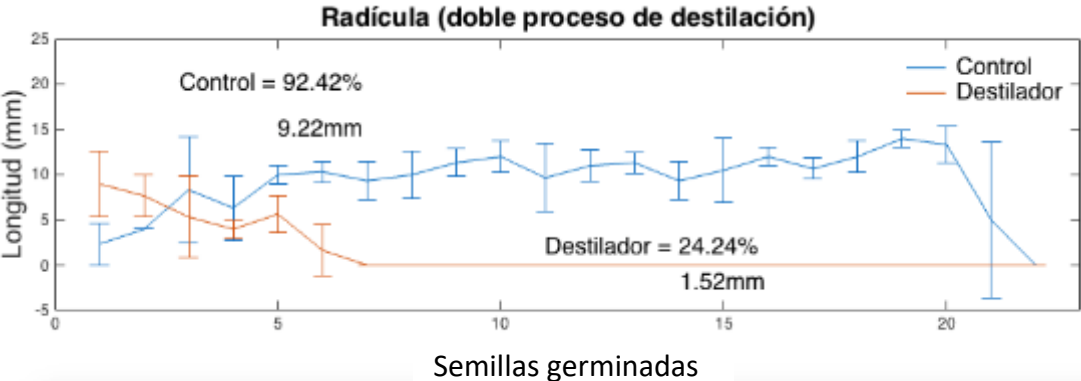


**Gráfica 3.** Longitud de hipocótilo en control y muestra con una destilación.

En la gráfica tres se presenta el crecimiento de hipocótilo en control y muestra con una sola destilación, a diferencia del crecimiento de radícula puede observarse que se obtuvo crecimiento en más del 50% de las semillas expuestas a la muestra, estos

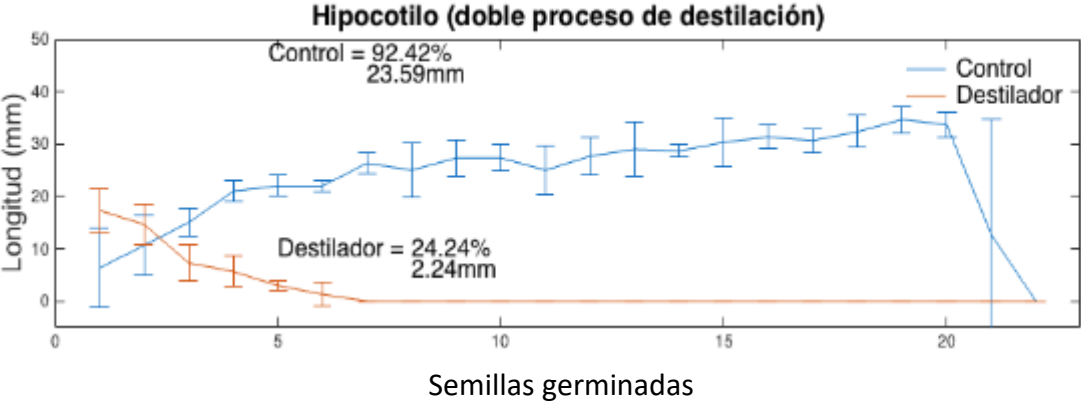
resultados son similares a los reportados por Mañas & De las Heras (2017) quienes indican una gran longitud de hipocotilo con la aplicación de lodos de depuradora en contraste con una longitud de raíces en decremento. A pesar de esta diferencia de crecimiento con la radícula, el promedio de crecimiento de hipocótilo respecto al control es menor, para este parámetro la diferencia es más evidente puesto que el control alcanza más de 24 veces la longitud alcanzada por las semillas regadas con la muestra de una sola destilación.

**5.2.2. Muestra tratada. segunda destilación**



**Gráfica 4.** Número de semillas germinadas en control y muestra con dos destilaciones y elongación de radícula.

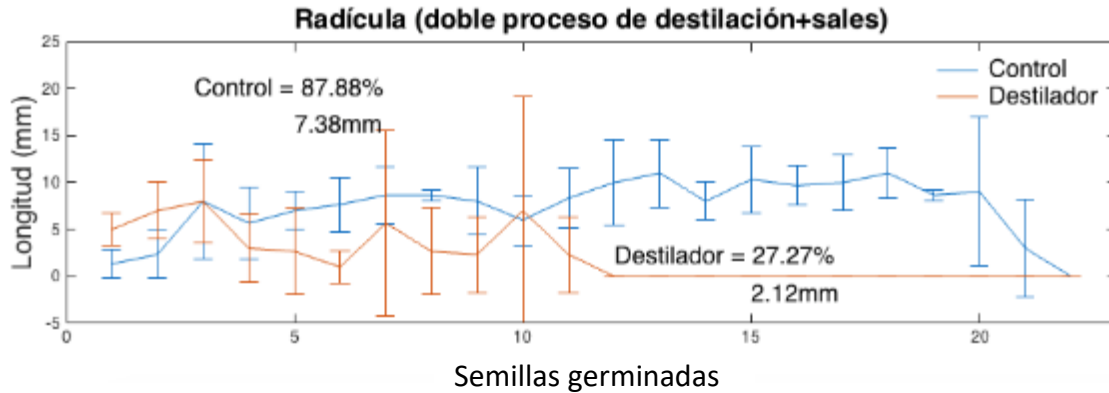
En la gráfica cuatro puede observarse el número de semillas germinadas cuando fueron regadas con la muestra sujeta a doble destilación, en color rojo, este número (6) fue menor al obtenido con una sola destilación (8) pero presenta mayores longitudes alcanzadas respecto al control, reduciendo la diferencia de 10 a 6 veces.



**Gráfica 5.** Longitud de hipocótilo en control y muestra con doble destilación.

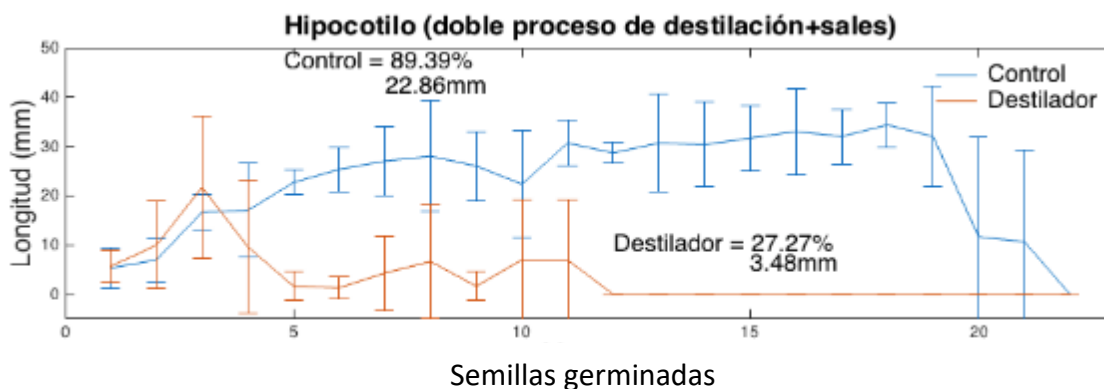
En la gráfica cinco se muestra el crecimiento del hipocótilo en semillas germinadas con muestras de doble destilación y agua purificada, como en la radícula, también se observa una disminución en la diferencia existente entre muestra y control respecto a los resultados observados en muestras con una sola destilación, pasando de 24 a 10 veces.

### 5.2.3. Muestra tratada. segunda destilación más sales



**Gráfica 6. Número de semillas germinadas en control y muestra con doble destilación más abono y elongación de radícula.**

En la gráfica seis se observa que al agregar sales a la muestra estudiada se produce un incremento en el número de semillas germinadas así como en el promedio de elongación de radícula reduciendo la diferencia observada en las muestras anteriores, específicamente de 10 y 6 veces observada en muestras con una y dos destilaciones solo, a menos de 4 veces, esto puede ser un indicativo de que al elevar el nivel de destilación del lixiviado son sustraídas gran cantidad de las sustancias contenidas, tanto perjudiciales como benéficas.



