



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y
BIOTECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA BIOQUÍMICA

Tema: Simulación computacional del post-tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Ambato mediante filtración subsuperficial en humedales artificiales.

Trabajo de Titulación, Modalidad: Proyectos de Investigación, previo la obtención del Título de Ingeniera Bioquímica, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autor: Christian Alexander Salinas Villegas

Tutor: Dr.-Ing. Rodny David Peñafiel Ayala

Ambato - Ecuador

Marzo - 2021

APROBACIÓN DEL TUTOR

Dr.- Ing Rodny David Peñafiel Ayala

CERTIFICA

Que el presente trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Trabajo de Titulación bajo la modalidad de Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería de Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 09 de febrero del 2021.

Dr.- Ing Rodny David Peñafiel Ayala

C.I. 1712283520

TUTOR

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Christian Alexander Salinas Villegas, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero Bioquímico son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Christian Alexander Salinas Villegas

C.I. 1804572152

AUTOR

APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Trabajo de Titulación, en la modalidad proyecto de investigación el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

.....

Presidente del Tribunal

.....

Mg. Cristian Fernando Galarza Galarza

C.I. 180316027-2

.....

Mg. Julio Cesar Sosa Cárdenas

C.I. 1716650849

Ambato, 26 de febrero del 2021

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo de Titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor



Christian Alexander Salinas Villegas

C.I. 1804572152

AUTOR

DEDICATORIA

Siempre a Dios por nunca abandonarme en cada pasaje de camino, colocando en mí, fortaleza y sabiduría para maniobrar con certeza y delicadeza en mi proyecto de vida.

Al ángel que tengo la dicha de tener como madre, por enseñarme a nunca rendirme y motivarme a vencer cada obstáculo de mi vida, una mujer luchadora, trabajadora, incansable y abnegada, por dedicar tu vida entera a tus hijos cada logro alcanzado será tuyo, siempre dedicado a ti amada mamita Rosita Villegas.

Por el hombre que siempre he admirado mi papá Manuel Salinas, por todo tu trabajo, esfuerzo, y constante dedicación hemos logrado cumplir una meta más, nada hubiese sido posible sin ti, fuiste, eres y serás mi mayor motivación para seguir avanzando por el camino correcto, el que tú me enseñaste.

A mi hermano mayor Xavier Salinas, por ser un guía incondicional en cada etapa de mi vida, e inspirarme a cumplir toda meta propuesta en el camino.

También a Carlos Salinas mi hermano menor, al contagiarme de tu carisma y franqueza, infundiéndome parte de ti en todo este proyecto.

AGRADECIMIENTO

A ti Dios por permitir que esta meta pueda ser alcanzada, en compañía de mi familia a la que adoro y amo.

Por supuesto a mi familia por ser partícipe de múltiples formas en cada paso dado de esta etapa de mi vida.

A la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, carrera de Ingeniería Bioquímica por brindarme todos los conocimientos y más que eso en ayudar a fortalecer los valores y principios transmitidos, no solo de grandes profesionales sino también de maravillosos seres humanos que tuve el agrado y honor de conocer.

Un agradecimiento muy especial para el Doctor Rodny Peñafiel, por su profesionalismo, compromiso y ayuda desinteresada, ha permitido que el presente trabajo de investigación se desarrolle con éxito y total satisfacción.

A los docentes que fueron partícipes para que este trabajo se lleve a cabo, Mg Cristian Galarza, Mg Julio Sosa y Mg Geovanny Vega, aportando con sus valerosos conocimientos.

Familiares amados Cecilia Villegas y Galo Aguirre, Manuel Villegas, Rosario Villegas, mis primos Armando, Genesis, Johnny, Pablo, Tannia, por inculcar cada enseñanza, consejo o mensaje transmitido en mí, siempre fue y será recibido con el mejor de los agrados, infinitas gracias por acompañarme en este proceso.

A María Belén Álvarez Robles quien estuvo siempre en cada paso dado hacia este gran logro, por no dar su brazo a torcer y estar siempre dispuesta a dar su mano y ayudarme a levantar en cada tropiezo o dificultad que se atravesó.

A mis compañeros y amigos que tuve la dicha de conocer, en especial para Alejo, Andrés, Belén, Elizabeth, Leo, Liss, y Raquel por compartir innumerables eventos llenos de alegría, tristeza, estrés, consuelos, desvelo, y motivación, muchos de los mejores momentos que he vivido han sido juntos a ustedes.

ÍNDICE GENERAL

A. Páginas preliminares

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	iii
APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO	iv
DERECHOS DE AUTOR.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii

B. Contenido

MARCO TEÓRICO	1
1.1 Antecedentes investigativos	1
1.1.1 Disposición final de residuos sólidos urbanos	1
1.1.2 Lixiviados	2
1.1.3 Humedal artificial.....	4
1.1.4 Consideraciones para el diseño de humedales artificiales	10
1.1.5 Contaminantes.....	13
1.1.6 Salinidad y pH.....	15
1.1.7 Temperatura	16
1.1.8 Modelamiento y Simulación	16
1.1.9 Software	17
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo general.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Hipótesis.....	18
1.3.1 Hipótesis nula.....	18
1.3.2 Hipótesis alternativa	18
1.4 Variables de la hipótesis	19
1.4.1 Variables dependientes	19

1.4.2	Variables independientes	19
	MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1	Materiales y Equipos.....	20
2.1.1	Materiales	20
2.1.2	Equipos.....	20
2.2	Métodos.....	20
2.2.1	Metodología científica para la simulación	20
2.2.2	Definición geométrica.....	21
2.2.3	Modelos matemáticos de las físicas del proceso de depuración	24
2.2.4	Definición inicial de los parámetros.....	28
2.2.5	Tiempo de estudio	30
2.2.6	Diseño del mallado.....	30
2.2.7	Resultados.....	31
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1	Discusión y Análisis de resultados.....	33
3.1.1	Análisis basados en la física correspondiente a ley de Darcy	33
3.1.2	Análisis de la degradación de materia orgánica	36
1.1.1	Análisis del consumo de nutrientes	39
3.1.3	Análisis de la reducción de la concentración de metales pesados	42
3.2	Verificación de la hipótesis	52
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
4.1	Conclusiones	53
4.2	Recomendaciones	53
	BIBLIOGRAFÍA	55
	ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones de los componentes en lixiviados	3
Tabla 2. Concentraciones de los componentes en lixiviados del relleno sanitario de Ambato en cada proceso	4
Tabla 3. Comparación de eficiencias de remoción de nitrógeno en los diferentes tipos de humedales artificiales	10
Tabla 4. Medios granulares para humedales artificiales	12
Tabla 5. Datos para el diseño geométrico del humedal artificial	22
Tabla 6. Factores que influyen en el flujo de agua a través del suelo	29
Tabla 7. Concentración de los parámetros seleccionados para la simulación.....	29
Tabla 8. Coeficientes de degradación para materia orgánica.....	30
Tabla 9. Constantes cinéticas de primer orden para nutrientes	30
Tabla 10. Coeficientes de Partición para los metales pesados	30
Tabla 11. Resultados de la concentración final promedio de materia orgánica obtenidos del software COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4	37
Tabla 12. Resultados de la concentración final promedio de nutrientes obtenidos del software COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4.....	39
Tabla 13. Resultados de la concentración final promedio de metales pesados obtenidos del software COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procesos fundamentales de un humedal artificial.....	6
Figura 2. Humedal artificial superficial	7
Figura 3. Humedal artificial subsuperficial horizontal	8
Figura 4. Humedal artificial subsuperficial vertical.....	9
Figura 5. Plantas macrófitas – especies ecuatorianas	11
Figura 6. Metodología de simulación y modelamiento.....	21
Figura 7. Cuerpo del humedal artificial	22
Figura 8. Entrada del humedal artificial.....	23
Figura 9. Inclinación del humedal artificial	23
Figura 10. Representación geométrica del humedal artificial.....	24
Figura 11. Malla (fina) del humedal artificial.....	31

Figura 12. Línea de flujo: Campo de velocidad de Darcy	34
Figura 13. Campo de velocidad (m/s).....	35
Figura 14. Presión en el sistema (atm).....	36
Figura 15. Porcentaje de materia orgánica degradada	37
Figura 16. Degradación de DBO	38
Figura 17. Degradación de DQO	38
Figura 18. Porcentaje adsorbido de nutrientes en la matriz	40
Figura 19. Consumo de oxígeno	41
Figura 20. Transformación y degradación del amonio	41
Figura 21. Consumo de nitratos	42
Figura 22. Consumo de fosfatos	42
Figura 23. Índice de bioacumulación para metales pesados (mg metal/kg planta) ..	43
Figura 24. Porcentaje adsorbido de metales pesados en la matriz	45
Figura 25. Variación de la concentración de plomo en el tiempo.....	46
Figura 26. Variación de la concentración de cadmio en el tiempo	46
Figura 27. Variación de la concentración de zinc en el tiempo	47
Figura 28. Variación de la concentración de cromo en el tiempo.....	48
Figura 29. Variación de la concentración de plata en el tiempo	48
Figura 30. Variación de la concentración de mercurio en el tiempo	49
Figura 31. Variación de la concentración de níquel en el tiempo.....	50
Figura 32. Variación de la concentración de cobre en el tiempo	50
Figura 33. Perfil de concentración para Cd, Zn y Pb.....	51
Figura 34. Perfil de concentración para Ag, Cr y Hg	51
Figura 35. Perfil de concentración para Cu y Ni.....	52

RESUMEN

Los humedales artificiales subsuperficiales del tipo horizontal son aplicados como una rentable opción para la depuración de lixiviados tanto como tratamiento y post-tratamiento. Una investigación in silico, mediante el uso del software COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4, permite reducir al máximo los costos totales y el tiempo empleado, a diferencia de una investigación in vivo o in vitro. La finalidad de este estudio es usar las herramientas que el programa provee, manipularlas de tal manera que se adapte a la realidad por medio del uso de físicas que describan el flujo a la entrada del sistema, el comportamiento de este por la Ley de Darcy, reacciones de superficie que involucran modelos cinéticos y de adsorción, con la aplicación de una serie de parámetros, constantes y coeficientes necesarios para integrar el conjunto de sistema de ecuaciones generados y lograr resolver con ayuda del programa. Los porcentajes de remoción para materia orgánica fueron de 72.15 y 90.06 para DQO y DBO respectivamente, mientras para nutrientes vario entre el 60 y 75 por ciento, también se estudió la bioacumulación de los metales pesados obteniendo los siguientes porcentajes para plomo 99.98, cromo 99.91, mercurio 96.85, zinc 94.44, níquel 92.24 y cadmio 82.75, por debajo de estas tasas de acumulación se encontraron el cobre con 57.30 y plata 56, sin embargo cumplieron la normativa vigente para su liberación. En base a los resultados obtenidos se evidencia la importancia y efectividad del uso de humedales artificiales para la depuración de contaminantes presentes en lixiviados.