**Gráfica 7.** Longitud de hipocótilo en control y muestra con doble destilación.

En la gráfica siete se observa el crecimiento de hipocótilo en las semillas germinadas el cual también alcanzó un promedio mayor al de las dos muestras anteriores (una y dos destilaciones solo), pasando de 24 y 10 veces de diferencia respecto al control, a menos de siete veces.

Después de analizar la información correspondiente a cada muestra se observa que el promedio de elongación tanto de radícula como hipocótilo presenta una mejora progresiva, así como también el porcentaje de germinación, para el cual, las diferencias entre control y muestra se reducen en cada etapa alcanzando una diferencia mínima del 62.12% correspondiente a la muestra con doble destilación más abono, al igual que para las longitudes de radícula con una diferencia mínima alcanzada de 5.26 cm.

#### 5.2.4. GRS, CRR e IG.

La tabla 3 presenta los valores del porcentaje de germinación y crecimiento relativos obtenidos con cada muestra, así como los índices de toxicidad determinados para cada una de ellas; puede notarse un incremento en cada una de las variables respuesta a medida que se mejora el tratamiento, cabe mencionar que al aplicar el lixiviado crudo todas las variables respuesta tuvieron un valor de cero.

Para el caso del porcentaje de germinación relativa de semillas, se alcanza un valor máximo de 30% con el destilado más abono y el valor mínimo de 24.5% con la muestra de una sola destilación.

En relación al crecimiento relativo de radícula expresado en porcentaje este inicia en alrededor del 10% para el destilado uno, alcanzando más del 16% para el destilado dos y finalmente casi 29% en la última etapa, estos representan buenos

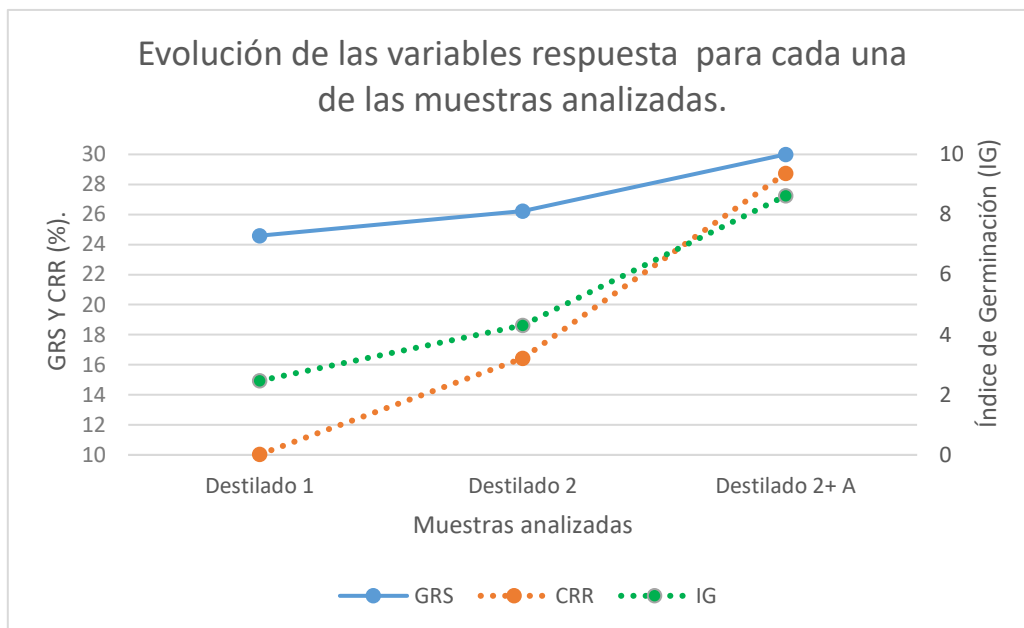
resultados considerando el origen del agua problema ya que incluso en aguas residuales tratadas, las cuales tienen una carga mucho menos contaminante que la de un lixiviado, se obtienen longitudes significativamente inferiores a la de los controles (Mañas & De las Heras, 2017).

Respecto al índice de germinación el incremento es aún más visible puesto que en cada etapa su valor es casi duplicado iniciando con un valor superior a las dos unidades, seguido de poco más de 4 y finalizando en más de 8.

Respuesta	Destilado 1	Destilado 2	Destilado 2+ A
GRS	24.59	26.23	30.00
CRR	10.04	16.43	28.75
IG	2.47	4.31	8.62
Long. hipocotilo	1.37	2.35	3.65
Long. radícula	0.89	1.59	2.22
IGN	-0.75	-0.74	-0.70
IER	-0.90	-0.84	-0.71

**Tabla 3.** Valores de las variables respuesta obtenidos para cada muestra, donde Destilado 2+A es la muestra de lixiviado con dos destilaciones más abono.

En la gráfica ocho se representan los resultados mostrados en la tabla 3 para tres variables respuesta analizadas, la primera de ellas es la germinación relativa (GRS) expresada en porcentaje, iniciando con casi 23% para la muestra con una destilación seguida de 26% en la muestra con 2 destilaciones y finalmente con 30% en la de dos destilaciones más abono; como segundo punto se analiza el crecimiento relativo de radícula (CRR) también expresado en porcentaje, y va de 10 pasando por 16 hasta llegar a 28%, este crecimiento no debe confundirse con la longitud alcanzada por las plántulas ya que en realidad representa el crecimiento alcanzado por las semillas regadas con cada una de las muestras respecto al control negativo; la última línea corresponde al índice de germinación, a pesar de sufrir un incremento como en las demás variables analizadas este índice nos indica que la relación entre la germinación y la longitud alcanzada por la radícula están muy lejos de las alcanzadas por el control, posicionando las muestras dentro de la categoría de toxicidad severa lo que puede estar indicando alguna sustancia inhibidora aun presente en el efluente del destilador como mencionan Bowers et al. (1997), además, como se menciona anteriormente, debido al nivel de destilación, es posible que hayan sido sustraídas en gran medida, sustancias benéficas como las sales.



**Gráfica 8.** GRS, CRR e IG para las muestras tratadas.

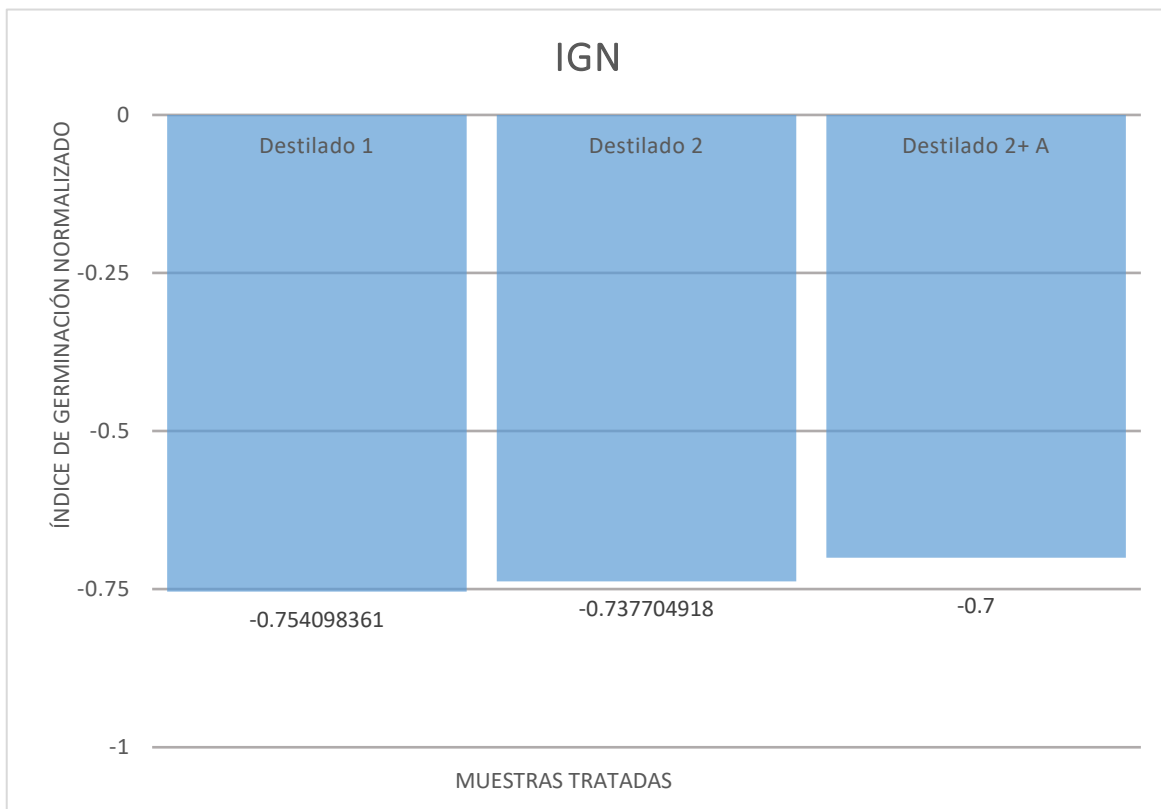
La pendiente positiva de las gráficas indica cambios positivos en las tres variables de salida, sin embargo, para este caso en particular, el crecimiento relativo de radícula (CRR) al presentar una pendiente más pronunciada señala mayores variaciones, lo cual es importante ya que el crecimiento radical es uno de los indicadores subletales más sensibles para la evaluación de efectos biológicos en vegetales (Sobrero & Ronco, 2004).

### **5.2.5. Toxicidad de las muestras analizadas según índice de germinación residual normalizado e índice de elongación radical normalizado**

En la gráfica nueve se observa el grado de toxicidad de cada una de las muestras analizadas de acuerdo a la germinación obtenida expresada como el índice de germinación normalizado (IGN), puede notarse que el destilado uno se encuentra ligeramente arriba del límite de la clasificación de toxicidad alta, lo que la sitúa como muy tóxica, por su parte el destilado dos se encuentra dentro de este límite (toxicidad alta) con un valor de -0.73, finalmente la tercer muestra cae en la misma clasificación de la muestra anterior pero esta vez con valor ligeramente mayor de -0.7, esta información permite inferir que el destilado del lixiviado tiene efectos positivos, pero no lo suficientemente grandes como para reducir su toxicidad a un valor aceptable, aunque debido a la falta de análisis fisicoquímico es posible que

sea la presencia de una sustancia específica la causante de esta respuesta en la especie como menciona Bowers et al. (1997).

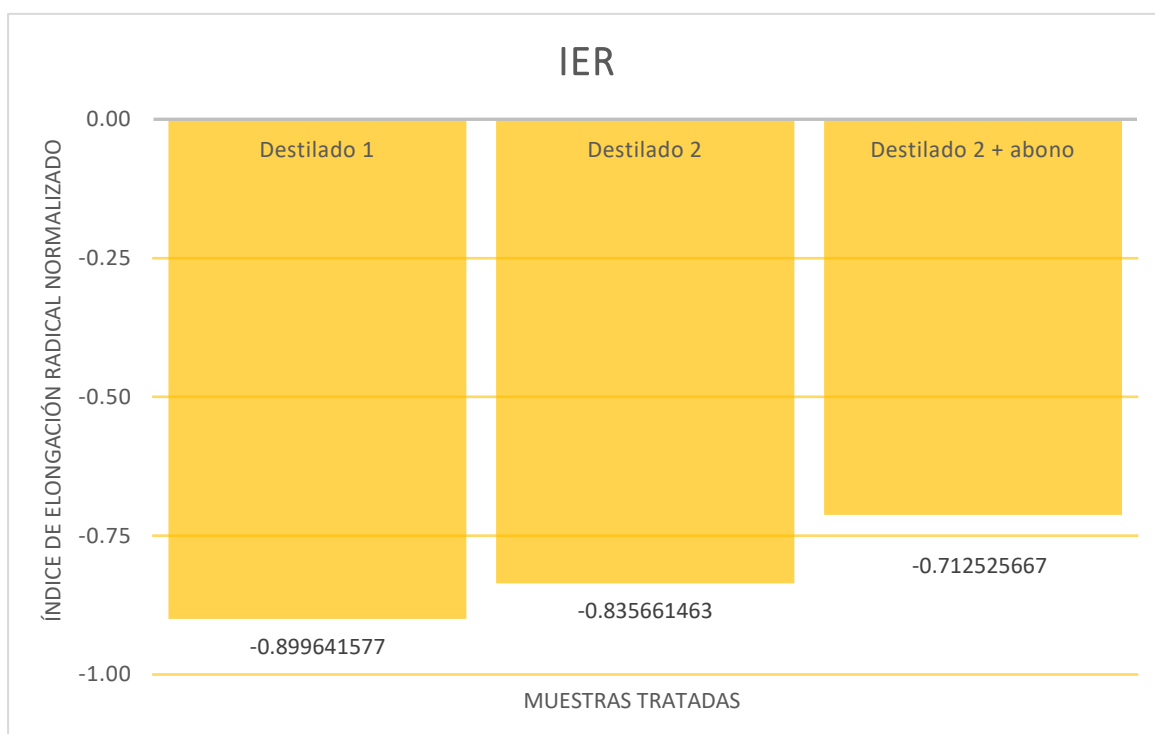
En la gráfica 10 se observa el grado de toxicidad de cada una de las muestras analizadas de acuerdo al crecimiento radical obtenido en referencia al control negativo, de acuerdo a este índice las muestras con una y dos destilaciones se clasifican como “muy tóxico” mientras que la muestra con doble destilación a la que se agregó abono se encuentra en toxicidad moderada, por lo que respecto a este índice la toxicidad del lixiviado sí fue reducida durante la destilación.



**Gráfica 9.** Porcentaje del Índice de Germinación Residual Normalizado para cada muestra tratada.

La evaluación de ambos índices permite corroborar lo mencionado por diversos autores como Bagur et al. (2011) y Wang (1990), los cuales mencionan que el crecimiento radical es un indicador más sensible que la germinación, puesto que en el presente estudio los valores de toxicidad para la semilla de acuerdo a este índice fueron mayores, a pesar de ello, la destilación de la muestra permitió reducir el nivel de toxicidad en 0.18 unidades, alcanzando un valor sumamente cercano al obtenido con el índice de germinación normalizado el cual inicio con un valor más bajo.

Estos resultados concuerdan a su vez con los obtenidos por Klauck, Rodriguez, & Silva (2015) quienes encontraron que los lixiviados de residuos sólidos municipales presentan fitotoxicidad, incluso después de una etapa de tratamiento, por su parte Qiu, Cai, Zhao, Guo, & Zhao (2016) reportan la reducción de toxicidad en aproximadamente 72% en lixiviados para tres especies, alcanzada únicamente después de un proceso combinado de cinco etapas.