Palabras clave: Gestión ambiental, simulación computacional, humedales artificiales, lixiviados, plantas macrófitas.

ABSTRACT

Subsurface constructed wetlands of the horizontal type are applied as a profitable option for the purification of leachates both as treatment and post-treatment. An *in silico* investigation, using the COMSOL MULTIPHYSICS version 5.4 software, allows to reduce total costs and time spent as much as possible, unlike an *in vivo* or *in vitro* investigation. The purpose of this study is to use the tools that the program provides, manipulate them in such a way that it adapts to reality through the use of physics that describe the flow at the entrance of the system, its behavior by Darcy's Law, surface reactions that involve kinetic and adsorption models, with the application of a series of parameters, constants and coefficients necessary to integrate the set of system of equations generated and to be able to solve with the help of the program. The removal percentages for organic matter were 72.15 and 90.06 for COD and BOD respectively, while for nutrients it varied between 60 and 75 percent, the bioaccumulation of heavy metals was also studied, obtaining the following percentages for lead 99.98, chromium 99.91, mercury 96.85, zinc 94.44, nickel 92.24 and cadmium 82.75, below these accumulation rates were copper with 57.30 and silver 56, however they complied with the regulations in force for their release. Based on the results obtained, the importance and effectiveness of the use of artificial wetlands for the purification of pollutants present in leachates is evidenced.

Keywords: Environmental management, computer simulation, constructed wetlands, leachates, macrophytes.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

1.1.1 Disposición final de residuos sólidos urbanos

El procesamiento de los residuos sólidos desde su generación hasta su disposición final engloba una serie de etapas que debe desarrollarse de manera responsable como la prevención, reutilización, reciclaje, valorización y finalmente la eliminación, su eficacia en los últimos años ha mejorado de manera significativa (**Aguilar et al., 2018**).

Hoy en día a favor de la salubridad, seguridad poblacional y natural, cada país, provincia o ciudad dispone un lugar adecuado para la disposición final de los residuos sólidos, donde son tratados hasta su eliminación parcial o total, entre las alternativas más empleadas se tiene: rellenos sanitarios, botaderos, y celdas emergentes (**Astorga del Canto, 2018**).

1.1.1.1 Relleno sanitario

Los rellenos sanitarios son estructuras ingenieriles y se usan como una técnica para el confinamiento de desechos sólidos, se localizan estratégicamente para evitar peligros a la salud o medio ambiente (**Caballero et al., 2011**).

El fundamento se basa en la compactación adecuada de los desechos, reduciendo su volumen, para posteriormente cubrir con capas de tierra de manera periódica (**INEC, 2016**).

Como resultado de la técnica se generan productos que deben ser controlados y tratados antes de su liberación al medio ambiente, uno de ellos es la emanación de gases de efecto invernadero y otro de efluentes líquidos (lixiviados) (**Zurbruggen., 2018**).

1.1.1.2 Celdas emergentes

Una celda emergente cumple el mismo rol de un relleno sanitario, la diferencia radica en que su funcionamiento es temporal y no excederá los dos años en operación (**INEC, 2016**).

1.1.1.3 Botadero

Es un lugar aleatorio donde se depositan los residuos sólidos, sin ninguna clase de tratamiento previo o control alguno, se encuentran esparcidos en el medio ambiente pero acumulados (**Caballero et al., 2011**).

1.1.2 Lixiviados

Los lixiviados de los rellenos sanitarios se originan por la compactación, degradación, percolación de los residuos orgánicos e inorgánicos, en conjunto con el agua lluvia se forma un residuo líquido de alto impacto ambiental (**Valderrama et al., 2016**).

La actividad contaminante de los componentes químicos de los lixiviados es elevada, más aún cuando su liberación al ambiente no es controlada, como consecuencia puede contaminar suelos y cuerpos acuáticos aledaños al sector donde se encuentra ubicado el relleno sanitario (**Lavrova & Koumanova, 2010**).

Las características de los lixiviados varían dependiendo de factores como, la edad del relleno sanitario, ubicación geográfica, temperatura, naturaleza de los residuos, suelo y frecuencia pluvial (**Astorga del Canto, 2018**).

En términos generales los lixiviados poseen elevadas concentraciones de materia orgánica (DBO y DQO), nitrógeno, fósforo, sales, y metales pesados (*Tabla 1 y Tabla 2*) (**Valderrama et al., 2016**).

La longevidad de los rellenos sanitarios está relacionada de manera inversa con la biodegradabilidad o la remoción de contaminantes, como se ve en la *Tabla 1*, cuando este es joven (1 – 5 años) posee mayor probabilidad de degradación, y va disminuyendo esta remoción, intermedio (5 – 10 años) y menos medida para un relleno sanitario maduro (>10 años) (**Torres et al., 2014**).

Tabla 1. Concentraciones de los componentes en lixiviados

Constituyente	Concentración (mg/L)		
	1 año	5 años	15 años
DBO	20000	2000	50
TKN ¹	2000	400	70
Amonio-N	15000	350	60
SDT ²	20000	5000	2000
Cloruros	2000	1500	500
Sulfatos	1000	400	50
Fosfatos	150	50	---
Calcio	2500	900	300
Sodio y potasio	2000	700	100
Hierro y magnesio	700	600	100
Aluminio y zinc	150	50	N.D.

¹Nitrógeno total Kjeldahl; ²Sólidos disueltos totales

Fuente: **(Mosquera, 2012)**

La aplicación de un tratamiento de lixiviados proveniente del relleno sanitario de la ciudad de Ambato consta de 3 procesos (*Tabla 2*), en la segunda columna se reflejan los valores de los parámetros de los lixiviados crudos, estos sobrepasan los límites máximos permitidos según lo establecido por el Acuerdo Ministerial No. 097 para desembocadura en alcantarillado o en cuerpos de agua dulce.

En su primera etapa interviene el reactor anaerobio de manto de flujo pistón de lodos de flujo ascendente (UASB) la finalidad de este es la degradación de materia orgánica en condiciones anaerobias con el uso de microorganismos **(Pérez et al., 2016)**.

El biofiltro percolador se usó como segundo tratamiento en el que la materia orgánica continúa degradándose por microorganismos en esta ocasión de naturaleza aerobia, debido a las condiciones de aireación que se produce gracias a la recirculación del fluido, además ocurre la degradación de nitrógeno, aceites y grasas, sólidos suspendidos y ciertos metales pesados **(Gallegos & García et al., 2017)**.

El clarificador es aplicado como última etapa, donde por mecanismos físicos y químicos se consigue la floculación y coagulación de tal forma que atrapen contaminantes como metales pesados, partículas suspendidas o disueltas, fosfatos, logrando que sedimenten rápidamente, de tal manera que se obtuvo concentraciones cercanas o dentro del límite permisible **(Trujillo et al., 2014)**.

Tabla 2. Concentraciones de los componentes en lixiviados del relleno sanitario de Ambato en cada proceso

PARÁMETRO	LIXIVIADO CRUDO (ppm)	REACTOR UASB (ppm)	BIOFILTRO BFP (ppm)	CLARIFICADOR (ppm)
DBO ₅	2840	1024	936	1173,6
DQO	10810	4330	3960	5510
*Aceites y grasas		532	4	184
Cadmio, Cd	256	0,2	400	45
Cloruros	3548	3599	3942	4237,7
Nitrógeno (Kjeldahl)	720	768	782,4	3144
Plomo, Pb	572	200	1800	50
Sólidos suspendidos	13540	47	45	128

Fuente: (Villacres, 2011)

El tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Ambato llevado a cabo por Villacrés (2011) conduce a la obtención de buenos resultados para algunos parámetros, sin embargo, según menciona el mismo autor la implementación de un tratamiento adicional convendría en caso de no alcanzar los límites permisibles establecido en el Acuerdo Ministerial No. 097.

El pos-tratamiento de lixiviados puede darse con la implementación de simples sistemas tradicionales como lagunas aireadas hasta sistemas complejos como el uso de reactores biológicos con membranas para la ultrafiltración. La búsqueda por un sistema que genere eficacia y al mismo tiempo los costos totales para la implementación, funcionamiento y mantenimiento sean rentables y sostenibles con el medio ambiente, se ha desarrollado y fortalecido el uso de humedales artificiales debido a sus ventajas (Giraldo, 2014).

1.1.3 Humedal artificial

Los humedales artificiales son estructuras de ingeniería que contribuyen en el proceso de remoción de distintos contaminantes que puede existir en una corriente de agua, de múltiples indoles como aguas domésticas, provenientes de alguna industria o como post-tratamiento de lixiviados (Bakhshoodeh et al., 2020).