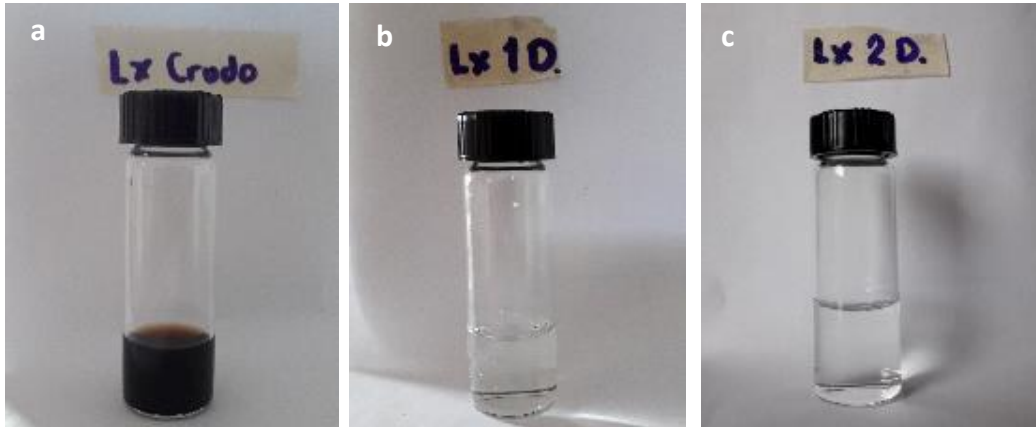


**Gráfica 10.** Índice de Elongación Radical Normalizado

### 5.3 Color

La remoción de color es evidente incluso desde la primer etapa de destilación; en la imagen 9 pueden observarse las mejoras obtenidas en cuanto a color debido al tratamiento de los lixiviados con una y dos destilaciones, las cuales se ven relativamente transparentes respecto a la muestra de lixiviado crudo que presenta un color oscuro.



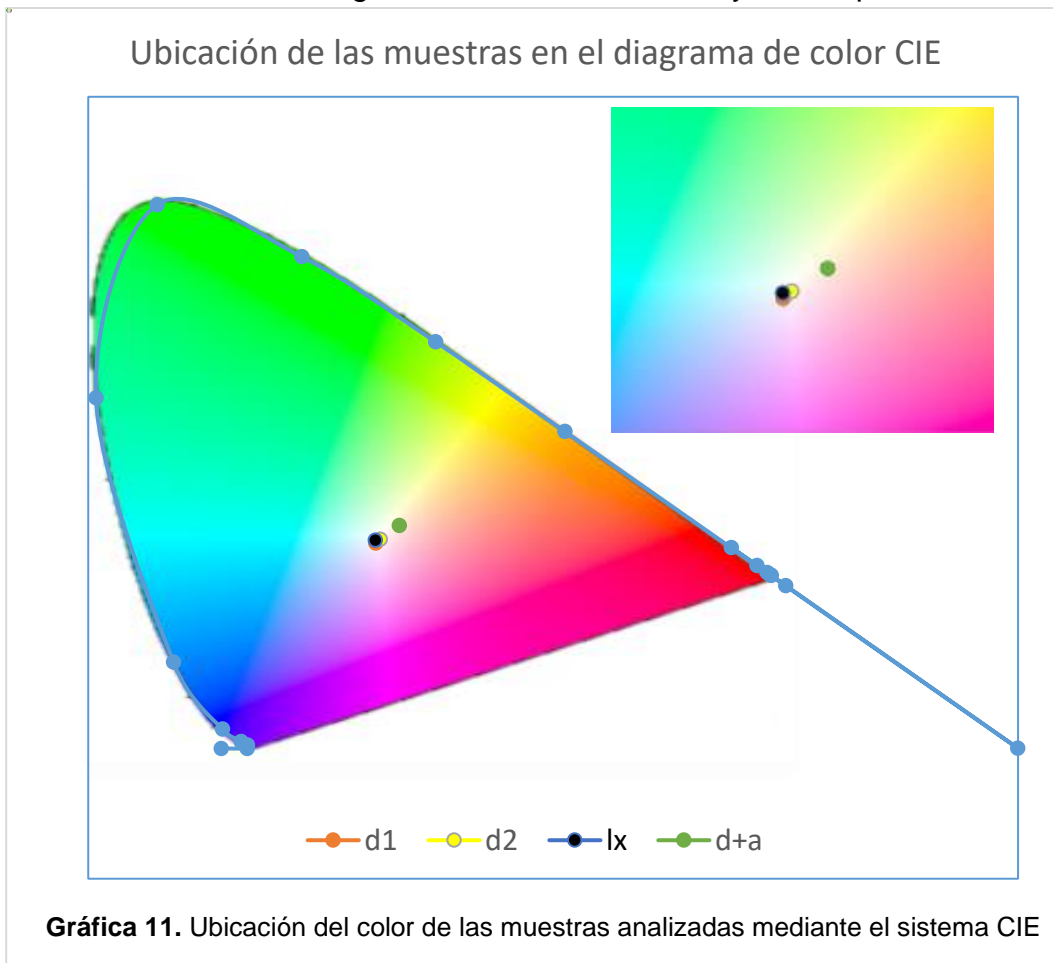


**Imagen 9.** Muestras de lixiviado crudo (a), una destilación (b) y dos destilaciones (c)

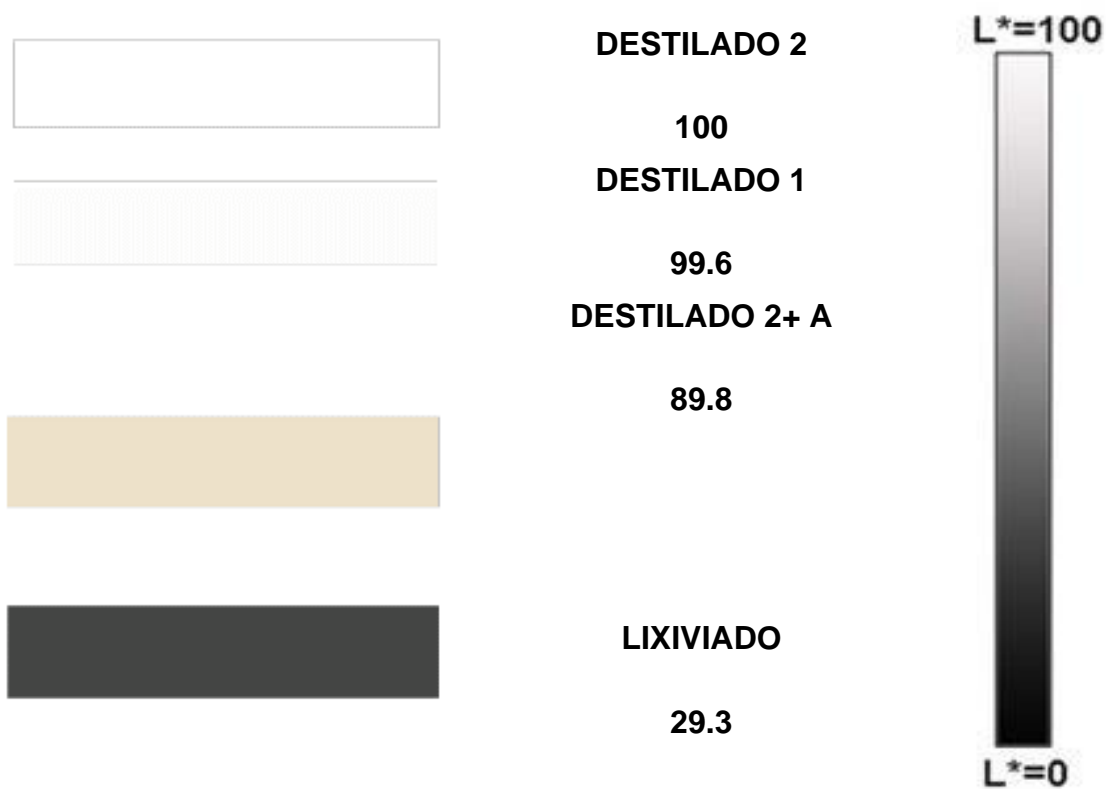
Al aplicar la metodología de determinación de color mediante los sistemas CIE se obtuvieron los siguientes resultados para los sistemas 1931 y L a\* b\*:

### 5.3.1 CIE 1931

En el gráfico 11 puede observarse la tendencia de color para cada una de las muestras analizadas; el agua con dos destilaciones y abono presenta tendencia al



color marrón explicado por la adición de sales en forma de abono, lo que le confirió el color café característico de este material; respecto a los destilados uno y dos, en color naranja y amarillo respectivamente, estos estuvieron ubicados más al centro del grafico con una tendencia no tan marcada pero si ligeramente observable hacia el azul, esto nos indica que la remoción de color después de la destilación es muy buena, en el caso del lixiviado representado por el color negro, se encuentra intermedio entre los destilados uno y dos, esto se debe a que el gráfico no toma en cuenta la luminosidad de la muestra, lo que la ubicaría en un punto mucho más lejano por su color oscuro característico, por lo que mediante la presentación del color de las muestras en el espacio LAB presentado adelante (Figura 13, imagen 10 y Gráfica 12) quedara más claro.