La composición de un humedal, requiere de elementos naturales como agua, grava o arena (material poroso), vegetación especialmente plantas macrófitas y microorganismos, todos en conjunto se unen para degradar, absorber, transformar, filtrar, y volatilizar contaminantes presentes en el fluido que circule a través de estos sistemas (Mosquera, 2012).

Un humedal artificial se fundamenta bajo 3 principios básicos (Figura 1) que son: primero la actividad microbiana, que promueve la degradación biológica en zonas aerobias (sistema radicular), anaerobias, con la eliminación de nutrientes como fósforo, nitrógeno, materia orgánica y elementos traza (**Astorga Del Canto, 2018**).

El segundo principio se basa en la bioquímica de las plantas, donde la absorción de nutrientes es la principal característica en este sistema, aparte de proveer zonas aerobias en el medio para ciertos microorganismos (**Soler et al., 2018**).

Por último, un soporte inerte (suelo) se encarga de retener partículas, es decir filtra el flujo que está circulando (**Lavrova & Koumanova, 2010**).

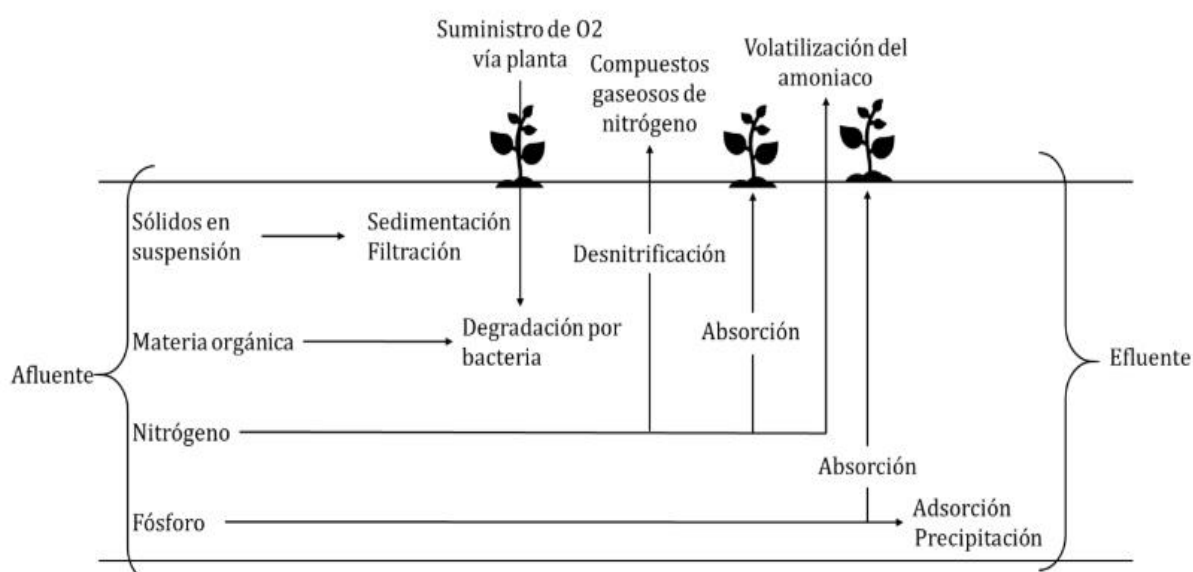
Las plantas juegan un papel fundamental en la remoción de metales pesados en vista que poseen una resistencia elevada al crecimiento en zonas inhóspitas, sobre todo las plantas vasculares han demostrado tener mayor capacidad para tolerar esta clase de contaminantes (**Méndez et al., 2008**).

La bioacumulación de metales es el mecanismo de la interacción entre un organismo vivo y como adsorbe uno o más componentes del medio que lo rodea en este caso metales pesados. Algunos de ellos son tolerables y cumplen una función biológica hasta cierta concentración como el cobre, hierro, cobalto, zinc, entre otros, pero, también existen los que no se desconoce alguna funcionalidad en un sistema biológico como el plomo, mercurio, cadmio (**Pozo et al., 2011**).

A pesar de ello la capacidad de acumulación de las plantas, es una característica aprovechable para el post-tratamiento de lixiviados, y más aún determinadas especies mediante evolución filogenética han logrado poseer la capacidad de hiperacumulación, es decir, mediante translocación y distribución logran almacenar metales por toda la planta sin perjudicarla (**Méndez et al., 2008**).

Existen varios tipos de humedales artificiales se pueden clasificar de acuerdo con el agua presente en la superficie o subsuperficie, por la dirección del flujo vertical u horizontal y también un híbrido que no es más que la combinación de los anteriores mencionados (**Yang & Tsai, 2011**).

Figura 1. *Procesos fundamentales de un humedal artificial*



Fuente: (Astorga del Canto, 2018)

Una de las ventajas que poseen los humedales artificiales subsuperficiales sobre los superficiales, es que los primeros no están expuestos directamente al ambiente, evitando el contacto con animales o personas, que pueden servir como vectores de transmisión, además de la reducción de malos olores (Astorga Del Canto, 2018).

1.1.3.1 Humedal artificial superficial

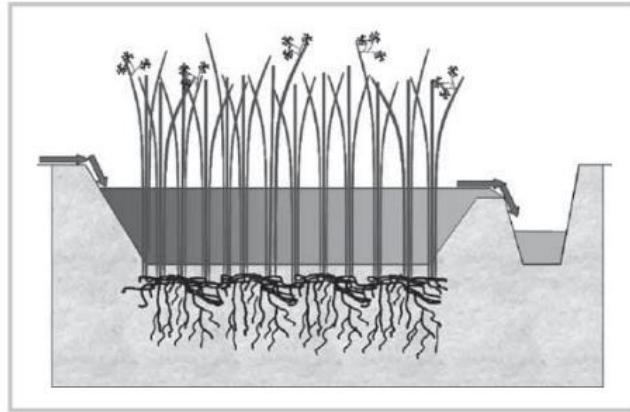
En la *Figura 2* se observa la representación de este tipo de humedal, la principal característica es el nivel de agua que posee y varia de 5 cm a 40 cm de altura sobre el nivel del suelo (Bakhshoodeh et al., 2020).

Las plantas palustres (macrófitas) es fundamental en especial para este tipo de humedal, debido a la considerable cantidad de agua presente (Yang & Tsai, 2011).

El suelo además de poseer la función de soporte para la vegetación, aloja una importante cantidad de microorganismos dependientes de oxígeno que contribuyen en la fijación de nitrógeno y su vez la degradación de materia orgánica, debido a que posee una mayor trasferencia de oxígeno (Aluko & Sridhar, 2005).

La bioacumulación de metales pesados esta mediada por las plantas involucradas en el proceso (Aluko & Sridhar, 2005).

Figura 2. *Humedal artificial superficial*



Fuente: (Delgadillo et al., 2010)

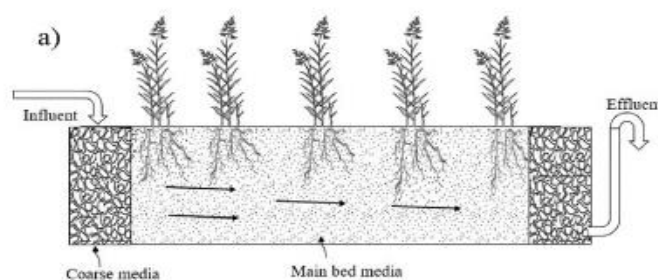
1.1.3.2 Humedal artificial subsuperficial horizontal

El proceso en este tipo de humedal ocurre en condiciones limitadas de oxígeno, con excepción de las zonas radicales de las plantas, donde se alojan ciertos microorganismos, el resto está cubierto por suelo (grava, arena, arcilla, entre otros) (Rodríguez et al., 2010). El fluido circula de manera continua de izquierda a derecha como se representa en la *Figura 3*.

Este paso a través del humedal hace que el tiempo de retención sea mayor, puesto que el flujo que circula posee menor área de penetración en medio del sistema poroso dependiente del tipo de sustrato (suelo) que se use, sin embargo, gracias a esto se logra una mayor eficiencia (80% - 90%) en la eliminación de materia orgánica, (DBO₅ y DQO) sólidos totales suspendidos, y ciertos metales pesados (Lavrova & Koumanova, 2010).

En contra parte este tipo de humedal presenta ligeramente una menor efectividad en lo que respecta a la reducción de nitrógeno, precisamente debido a la limitada cantidad de oxígeno presente en el medio, y que las bacterias nitrificadores requieren para la transformación de nitrógeno y posterior absorción por las plantas en una forma más asimilable (Yalcuk & Ugurlu, 2009).

Figura 3. *Humedal artificial subsuperficial horizontal*



Fuente (Bakhshoodeh et al., 2020)

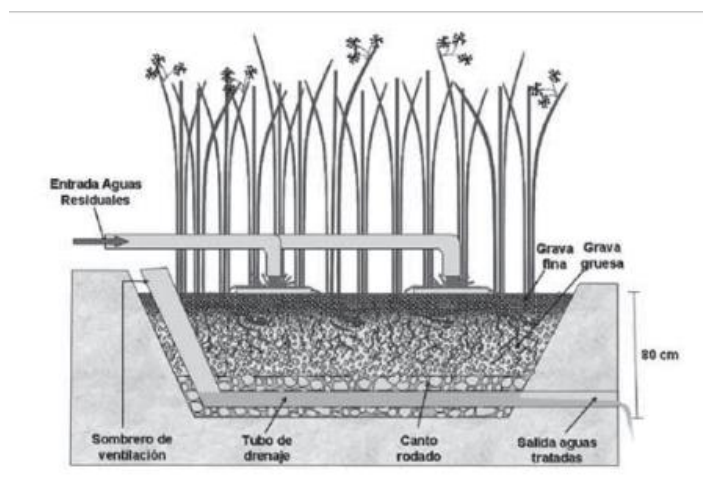
1.1.3.3 Humedal artificial subsuperficial vertical

Al fluir de manera vertical en el humedal, el proceso se realiza de manera intermitente para que exista una mayor difusión de oxígeno, posee una gran similitud con el humedal artificial subsuperficial horizontal, una diferencia notable es que este puede tener diferentes capas de suelo o grava (*Figura 4*), sin embargo, los costos de mantenimiento suelen ser mayores debido a que las tuberías del fondo del sistema suelen obstruirse (Yang & Tsai, 2011).

El mecanismo de funcionamiento es similar al anterior tipo de humedal mencionado, aunque el contacto con las plantas especialmente con la zona radicular es menor, en vista de la reducción de área por atravesar, de manera que puede o no generar inconvenientes dependiendo del diseño de este (Giraldo, 2014).

El oxígeno presente es usado por ciertas bacterias nitrificadoras, para consolidar la transformación a una forma asimilable para las plantas, por tanto la recirculación intermitente es un factor a tener en cuenta para que el sistema pueda estar aireado constantemente (Yalcuk & Ugurlu, 2009).

Figura 4. *Humedal artificial subsuperficial vertical*



Fuente (Delgadillo et al., 2010)

1.1.3.4 Humedal artificial híbrido

La combinación de los 3 tipos de humedales mencionados anteriormente origina uno nuevo denominado híbrido, no se ha demostrado que la unión de los anteriores tipos de humedales conectados mejore el funcionamiento global para el tratamiento de cualquier tipo de aguas (ver *Tabla 3*), pero se sabe que los costos de preparación, construcción y mantenimiento aumentarían significativamente (Bakhshoodeh et al., 2020).

Existen gran cantidad de estudios acerca del mejor tipo de humedal artificial que satisfaga con elevadas eficiencias de remoción de los diferentes contaminantes presentes en los lixiviados según Bakhshoodeh et al. (2020) depende y variará en cada investigación que se realice, aunque si se toma en cuenta la mayor cantidad de parámetros, puede que las eficiencias alcanzadas sean positivas, se relacionen y no se tenga diferencia significativa.

Por otro lado Londoño & Vanegas (2009) sostiene que los porcentajes de remoción de materia orgánica se encuentran alrededor del 90% con el uso de humedales artificiales de flujo horizontal.

En la *Tabla 3* se evidencia que la combinación de los humedales horizontal y vertical no promueven mejores eficiencias de remoción en el caso del nitrógeno, y que el sistema más conveniente es el de flujo horizontal, la remoción puede variar entre el 78% y 96% (Yang & Tsai, 2011).

Tabla 3. Comparación de eficiencias de remoción de nitrógeno en los diferentes tipos de humedales artificiales

<i>System Types</i>	<i>Plant Species</i>	<i>Nitrogen Type</i>	<i>HLR (mday⁻¹)</i>	<i>Removal Efficiency (%)</i>
SSF (vertical and horizontal flows)	reeds and cattails	NH ₃ -N	0.005	51
Aerated SSF (horizontal flow)	goldenrod, curly dock, and cattails	NH ₃ -N	0.004	>90
SSF (horizontal flow)	cattails	TN	0.062–0.500	78–96
SSF (vertical flow)	reeds	NH ₃ -N	0.140	34–44
SSF (vertical and horizontal flows, or VF and HF)	cattails	NH ₃ -N	0.050–0.032	71(VF) 50 (HF)
FWS-SSF (horizontal flow)	reeds, cattails, and virens	NH ₃ -N	0.014–0.047	49–94
		TN		37–50

Fuente: (Yang & Tsai, 2011)

1.1.4 Consideraciones para el diseño de humedales artificiales

1.1.4.1 Agua

Uno de los elementos a tener en cuenta es el agua sobre todo si se trata del humedal superficial, este elemento varía dependiendo de la especie vegetal que se haya considerado para el tratamiento en este caso se usó *Azolla spp* (azolla) como modelo para la simulación computacional, considerando el tamaño del tallo y raíces, además del nivel de agua que se tiene en un humedal horizontal que va de 0.1 m a 0.6 m (Rodríguez et al., 2010).

La velocidad del flujo, se debe tener en cuenta sobre todo en humedales artificiales superficiales y subsuperficiales horizontales debido a que el flujo es continuo (Mosquera, 2012).

Otra de las consideraciones son las proporciones geométricas, para poder establecer la velocidad adecuada, según en base al estudio reportado por Villacrés (2011) el caudal promedio deberá ser de 0.4 l/s, si se tiene un caudal mayor (2.4 l/s) el sistema puede sobresaturarse, al mismo tiempo que aumenta la conductividad hidráulica y se perdería la funcionalidad del humedal, por el contrario si se tiene un caudal bajo (0.06 l/s) y de igual manera la conductividad hidráulica, el sistema puede obstruirse (Astorga Del Canto, 2018)

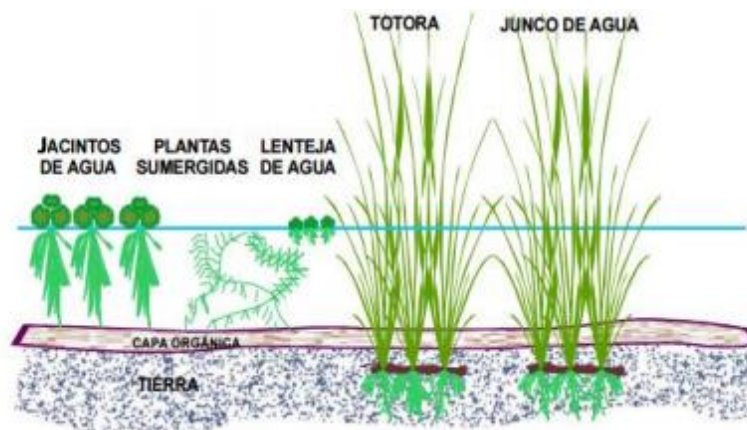
1.1.4.2 Plantas Macrófitas

Las plantas desempeñan una función importante en el tratamiento de aguas poseen funciones de aireación en la zona radicular, para que los microorganismos presentes puedan llevar a cabo procesos transformantes, también permite la eliminación de contaminantes gracias a la capacidad de absorción en especial de nitrógeno y fósforo, además de la filtración de sólidos, remoción de metales pesados, y materia orgánica (Soler et al., 2018).

Entre las especies que mejores resultados de eficiencia de tratamiento se encuentra *Phragmites australis* (carrizo) y *Juncus* (junco), debido a su alta resistencia para crecer en medios acuáticos saturados (Yang & Tsai, 2011).

Dentro del país existen especies que guardan cierta semejanza con las anteriores mencionadas (Figura 5) y cumplen la misma función como: *Lemna spp* (lenteja de agua o lemna), *Azolla spp* (azolla) y *Eichhornia crassipes Mont.* (jacinto de agua) (Delgadillo et al., 2010).

Figura 5. Plantas macrófitas – especies ecuatorianas



Fuente: (Castillo, 2017)

La densidad recomendada es de 1 a 6 plantas por metro cuadrado, con la finalidad de que haya una elevada actividad heterotrófica, es decir la capacidad de descomponer materia orgánica y otros elementos en fuente de nutriente para sí mismo y para los microorganismos de su alrededor que trabajan en conjunto (simbiosis) (Astorga Del Canto, 2018).

1.1.4.3 Suelo

El suelo es una consideración fundamental en los humedales artificiales puesto que tienen como objetivo el soporte de todo el sistema, el medio para el crecimiento y metabolismo de las plantas, el transporte del líquido y dependiendo del sustrato que se use, tiene la capacidad de absorber diferentes compuestos como el fosfato y ciertos metales pesados entre los que destaca el plomo, cobre, cadmio, níquel y zinc (Soler et al., 2018).

Los tipos de soportes más usados se obtienen de la naturaleza, aunque también pueden ser medios artificiales y subproductos generados en industrias, se componen de: grava, arena, arcilla, calcita, mármol, vermiculita, escoria, ceniza volante, bentonita, dolomita, piedra caliza, concha, zeolita, entre otros. Los expertos recomiendan usar materiales naturales para evitar que las plantas se estresen y de esta manera logren adaptarse sin dificultades (Astorga Del Canto, 2018).

En los humedales horizontales se recomienda usar un tipo de suelo como la grava, el motivo es hacer el tiempo de retención del flujo no tan extenso como sucede si se agregase diferentes capas de suelo. En cambio, para los humedales verticales es aconsejable agregar capas que pueden ser de arena, zeolita y grava (Yalcuk & Ugurlu, 2009).

La profundidad habitual de los humedales varía de 0.30 m a 1 m, debido a las raíces de las plantas poseen estas longitudes, para el sustrato es frecuente un espesor de 0.60 m y pendientes de 1% a 8% para que el fluido pueda escurrir fácilmente (Astorga Del Canto, 2018). En la *Tabla 4* se detallan algunas de las características de soporte que más se usan.

Tabla 4. *Medios granulares para humedales artificiales*

Humedal artificial	Medio [mm]	Espesor [cm]
VSSF	Arena (0 - 7)	20
	Zeolita (0,8 - 2)	10
	Grava (7 - 15)	15
	Grava (15 - 30)	15
HSSF	Grava (7 - 15)	60

Fuente: (Astorga Del Canto, 2018)

1.1.4.4 Microorganismos

Los microorganismos cumplen un importante rol dentro de los sistemas, ya que su acción depurativa para la mayoría de contaminantes en conjunto con las plantas son responsables de lograr altos niveles en la eficiencia de remoción (**Gargallo, 2017**).