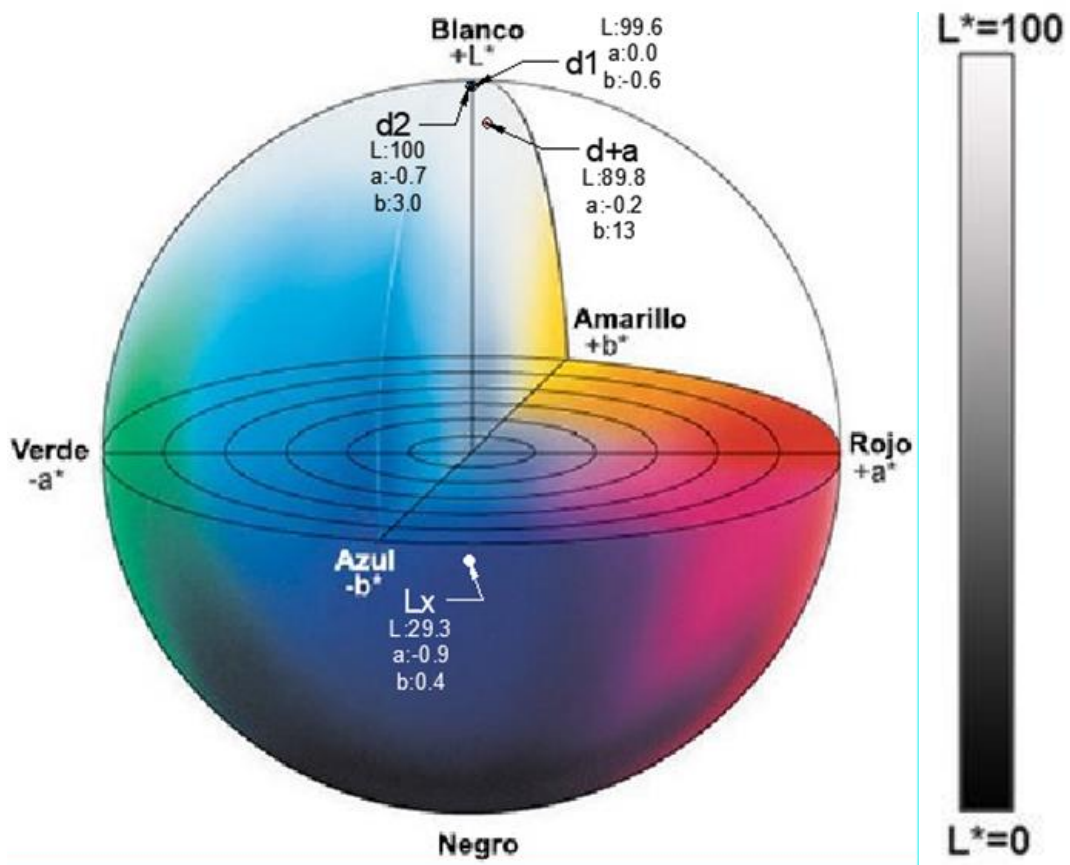


**Figura 13.** Colores de las muestras obtenidas en nixsensor.com mediante las coordenadas La\*b\* generadas.



**Imagen 10.** Muestras analizadas mediante espectrofotometría, de izquierda a derecha Lixiviado crudo, destilado dos más abono, destilado 1 y destilado 2.

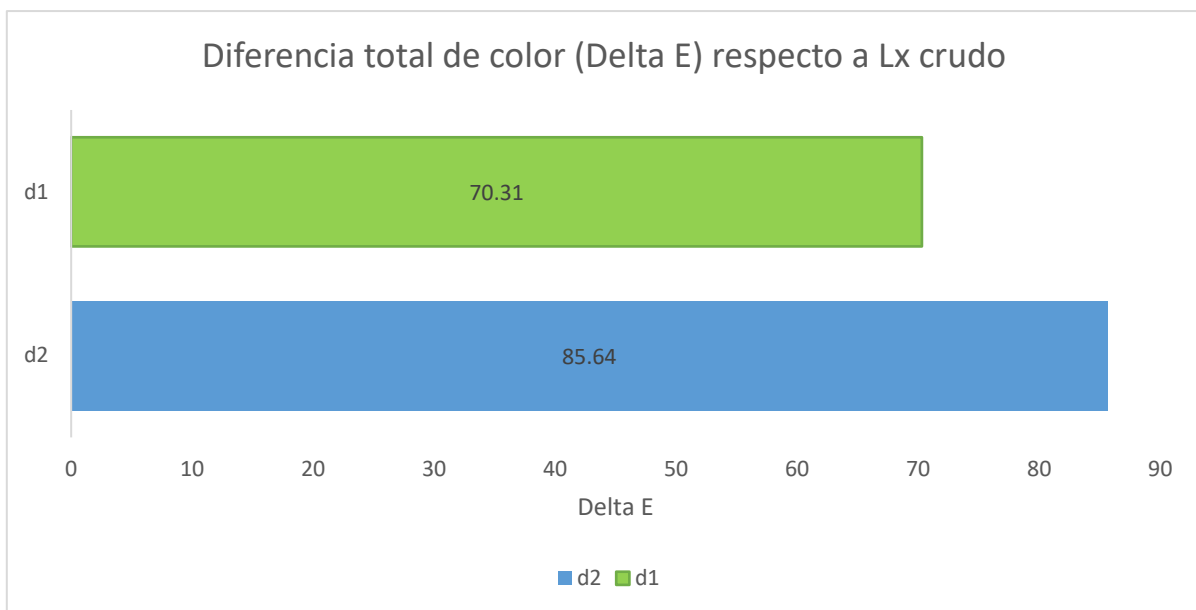
### 5.3.2 CIE L a\* b\*



**Gráfica 12.** Ubicación del color de las muestras en CIE Lab en tres dimensiones.

El gráfico 12 presenta la ubicación de las muestras en el espacio de color  $L^* a^* b^*$  el cual se representa en tres dimensiones por la inclusión de la luminosidad en el eje Z, se aprecia al igual que en los gráficos anteriores que la tendencia para el destilado dos (d2) es al azul y debido a que su luminosidad tiene un valor de 100 en una escala de 0 a 100, la muestra se ve completamente clara y transparente, este es el caso para el destilado uno (d1) el cual presenta un valor de luminosidad de 99.6, por lo que también se aprecia transparente, para la muestra con abono (d+a) su luminosidad adquiere un valor de 89.8 con el tono mencionado anteriormente tendiente al café característico del abono, su alto valor de luminosidad se debe a que no presenta sólidos suspendidos, lo que también le da una apariencia de transparencia, el lixiviado (Lx) por su parte, presenta luminosidad con un valor de 29.3 por lo que se ubica cerca del fondo del gráfico y a pesar de que su tono es tendiente al azul, la muestra se observa negra debido al bajo valor de luminosidad que posee.