La degradación de la materia orgánica ocurre por acción biológica de bacterias aerobias facultativas, o anaerobias. Este tipo de procesos es dependiente de la temperatura, en bajas temperaturas los microorganismos por lo general no son capaces de degradar la materia orgánica (**Astorga Del Canto, 2018**).

Ciertos microorganismos denominadas bacterias nitrificadoras, estas son las encargadas de la transformación del nitrógeno a formas más asimilables, el primer paso es la conversión de estas especies a amonio, posteriormente se da el proceso de desnitrificación o nitrificación, pese a que la degradación de estos compuestos ocurre también por volatilización y adsorción de plantas, el uso de microorganismos es clave para que las plantas puedan absorber dichos compuestos (**Behrends, 2007**).

El proceso de conversión por oxidación de amonio a nitrato es realizado por bacterias autótrofas en presencia de oxígeno, mientras que la conversión de nitrato a nitrito no requiere oxígeno y se reduce por bacterias heterótrofas (**Soler et al., 2018**).

El fósforo y ciertos metales pesados también son absorbidos por microorganismos en pequeñas cantidades al igual que en plantas (**Aluko & Sridhar, 2005**).

1.1.5 Contaminantes

1.1.5.1 Materia orgánica

Como indicadores de la presencia de materia orgánica están los niveles de DQO y DBO₅ en elevadas cantidades se denota gran cantidad de materia orgánica, según la Norma de Calidad de descargas de agua dulce, los límites permisibles son de 100 mg/l y 50 mg/l respectivamente, sin embargo, los valores de DQO llegan hasta 84.200 y para DBO₅ 64.400 mg/l (**Bakhshoodeh et al., 2020**) (**Núñez, 2015**).

El cociente entre DBO/DQO permite obtener una mayor información sobre la calidad de agua, un cociente bajo significa que el sistema no es biodegradable como consecuencia

se infiera la presencia de mayor contenido de material inorgánico, mientras que por el contrario el sistema es biodegradable y se debe a la presencia notable de material orgánico **(Yalcuk & Ugurlu, 2009)**

1.1.5.2 Nitrógeno

Según los desechos sólidos presentes en un relleno sanitario su concentración puede variar de manera significativa, se ha identificado que el nitrógeno amoniacal que puede alcanzar fácilmente los 1000 mg/l **(Gargallo, 2017)** mientras que el Acuerdo Ministerial No. 097 establece un máximo de 30 mg/l **(MAE, 2015)**.

La descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados desencadena la presencia de amoniaco libre o ion amonio en condiciones anaerobias, mientras que un ambiente con oxígeno da a lugar a la formación de nitratos a partir de nitrógeno amoniacal producido por bacterias nitrificantes. La reducción del nitrógeno amoniacal ocurre por el resultado de varias alternativas volatilización, nitrificación, absorción e inmovilización **(Núñez, 2015)**.

Nitrógeno Total Kjeldahl se evidencia por la presencia del nitrógeno orgánico (proteínas y ácidos nucleicos) en todas sus formas degradadas, la norma indica que el límite permisible de descarga a un cuerpo de agua es de 50 mg/l **(MAE, 2015)**.

1.1.5.3 Fósforo

La presencia de este componente establece la presencia de detergentes, jabones o fertilizante, es importante mantener niveles bajos del mismo como indica la norma de calidad (10 mg/l) **(MAE, 2015)** en elevadas concentraciones puede desencadenar el fenómeno que se conoce como eutrofización, en lixiviados a menudo se encuentran concentraciones que varían de 60 a 70 mg/l **(Villacrés, 2011)**.

1.1.5.4 Sólidos totales suspendidos

Este contaminante se forma por la unión de los diferentes residuos microscópicos presentes en un cuerpo de agua, en la mayoría de los casos se debe por la formación de una masa con células biológicas, de manera que quedan suspendidos en el agua el límite permisible es de 80 mg/l según el Acuerdo Ministerial No. 097 y a menudo en lixiviados

se encuentran a niveles muy altos que varía de 1,91 a 3,96 g/l (Soler et al., 2018) (Núñez, 2015).

1.1.5.5 Sólidos totales disueltos

Una elevada concentración de sólidos totales disueltos representa un factor negativo para el medio ambiente debido a que puede encontrarse elementos disueltos como: sulfatos, bromuros, arsénico, y ciertos metales, lo que significa una seria amenaza para la descarga en un cuerpo de agua dulce (Astorga Del Canto, 2018).

1.1.5.6 Metales pesados

Los metales pesados son compuestos tóxicos y nocivos para el medio ambiente, su relevancia y perduración hacen que se les confiera como contaminantes prioritarios según la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre los que destacan son: cromo, cadmio, mercurio y plomo, además de plata, zinc, cobre, níquel que representan peligrosidad aunque en menor medida (Amábilis-Sosa et al., 2015).

Debido a una gran cantidad de residuos electrónicos y baterías es importante tener en cuenta que tipo son y cuáles son los que más daño causan al medio ambiente puesto que su uso a nivel biológico es mínimo al ser elementos traza (Yang & Tsai, 2011).

Este tipo de contaminante no puede eliminarse completamente, sin embargo, interviene en procesos físicos o químicos, como la sedimentación, filtración, o la adherencia en la matriz del humedal, raíces, tallos, y en el sustrato usado (Bakhshoodeh et al., 2020)

La zeolita si se usa como sustrato confiere un beneficio adicional, debido a que posee una superficie con afinidad por cationes de potasio, sodio, calcio, y magnesio, además iones de metales pesados en especial de plomo, níquel, cromo, cadmio y hierro (Astorga Del Canto, 2018)

1.1.6 Salinidad y pH

El pH permite saber el carácter de los contaminantes presentes, es decir de carácter ácido, neutro o básico, en la norma se establece que el rango ideal debe encontrarse entre un pH de 5 y 9, mientras la salinidad establece la presencia o ausencia de sales inorgánicas mediante la conductividad (Núñez, 2015).

1.1.7 Temperatura

Este parámetro permite saber el estado de la corriente de agua que se analiza o se desea tratar, una elevada temperatura se encuentra influenciada directamente con todos los elementos anteriormente considerados, por consiguiente, podría desencadenar efectos negativos para el entorno o para el estudio que se esté desarrollando, por ello la norma señala que esta deberá estar en un valor menor a los 35°C y superior a los 25°C para que los microorganismos existentes puedan subsistir y contribuir en la remoción de materia orgánica o nutrientes (nitratos y fosfatos) (**Ministerio del Ambiente, 2019**).

1.1.8 Modelamiento y Simulación

1.1.8.1 Modelamiento

El modelado se define como una formulación o descripción de las ecuaciones que más se acerquen o describan un determinado proceso, estas surgen de leyes establecidas en cuanto a un balance de masas y las cinéticas de una reacción (**Artos & Constante, 2019**).

Existen varios tipos de modelamiento como el matemático en el que se detallan las diferentes variables que mejor se adapten a un determinado sistema, también está presente el modelamiento físico, este consiste en plasmar de manera tangible dicho proceso u operación que se desee usar, y por último las de carácter conceptual o verbal, estas se describen de manera clara y detallada las características específicas de un sistema (**Vilanova et al., 2017**).

Posteriormente el paso a seguir es la construcción del modelo teniendo en cuenta los objetivos y finalidades del estudio que puedan satisfacer la investigación, para ello cada modelo construido debe estar perfectamente caracterizado para poder ser ejecutado y evaluado.

Dentro del modelamiento es clave tener en cuenta el tiempo o tipo de estudio que se desea realizar, están divididos en 3 grupos y son: dinámico, estacionario y estático, el primero de ellos es usado si se desea conocer la variación de un proceso en uno o varios tiempos como la concentración de metales pesados, el estacionario se usa cuando se desea saber el resultado final de un proceso o en que este ya no varíe de manera significativa en el tiempo, lo que sucede con DQO, DBO, y nitrificación, por el contrario un tiempo de

estudio estático es usado para observar variaciones no significativas dentro de un proceso **(Artos & Constante, 2019)**.

1.1.8.2 Simulación

Por otro lado, una simulación computacional consiste en la experimentación de un modelo en este caso matemático previamente definido, además consiste en realizar los análisis experimentales para que se lleve a cabo el funcionamiento de un sistema o proceso seleccionado, intentando imitar el comportamiento que se desencadena en la realidad, y según los resultados obtenidos buscar estrategias o replanteos en busca de la mejora u optimización **(Vilanova et al., 2017)**.

En la actualidad la simulación de procesos físicos, químicos, biológicos y mecánicos ha permitido evitar desgastes económicos considerables, a la par que se ha conseguido fortalecer el estudio e investigación en diferentes áreas, industriales, farmacéuticas, moleculares, alimenticias y medio ambientales, esta última cada vez se torna más estricta y de gran relevancia, es evidente que el mundo actual está en decadencia y la perseveración por cuidar los recursos naturales ha infundido en la consciencia de varios organismos y entidades tanto a nivel nacional como mundial **(Gargallo, 2017)**.

Uno de ellos corresponde al cuidado y mantenimiento de los recursos hídricos, asegurar la calidad del agua es un reto constante que se debe mejorar día a día, para evitar problemas en un futuro no muy lejano.

Por ello la búsqueda de sistemas o procesos sostenibles, rentables y sobre todo amigables con la naturaleza este en constante crecimiento, una simulación computacional puede evitar errores en la implementación, instalación y funcionamiento de un sistema, además de verificar la viabilidad de este, analizando la eficiencia alcanzada **(Gargallo, 2017)**.

Los retos que la ciencia y tecnología atraviesa el día de hoy, es la recreación de complejos sistemas que interactúan en un determinado tiempo y espacio, el análisis contempla un sin número de variables y alternativas a considerar que limita la posibilidad de un estudio 100% confiable y seguro **(Artos & Constante, 2019)**.

1.1.9 Software

COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4, es un programa de simulación y modelamiento matemático, práctico para el desarrollo de eventos reales que se rigen bajo

comportamientos físicos, químicos y matemáticos, su interfaz permite fijar una gran cantidad de parámetros o factores que se desean controlar en un determinado proceso. Los resultados que provee el programa son realmente dinámicos como lo señalan ciertos autores, lo que permite una mejor y avanzada interpretación (Fontes et al., 2019).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Simular el post tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Ambato en humedales artificiales mediante el sistema computacional COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4.

1.2.2 Objetivos específicos

- Establecer los procesos físicos fundamentales del post-tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Ambato mediante humedales artificiales para la remoción de los contaminantes de materia orgánica (DBO y DQO), nutrientes (fosfatos y nitratos), y metales pesados (Pb, Cd, Cu, Ni, Hg, Zn, Ag, y Cr).
- Determinar los modelos matemáticos necesarios para que se efectuó la simulación de acuerdo con el software usado.
- Analizar las respectivas representaciones gráficas del resultado obtenido, a partir de la simulación del modelo matemático.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis nula

El medio poroso, la interacción de las plantas, el tiempo de residencia y orientación del humedal artificial subsuperficial (horizontal) no influyen significativamente en la remoción de los contaminantes presentes en los lixiviados que se generan en el relleno sanitario de Ambato.

1.3.2 Hipótesis alternativa

El medio poroso, la interacción de las plantas, el tiempo de residencia y orientación del humedal artificial subsuperficial (horizontal) influyen significativamente en la remoción

de los contaminantes presentes en los lixiviados que se generan en el relleno sanitario de Ambato.

1.4 Variables de la hipótesis

1.4.1 Variables dependientes

- Concentración final de materia orgánica (DBO Y DQO)
- Concentración final de los metales pesados
- Concentración final de nutrientes

1.4.2 Variables independientes

- Tiempo de residencia
- Porosidad
- Volumen radicular de las especies vegetales
- Flujo volumétrico
- Velocidad
- Conductividad hidráulica
- Coeficiente de partición o distribución
- Constantes de degradación

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales y Equipos

2.1.1 Materiales

Software COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4 (licencia individual)

2.1.2 Equipos

Laptop hp

2.2 Métodos

2.2.1 Metodología científica para la simulación

El correcto modelado para la simulación puede regirse bajo la metodología que se describe en la *Figura 6*, de modo que un usuario establece las físicas que el software ofrece, rigiéndose en leyes y ecuaciones que mejor se adapten a un determinado proceso, también se define las condiciones iniciales, parámetros, tipo de estudio y la geometría en donde ocurrirá el fenómeno físico, químico o biológico.

Posterior a ello con la obtención de resultados y manipulación de estos, permitió obtener un análisis más completo.

De esta manera se prosiguió con la elaboración y ejecución de un humedal artificial subsuperficial horizontal con la finalidad de degradar contaminantes a niveles aceptables según lo establecido en el Acuerdo Ministerial No. 097.

Las principales físicas usadas son el flujo del fluido a la entrada al humedal, la dinámica del movimiento de fluido, el transporte de especies diluidas en un medio poroso, reacciones de superficie y adsorción.

Figura 6. Metodología de simulación y modelamiento

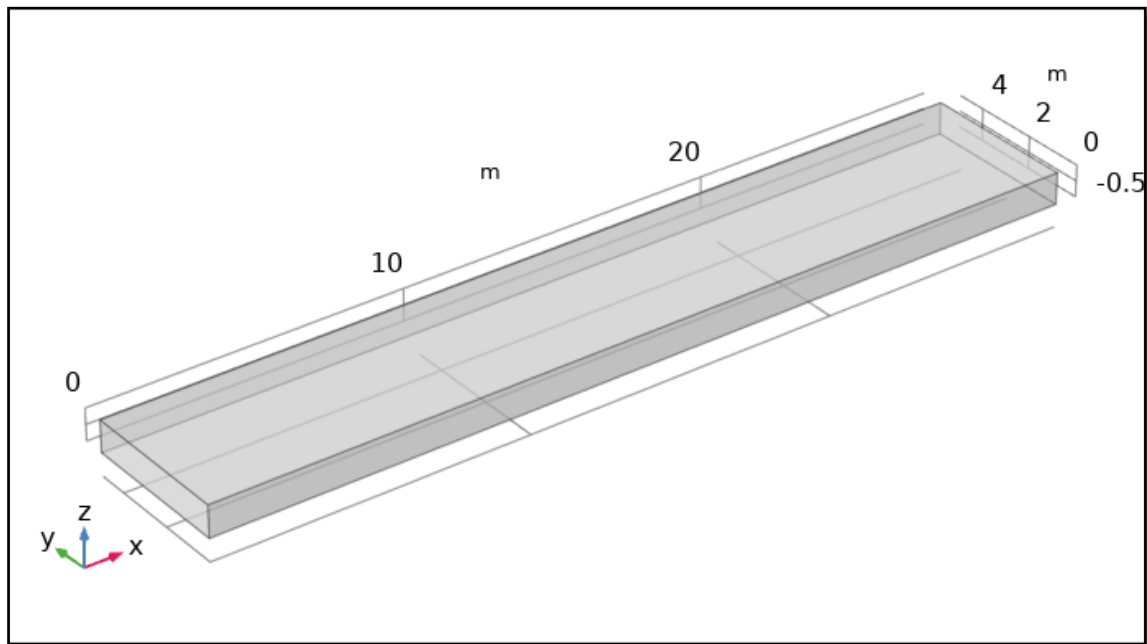


2.2.2 Definición geométrica

En COMSOL MULTIPHYSICS versión 5.4 se diseñó un humedal artificial subsuperficial horizontal, mediante la interfaz geométrica que permite la construcción de un diseño tridimensional.

El modelo geométrico que se construyó consta de 3 partes: primero se formó el cuerpo que consta de una longitud de 28 m y un área transversal de 5 m^2 (5 m de ancho x 1 m de altura) dando un volumen de 145 m^3 lo que dará lugar a un tiempo de residencia de 24 horas. De acuerdo al estudio realizado por **Silva & Zamora (2005)** la longitud de un humedal artificial horizontal es crucial para lograr eficiencias de remoción superiores al 50%, donde manifiesta que el valor mínimo es de 25 m y máximo de 30 m, y para lograr una retención hidráulica de un día es necesario 5 m de ancho y 1 m de profundidad.

Figura 7. *Cuerpo del humedal artificial*



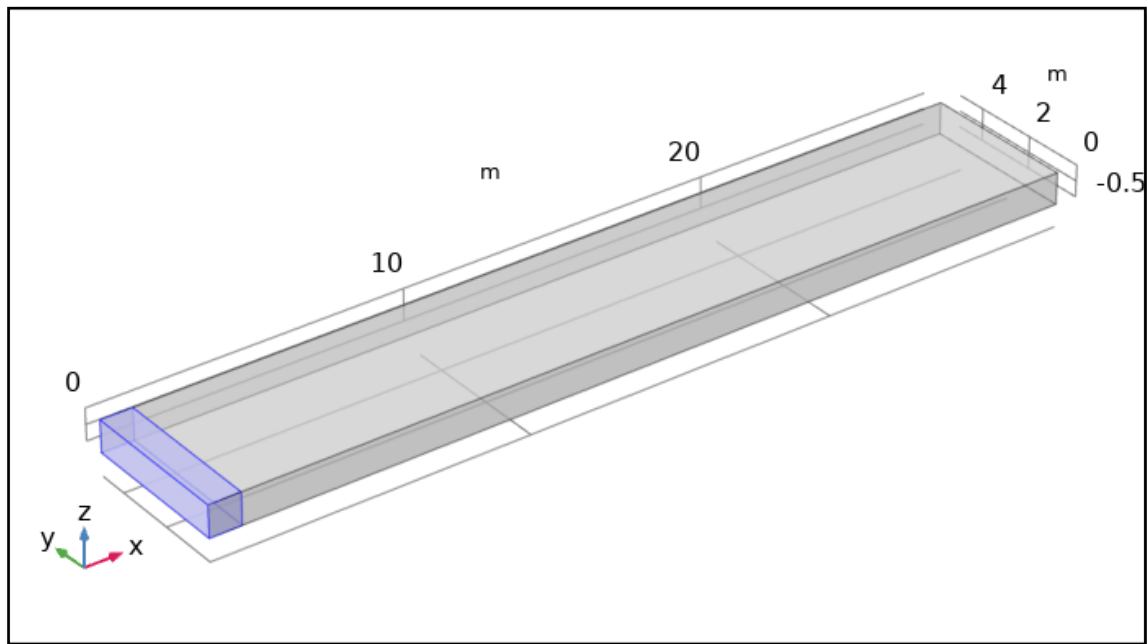
En el interior de este se agrega un segundo bloque con 1 m de longitud, 5 m de ancho y 1 m de altura, esto representa la entrada del sistema.

El ingreso de las medidas de cada figura geométrica puede ser ingresado dentro de los parámetros generales que dispone el software, como se representa en la *Tabla 5*.