### 5.3.2.1 Diferencia de color.



**Gráfico 13.** Diferencia total de color (Delta E) respecto a Lx crudo

Como se observa en el gráfico 13, al calcular la diferencia de color entre las muestras destiladas y el lixiviado crudo, se obtuvieron, como era esperado, valores altos, con más de 70 unidades de diferencia, para destilado 1, y casi 86 unidades

de diferencia para el destilado 2, lo que indica que respecto a remoción de color, el proceso de destilación tiene una alta eficiencia, esta es una característica muy importante ya que este parámetro nos indica en gran medida el tipo y grado de contaminación de un agua y es incluido en la determinación de índices de calidad de la misma ya que para cualquier propósito de uso del agua el color debe ser eliminado (NMX-AA-045-SCFI-2001).

#### 5.4 pH

Al realizar la medición del pH del afluente como del efluente, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.

Muestra	pH
Lx	8
D1	7
D2	7

**Tabla 4.** Valores de pH para cada muestra

Estos valores nos indican que durante la destilación de la muestra se produjo una reducción de la basicidad del lixiviado hasta alcanzar un valor neutro, debido probablemente a la disminución de la presencia de ácidos orgánicos (Gómez Vasquez, 2018).



**Imagen 11.** Medición de pH de muestras con tiras reactivas. (a)Lx, (b) D1 y (c) D2.

# **CAPÍTULO III**

## 1. CONCLUSIONES

Después de probar diferentes volúmenes de ingreso se obtuvo la mayor eficiencia de destilación con la introducción de 100 ml de lixiviado, obteniendo un promedio de 31 ml de destilado por día en un área de 0.0095 m<sup>2</sup> alcanzando así una productividad de 3.255 l/m<sup>2</sup>-día lo que caracteriza a un destilador común.

Gracias a la destilación solar del lixiviado crudo proveniente de la ciudad de Ocozocoautla de Espinosa, se alcanza la reducción de toxicidad para semillas de lechuga en 0.29 unidades según el índice radical normalizado IER, específicamente en la muestra con doble destilación más abono se logró reducir el grado de toxicidad en un nivel, pasando de alta toxicidad a toxicidad moderada, y en 0.3 unidades para el índice de germinación normalizado IGN.

A pesar de que se observa reducción de la toxicidad del lixiviado, los valores de IG obtenidos para cada una de las muestras tratadas indican aún una fuerte presencia de sustancias fitotóxicas, ya que al evaluar los valores de pH presentados por cada una de las muestras se descarta la acidez como factor que inhibe la germinación y crecimiento de las semillas, sin embargo, considerando el origen del agua problema y la simplicidad del tratamiento aplicado, lograr la reducción de un grado de toxicidad representa un avance significativo.

La aplicación del sistema seriado de destilación permitió una mejora gradual en la depuración del lixiviado mejorando tanto la germinación como el crecimiento de radícula, por su parte la remoción de color se aprecia a simple vista, pasando de un Lx de color oscuro a un agua clara, en términos numéricos se aprecia también una mejora en el color dependiente del grado de destilación, alcanzando una reducción de alrededor de 70 unidades con una sola destilación a un valor máximo de 86 unidades con doble destilación.

## 2. PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

Algunas mejoras que pueden aplicarse al sistema de destilación utilizado en este estudio son: un método de introducción y extracción optimizado del agua, así como reducir el volumen de aire a calentar y colocar una segunda capa (exterior) para

conservar y aumentar la temperatura interna del destilador por más tiempo, mejorando así su eficiencia de destilación.

*Lactuca sativa*, específicamente la variedad iceberg usada, resultó demasiado sensible a las sustancias probadas en la presente investigación, por lo que en el caso de sustancias de composición similar a la de los lixiviados tratados sería recomendable usar variedades o bien especies menos sensibles para la obtención de resultados más claros y apreciables.

Así mismo, sería recomendable realizar bioensayos con diluciones graduales de la muestra para determinar la toxicidad en función de la concentración.

Es necesario realizar una caracterización fisicoquímica del lixiviado crudo, así como del efluente a la par con el bioensayo para determinar en qué porcentaje se remueven los contaminantes y cual o cuales de ellos son los que están causando la toxicidad, ya que como se mencionó anteriormente, debido a la falta de caracterización del efluente, es posible que algún constituyente no analizado contribuya al patrón de toxicidad observado (Bowers, Pratt, Beeson, & Lewis, 1997).



### 3. ANEXOS



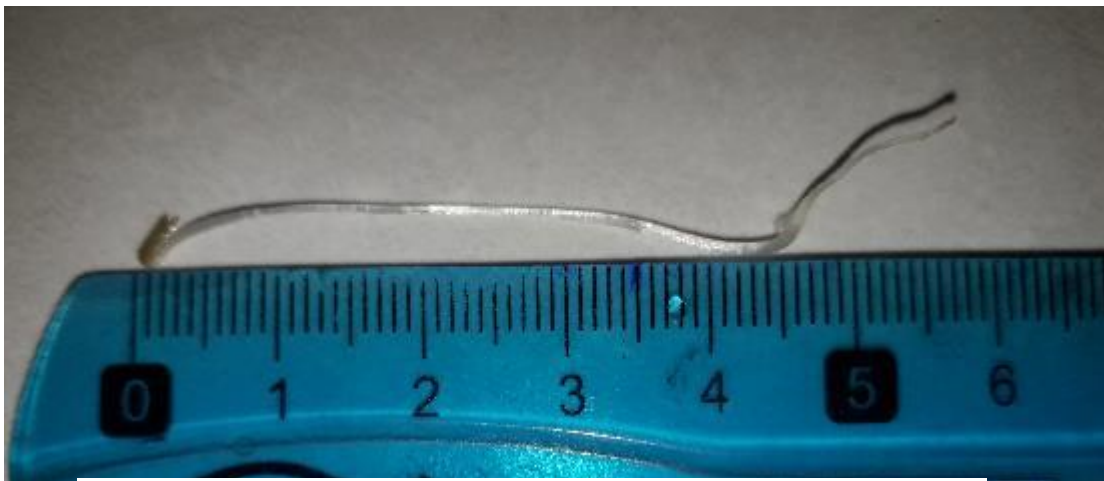
Residuos de lixiviado tras primera etapa de destilación



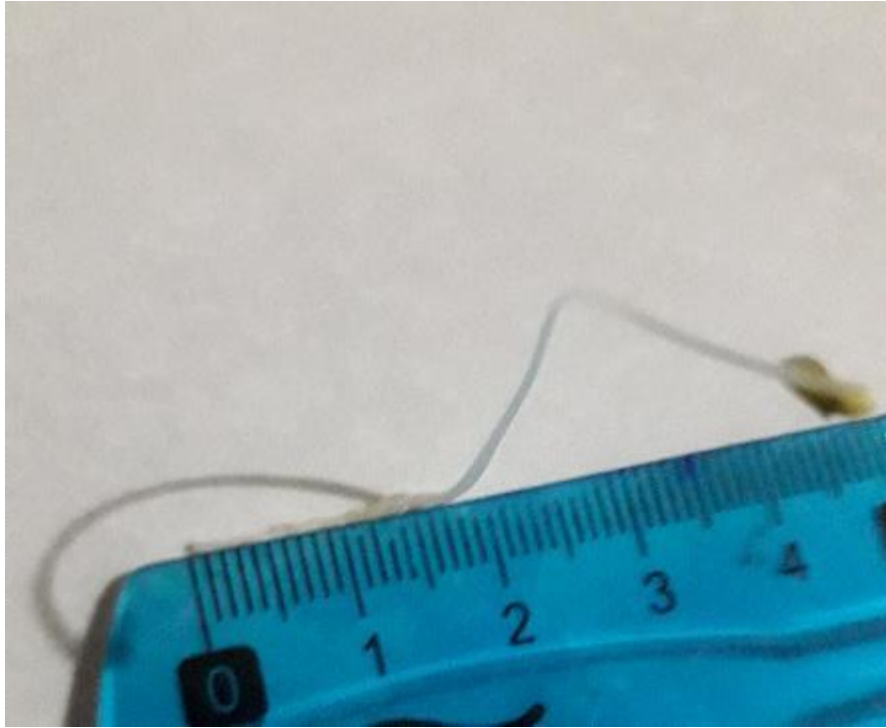
Residuos de lixiviado tras segunda etapa de destilación