Tabla 5. *Datos para el diseño geométrico del humedal artificial*

Nombre	Valor	Expresión
B	5 m	Ancho bloque principal
H	1 m	Altura bloque principal
L	28 m	Largo bloque principal
l	1 m	Largo bloque secundario
r	0.4 m	Radio cilindro principal
Hc	0.8 m	Altura del cilindro principal
rs	0.02 m	Radio cilindro secundario
V	90 m ³	Volumen total del sistema
Ar	1.273	Ángulo de rotación (inclinación)

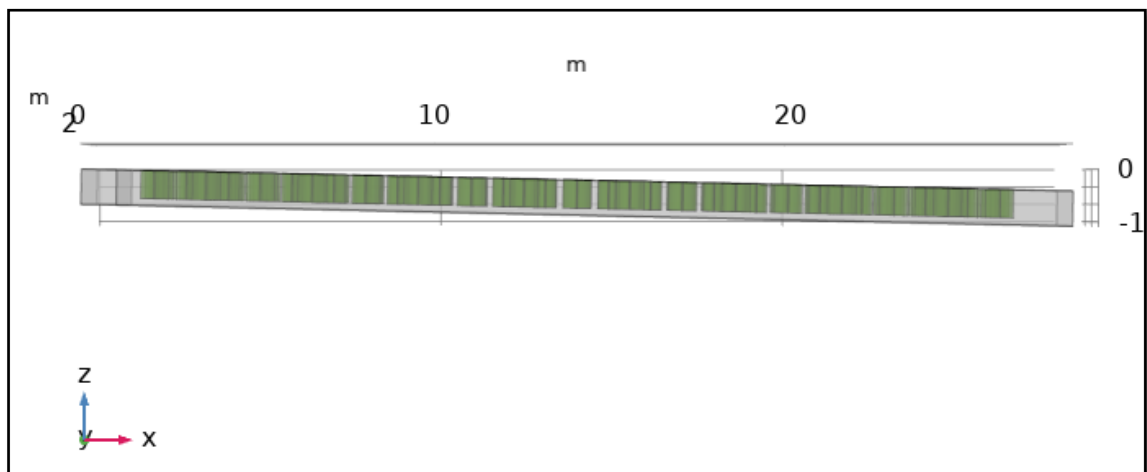
Figura 8. *Entrada del humedal artificial*



La inclinación del humedal para que escurra el fluido de mejor manera fue del 1% de la longitud seleccionada, es decir 28 centímetros tal y como se representa en la Figura 9.

Adicionalmente se trabajó con una presión a la salida de 0.058 atm y por acción de la gravedad circule el fluido por todo el sistema.

Figura 9. *Inclinación del humedal artificial*



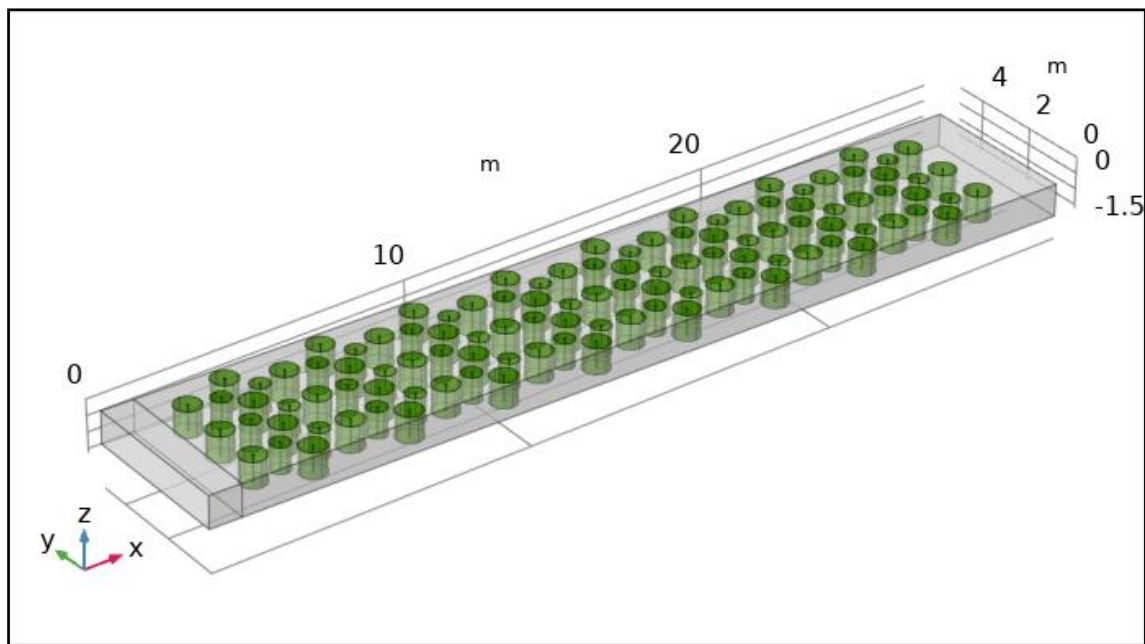
El material poroso posee partículas (arena) con un tamaño de 1 mm a 7 mm, bajo estas medidas la porosidad idónea que selecciono para el sistema fue de 0.3, logrando mantener el fluido al interior del sistema lo suficiente (24 h) para que se lleve a cabo los procesos involucrados en el humedal (Astorga Del Canto, 2018).

Las plantas contienen zonas radicales que alteran la porosidad del medio, ocupando más espacio y alterando la permeabilidad de esta, según estudios en dichas zonas el valor cambia a 0.25, porosidad que se agregó al sistema (Silva & Zamora, 2005).

En cuanto a plantas se analizó la estructura morfológica y se representó en el diseño geométrico, para que puedan cumplir con los procesos que le corresponden al interior del sistema, según Astorga Del Canto (2018) menciona que el número de plantas debe ser en un rango de 1 a 6 plantas por metro cuadrado, el modelo contempla 97 plantas para un área de 140 m² es decir 1.44 plantas por cada m² (Ver Figura 9).

Por otra parte, se ha colocado cilindros en representación de las raíces, con la finalidad de evitar una elevada cantidad de dominios u objetos, caras, aristas y contornos, la finalidad es reducir el tiempo de compilación que suele incrementarse al poseer una geometría compleja.

Figura 10. Representación geométrica del humedal artificial



2.2.3 Modelos matemáticos de las físicas del proceso de depuración

2.2.3.1 Flujo del fluido sección de entrada al humedal

La ecuación que describe dicho proceso es la de Navier Stokes para flujo laminar incompresible estacionario para el fluido y materia orgánica, mientras que para metales pesados y nutrientes es de carácter transitorio (Cantero, 2000).

Ecuación 2. Ecuación de balance de cantidad de movimiento lineal (CML) para fluidos (Acheson, 1991).

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} = \nabla[-\rho\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\rho\nabla(\mathbf{u}) = \mathbf{0} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

El primer término para la Ecuación 1 corresponde a la acumulación de CML, sumado al transporte convectivo de CML, esto igualado al transporte de CML por presión, \mathbf{I} equivale al tensor unitario y \mathbf{K} al transporte viscoso, \mathbf{F} representa todas las fuerzas aplicadas una de ellas es la gravedad.

La Ecuación 1.1 equivale a cero debido a que se trata de un flujo netamente incompresible, \mathbf{u} corresponde al vector velocidad y su valor también será de cero en base a lo siguiente:

$$\nabla\mathbf{u} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \mathbf{0} \quad \text{Ecuación 2}$$

El transporte viscoso se rige en base a la ley de Newton para flujo viscoso, μ es constante con respecto al esfuerzo cortante, en vista de esta constante el otro término desaparece de la ecuación.

$$\mathbf{K} = \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

2.2.3.2 Ecuaciones de la dinámica de movimiento del fluido

El flujo y transporte de los lixiviados por todo el sistema, se rige de acuerdo con las leyes de la física por tanto un flujo del tipo turbulento sería lo más indicado para resolver el comportamiento a través del medio poroso se usará la siguiente ecuación basada en la ley de Darcy.

Ecuación 4. Flujo en lecho poroso, ley de Darcy, y balance de masa (Escobar, 2000).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla(\rho\mathbf{u}) = \mathbf{Q}_m \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu}\nabla\rho \quad \text{Ecuación 3.1}$$

En la Ecuación 3, el primer término corresponde a la acumulación de masa que se tendrá en el proceso, el siguiente termino equivale al transporte convectivo de masa, lo que dará

origen a la generación de masa. La Ecuación 3.1 representa la ley de Darcy, κ corresponde a la permeabilidad.

2.2.3.3 Transporte de especies diluidas por un medio poroso

El transporte de especies diluidas por un medio poroso define adecuadamente el proceso que ocurre al interior de un humedal artificial, la mayor cantidad de contaminantes que logran a travesar los previos tratamientos se encuentran disueltos parcial o totalmente, algunos de ellos logran ser retenidos en el lecho poroso (suelo), sin embargo donde ocurre mayor degradación es con la interacción de los contaminantes y la zona radicular de las plantas, donde se alojan también la mayor parte de microorganismos.

La inserción de reacciones de degradación o adsorción requiere de constantes o coeficientes útiles para recrear los procesos reales (*Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10*).