Semillas usadas para los bioensayos



Medición de longitud de hipocótilo en plántulas



Medición de longitud de radícula en plántulas



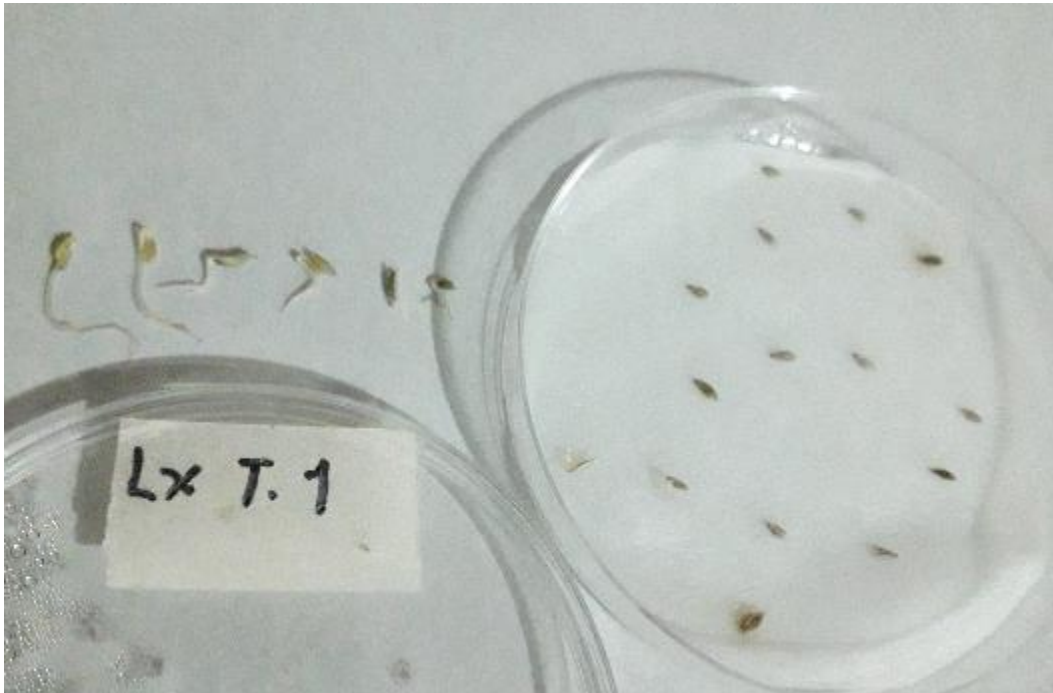
Plántulas obtenidas con agua control



Plántulas obtenidas con destilado 1 (D1).



Semillas en proceso de germinación regadas con D1



Plántulas obtenidas con destilado 2 (D2)



Plántulas obtenidas con destilado dos más abono (D2+a)

#### 4. REFERENCIAS

- Abdulhussain, A., Jingsong, G., Zhi Ping, L., Ying ya, P., & Al-Rekabi, W. (2009). Review on Landfill Leachate Treatments. *Journal of Applied Sciences Research*, 5(5), 534-545.
- Andrade, M., Borja, D., & Segundo, H. (2020). Diseño de una planta de tratamiento de lixiviados para empresas públicas municipales de aseo integral zona 3 Ecuador. *Ciencia Digital*, 4(1), 197-208. doi:<https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i1.1094>
- Bagur, M., Estepa, C., Martín, F., & Morales, S. (2011). Toxicity assessment using *Lactuca sativa* L. bioassay of the metal(loid)s As, Cu, Mn, Pb and Zn in soluble-in-water saturated soil extracts from an abandoned mining site. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 281-289. doi:<https://doi.org/10.1007/s11368-010-0285-4>
- Bernache, G. (2012). El confinamiento de la basura urbana y la contaminación de las fuentes de agua en México. *Revista de El Colegio de San Luis*, 11(4), 36-53.
- Bohórquez, P., & Campos, C. (2007). Evaluación de *Lactuca sativa* y *Selenastrum capricornutum* como indicadores de toxicidad en aguas. *Universitas Scientiarum*, 12(2), 83-98.
- Borzacconi, L., López, I., & Anido, C. (1996). metodología para la estimación de la producción y concentración de lixiviado de un relleno sanitario. Montevideo, Uruguay.
- Bowers, N., Pratt, J., Beeson, D., & Lewis, M. (1997). Comparative evaluation of soil toxicity using lettuce seeds and soil ciliates. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16(2), 207-213.
- Budi, S., Suliasih, B., Othman, M., Heng, L. Y., & Surif, S. (2016). Toxicity identification evaluation of landfill leachate using fish, prawn and seed plant. *Waste Management*, 55, 231-237.
- Castaldi, M. J. (2014). Perspectives on sustainable waste management. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 5, 547-562. doi:10.1146/annurev-chembioeng-060713-040306
- De León, H., Cruz, C., Dávila, R., Velasco, F., & Chapa, J. (2015). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea. *REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS*, 32(3), 514-526.
- Espinosa, M. d., López, M., Pellón, A., Robert, M., Díaz, S., González, A., . . . Fernández, A. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados

generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de la Habana. *Contaminación Ambiental*, 26(4), 313-325.

- García Alonso, A. (2016). Estudio de la reflectancia espectral y modelos de predicción de color en mosaicos vítreos. Universidad de Cantabria, Cantabria, España. Recuperado el 04 de 03 de 2021, de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9203/Garcia%20Alonso%20Andrea.pdf?sequence=1>
- García, V., Márquez, L., & Sánchez, J. (2015). Evaluación de la fitotoxicidad de un lixiviado de relleno sanitario sobre *Phaseolus vulgaris* L. y supervivencia de microorganismos de importancia sanitaria. *Journal of the selva andina research society*, 6(2), 51-63.
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de ingeniería*(14), 44-55.
- Gómez Vasquez, E. (2018). *Afectaciones ambientales de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios sobre el recurso agua*. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/173184.pdf>
- González, R., Casares, R., & Rodríguez, R. (2002). Riesgo a la salud por consumo de agua contaminada por lixiviados de SDFDS. *AIDIS*.
- Hermosillo, J. J. (1999). Destilación solar. *Huella* , 7-41.
- Hernández, E., Carranza, D., Martínez, B., Madrigal, W., & Águila, E. (2016). Ecotoxicidad aguda en semillas de *Lactuca sativa* L. de antibacterianos con riesgo ambiental. *Revista de Toxicología*, 33(1), 59-66.
- Hernández, M., & Vega, A. (2013). Evaluación del tratamiento de lixiviado de pulpa de café con destilación y evaporación mediante concentradores solares parabólicos en la Hacienda Majavita. *INNOVANDO EN LA U*, 4(5), 9.
- Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., & Kennedy, C. (2013). Environment: Waste production must peak this century. *Nature*, 502(7473), 615-617. doi:10.1038/502615a
- Jejer, C., Silva, C., & Jeannette, B. (2014). Estudio de toxicidad de componentes solubles del grits sobre cuatro especies vegetales. *Extensionismo, innovación y transferencia tecnológica*, 1, 194-197.
- Kamaruddin, M. A., Yusoff, M. S., Aziz, H. A., & Hung, Y.-T. (2015). Sustainable treatment of landfill leachate. *Applied Water Science*, 5, 113–126. doi:<https://doi.org/10.1007/s13201-014-0177-7>
- Kanmani, S., & Gandhimathi, R. (2013). Assessment of heavy metal contamination in soil due to leachate migration from an open dumping site. *Applied Water Science*(3), 193-205.

- Klauck, C., Rodriguez, M., & Silva, L. (2015). Evaluation of phytotoxicity of municipal landfill leachate before and after biological treatment. *Brazilian Journal of Biology*, 75(2), S57-S62.
- Konica Minolta. (S. f.). *Entendiendo El Espacio de Color CIE L\*A\*B\**. Obtenido de Konica Minolta Sensing Americas, Inc. : <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>
- Kulkarni, S. J. (2014). Solar Distillation: A Review. *International Journal of Research*, 1(11), 1171-1176.
- Kumari, P., Gupta, N., & Kaur A. (2017). A review of groundwater pollution potential treats from municipal solid waste landfill sites: Assessing the impact on human health. *Environmental Health Engineering*, 4(1), 11525. doi:10.5812/ajehe.11525
- La guía metas. (Julio de 2009). *Medición de color*. Obtenido de Metas: <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-09-07-Medicion-de-color.pdf>
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kumm, M., Flörke, M., Pfister, S., . . . Oki, T. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*, 5, 545-559. doi:10.1002/2016EF0
- Londoño, L. F., Londoño, P., & Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153.
- Mañas, P., & De las Heras, J. (2017). Phytotoxicity test applied to sewage sludge using *Lactuca sativa* L. and *Lepidium sativum* L. seeds. *International Journal of Environmental Science and Technology*.
- Márquez, L., & Sánchez, J. (2014). Evaluación del índice de contaminación de lixiviados de relleno sanitario y efecto fitotóxico en la germinación y plántula de *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of the selva andina research society*, 5(1), 13-23.
- Martínez, A., Padrón, W., Rodríguez, O., Chiquito, O., Escarola, M., Hernández, J., . . . Martínez, J. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. *Avances en Química*, 9(1), 37-47.
- Nájera, H. (2010). Un panorama general sobre el manejo de lixiviados en rellenos sanitarios del centro del país. *Nas Jomé*, 6, 10-16. Recuperado el 06 de 03 de 2020, de [https://www.unicach.mx/\\_ambiental/descargar/Gaceta6/Art3.pdf](https://www.unicach.mx/_ambiental/descargar/Gaceta6/Art3.pdf)



- Nájera, H., Castañón, J., Figueroa, J., & Rojas-Valencia, M. (2009). CARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO FISICOQUIMICO DE LIXIVIADOS MADUROS PRODUCIDOS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, MÉXICO. *Red de Ingeniería en Saneamiento Ambiental*. Barranquilla.
- Nájera, H., Gómez, J. M., García, C., Gutiérrez, R., & Rojas, M. N. (2010). Manejo de bigas y lixiviados en rellenos sanitarios del centro de México, un panorama general. *LACANDONIA*, 4(2), 117-131.
- Nieto, N. (2011). La gestión del agua: tensiones globales y latinoamericanas. *Política y cultura*, 36, 157-176. Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-77422011000200007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-77422011000200007)
- Optek. (s.f.). *Optek*. Recuperado el 13 de Enero de 2021, de Optek: <https://www.optek.com/es/color-measurements.asp>
- Osuna, H., Osuna Fernández, A. M., & Fierro, A. (2017). *Manual de propagación de plantas superiores*.
- Oswald, U. (2014). Water security and national water law in Mexico. *Earth Perspective*, 1(7), 1-7. doi:doi:10.1186/2194-6434-1-7
- Pastor Piñeiro, J. (1994). Vertederos controlados. Problemática de los lixiviados. (U. A. Madrid, Ed.) *Cuadernos del ICE número 11*.
- Pérez, J., Vera, L., Bravo, L., Delgado, S., & González, E. (2015). Valoración fisico-química y fitotóxica de las aguas residuales depuradas/regeneradas destinadas al riego agrícola. *Revista de toxicología*, 32, 141-143.
- Pineda, N., & Loera, E. (2007). Bien recolectada pero mal tratada. El manejo municipal de la basura en Ciudad Obregón, Hermosillo y Nogales, Sonora. *Estudios Sociales*, 16(30), 167-193.
- Priac, A., Badot, P., & Crini, G. (2017). Treated wastewater phytotoxicity assessment using lactuca sativa: focus on germination and root elongation test parameters. *Comptes Rendus Biologies*.
- Qiu, A., Cai, O., Zhao, Y., Guo, Y., & Zhao, L. (2016). Evaluation of the treatment process of landfill leachate using the toxicity assessment method. *Environmental Research and Public Health*, 13(12).
- Rela, A. (1991). COLORES. *Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales, Universidad de Buenos Aires*, 10-18.
- Renou, S., Givaudan, G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: REview and opportunity. *Journal of hazardous materials*, 468-493.

- Rodríguez, A., Cristopher, R., Ruíz, R., López, E., Sedeño, J., & Rodríguez, A. (2014). Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitoreo de la calidad del agua del río Chalma. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(3), 307-316.
- Ronco, M., Beltrano, J., & Daniel, G. (2011). Fisiología de la germinación. *Curso de fisiología vegetal*.
- Sáez, A., Urdaneta, G., & Joheni, A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135.
- Sang, N., Han, M., Li, G., & Huang, M. (2010). Landfill leachate affects metabolic responses of *Zea mays* L. seedlings. *Waste Management*, 30, 856-852. doi:10.1016/j.wasman.2010.01.023
- Sobrero, M. C., & Ronco, A. (2004). Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L. En *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones* (pág. 202). México: G. Castillo.
- Solis, R., Laines, J. R., & Hernández, J. R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 229-236. Recuperado el 02 de 03 de 2021, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992012000300005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300005&lng=es&tlng=es)
- Szantó, M., Piraino, E., & Arancibio, C. (2011). Criterios para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios mediante evaporación por radiación solar. *Hacia la sustentabilidad*, 598-601.
- Tchounwou, P., Yedjou, C., Patlolla, A., & Sutton, D. (2012). Heavy Metal Toxicity and the Environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*, 101, 133-164.
- Torchia, J. C., Porta, M., & Cervantes, J. (2010). Análisis de exergía en estado permanente de un destilador solar simple. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(1), 25-34.
- Torres, M., García, M., Hernández, N., & Fernández, M. (2006). Toxicidad aguda de lixiviados acuosos mediante un ensayo con *Lactuca sativa* L. *Higiene y sanidad ambiental*, 6, 170-172.
- Tuset, S. (21 de Mayo de 2019). *Condorchem Envitech*. Obtenido de Condorchem Envitech: <https://blog.condorchem.com/membranas-tratamiento-aguas-residuales/>

- Vera, P., & González, R. (2010). Manejo inadecuado de residuos sólidos urbanos como una causa de la pérdida de biodiversidad en Chiapas. *Lacandonia*, 4(1), 65-73.
- Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G. (2012). Municipal Solid Waste and the Environment: A Global Perspective. *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1), 277-309.
- Westland, S. (Febrero de 2001). *Imagen digital*. Obtenido de Apuntes sobre diseño grafico: [http://www.gusgsm.com/que\\_son\\_los\\_valores\\_triestimulos](http://www.gusgsm.com/que_son_los_valores_triestimulos)
- X-Rite Incorporated. (2002). *X-Rite Incorporated*. Obtenido de X-Rite Incorporated: [https://www.mcolorcontrol.com/archivos/L10-001\\_Understand\\_Color\\_es.pdf](https://www.mcolorcontrol.com/archivos/L10-001_Understand_Color_es.pdf)
- Zaltauskaite, J., Sujetoviene, G., & Cypaite, A. (2011). Municipal effluents toxicity evaluation using higher terrestrial, aquatic plants, and invertebrates. *Environmental Engineering*, 713-718.