El estudio para cada especie química se rige mediante la siguiente ecuación que describe el transporte de especies diluidas a través de un medio poroso:

Ecuación 1. Transporte de especies diluidas en medios porosos (**Bear, 2013**).

$$\frac{\partial(\varepsilon_{\rho}C_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_{Pj})}{\partial t} + \nabla J_j + \mathbf{u}\nabla C_j = R_j + S_j \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

ε_{ρ} = Porosidad del lecho

C_j = Concentración del componente j en fase líquida

$C_{P,j}$ = Concentración del componente j en fase sólida

ρ = Densidad del lecho en la fase sólida

\mathbf{u} = Velocidad de flujo

R_j = Reacción de j en fase líquida

S_j = Reacción de j superficial

De manera que el primer término de la Ecuación 4, representa la acumulación del componente j en la fase líquida, mientras que el segundo término la acumulación en la fase sólida, seguido del transporte por difusión y convección respectivamente.

$$J_j = -D_{e,j} \nabla C_j \quad \text{Ecuación 4.1 (Ley de Fick)}$$

Donde:

$D_{e,j}$ = Coeficiente de difusión molecular de j en la fase líquida

$$\theta = \varepsilon_\rho \quad \text{Ecuación 4.2 (Saturación del lecho)}$$

2.2.3.4 Reacciones de superficie

Las reacciones biológicas se describen mediante modelos cinéticos, estas se relacionan entre sí, ya que en conjunto funcionan para degradar la materia orgánica presente, basándose en las reacciones químicas descritas según **Metcalf & Eddy (1995)** se definió las siguientes reacciones para la degradación de materia orgánica y nutrientes en conjunto con la presencia de oxígeno.

Reacción para degradar demanda biológica de oxígeno

$$R_{DBO5} = -k_{DBO}[DBO]$$

Reacción para degradar demanda química de oxígeno

$$R_{DQO} = -k_{DQO}[DQO]$$

Reacción para la eliminación/generación de amonio

$$R_{NH_4^+} = -k_{NH_4^+}[NH_4^+] + k_{DBO}[DBO]$$

Reacción para la eliminación de nitratos

$$R_{NO_3^-} = -k_{NH_4^+}[NH_4^+] + k_{DBO}[DBO] - k_{NO_3^-}[NO_3^-]$$

Reacción para la eliminación de fosfatos

$$R_{PO_4^-} = -k_{PO_4^-}[PO_4^-] + k_{DBO}[DBO]$$

Reacción para el consumo de oxígeno

$$R_{O_2} = +k_{O_2}([O_{2\ sat}] - [O_2]) - 12.5 \cdot k_{DBO}[DBO] - 2.5 \cdot (-k_{NH_4^+}[NH_4^+] + k_{DBO}[DBO])$$

Todas las concentraciones, constantes y coeficientes se detallan en *Tabla 8*, *Tabla 9* y *Tabla 10*.

El oxígeno disponible en un humedal artificial es clave para la degradación de materia orgánica, también para la transformación del amonio a nitratos, a su vez la degradación de nutrientes se relaciona con la degradación de DBO, y es lo que representó en el software mencionado.

Existen ciertas reacciones principales que se desarrollan dentro de los sistemas como la bioacumulación de metales pesados que interactúa con las raíces de las plantas para posteriormente distribuirse por toda la planta por translocación y distribución para ello es necesario el uso de los coeficientes de partición (Méndez et al., 2008).

A continuación, se presenta la ecuación que se usará para describir dicho proceso:

Ecuación 3. Reacciones superficiales (Levenspiel, 2010).

$$\frac{\partial C_{s,j}}{\partial t} + \nabla_t(-D_j \nabla_t C_{s,j}) = R_{s,j} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$N_{s,j} = -D_j \nabla_t C_{s,j} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

La Ecuación 5 describe el transporte por difusión, el primer componente se refiere a la acumulación de j en la fase sólida, mientras que el segundo componente es el transporte por difusión de la fase sólida, igualado a la reacción de j superficial.

$$\theta_j = C_{s,j} \sigma_j \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Esta ecuación representa la cobertura superficial que tendrá el sistema.

$$\frac{\partial C_{s,j}}{\partial t} = R_{b,j} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Por último, se tiene la reacción de j en fase líquida, esta será igual a cero durante el proceso en estado temporal.

2.2.4 Definición inicial de los parámetros

Para establecer los valores iniciales de las concentraciones de los diferentes contaminantes a la entrada del humedal se seleccionó datos bibliográficos reales.

Las propiedades del fluido (lixiviados) no difieren en gran medida con las del agua, sobre todo tomando en cuenta que el sistema diseñado es usado como post-tratamiento por tanto dicho fluido posee características similares a la del agua en condiciones normales.

Tabla 6. Factores que influyen en el flujo de agua a través del suelo

Factor	Valor	Bibliografía según:
Caudal	90 m ³ /d	-----
Porosidad	0.3	(Astorga Del Canto, 2018)
Conductividad hidráulica	2.94 x 10 ⁻⁴ (m/s)	(Rolando et al., 2020)
Densidad	1000 (kg/m ³)	(Gargallo, 2017)
Viscosidad	1.00 x 10 ⁻⁴ (Pa·s)	(Giraldo, 2014)
Gravedad	9.81 (m/s ²)	(Rolando et al., 2020)

Entre los parámetros a tratar se tiene: DQO, DBO, especies nitrogenadas, fosfatos y ciertos metales pesados (Ag, Cd, Cr, Hg, Pb, y Zn) ver *Tabla 6*.

Tabla 7. Concentración de los parámetros seleccionados para la simulación

Parámetro	Concentración a la entrada del humedal artificial subsuperficial horizontal (mg/l)
DBO	1024
DQO	4330
Oxígeno (O₂)	2
O₂ de saturación	6
Amonio (NH₄⁺)	724
Nitratos (NO₃⁻)	60
Fosfatos (PO₄⁻)	70
Cadmio (Cd)	0.4
Cobre (Cu)	2.6
Cromo (Cr)	0.16
Mercurio (Hg)	1 x 10 ⁻⁴
Plata (Ag)	0.01
Niquel (Ni)	8.12
Plomo (Pb)	1.8
Zinc (Zn)	0.45

Fuente: (Villacres, 2011)

La temperatura y presión que se registra en condiciones normales fue de 298.15 K y 1 atm.

Las constantes cinéticas, coeficientes de degradación y de adsorción o partición fueron seleccionadas cuidadosamente de manera bibliográfica para efectuar la simulación a partir de datos experimentales reales (*Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10*).

Tabla 8. *Coefficientes de degradación para materia orgánica*

Materia Orgánica	Coefficiente de degradación (k) (d⁻¹)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	6
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	3
Oxígeno (O₂)	0.662

Fuente: (Bernardo & Vásquez, 2017)

Tabla 9. *Constantes cinéticas de primer orden para nutrientes*

Nutrientes	Coefficiente de degradación (k) (d⁻¹)
Amonio (NH₄⁺)	0.556
Nitratos (NO₃⁻)	1
Fosfatos (PO₄⁻)	5

Fuente: (Metcalf and Eddy, 1995)

Tabla 10. *Coefficientes de Partición para los metales pesados*

Especie Química	Coefficiente de partición (kg/m³)
Cadmio (Cd)	0.794
Cobre (Cu)	0.501
Cromo (Cr)	7.943
Mercurio (Hg)	6.309
Niquel (Ni)	1.25
Plata (Ag)	0.398
Plomo (Pb)	15.848
Zinc (Zn)	1.258

Fuente: (Allison & Allison, 2005)

2.2.5 Tiempo de estudio

El análisis comprendió un estudio de carácter dinámico, de manera que se logró visualizar la variación de las concentraciones mediante gráficas en 3D, además de los perfiles de concentración exclusivamente para metales pesados.

Un tiempo de estudio en estado estacionario se ejecutó para el análisis correspondiente de flujo del fluido, posteriormente se integró con la física estacionaria de la remoción de materia orgánica y nutrientes

2.2.6 Diseño del mallado

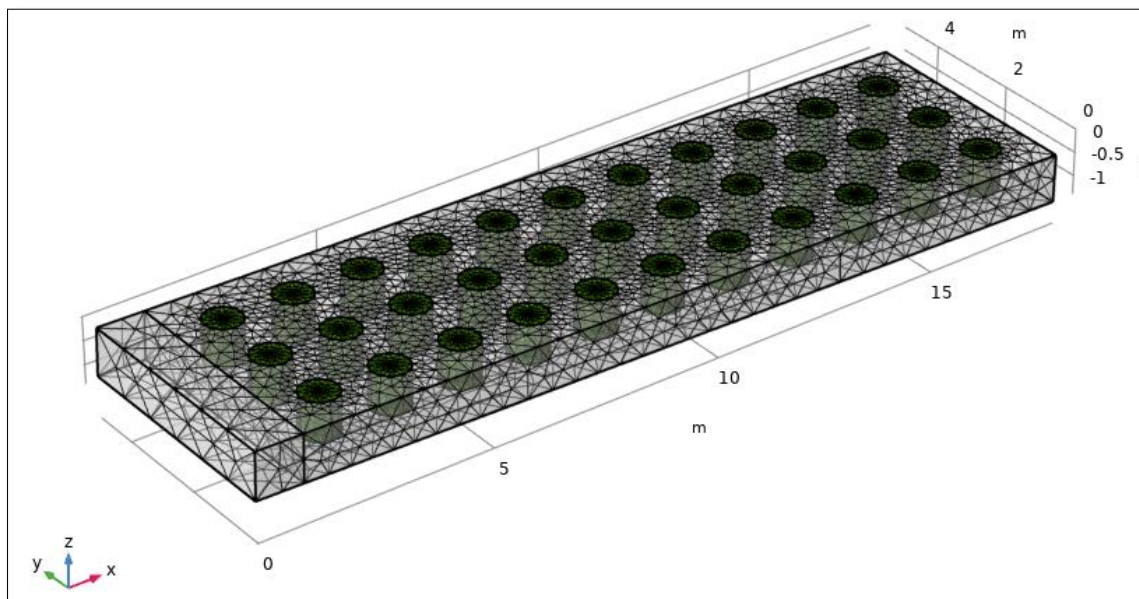
La construcción del mallado se creó con la finalidad de resolver ecuaciones diferenciales relacionadas al flujo, transporte y reacciones mediante el método de elementos finitos, en el diseño generado mientras más fino sea la malla, los cálculos conllevan a una respuesta

más real a cambio de un mayor tiempo de cálculo durante la simulación, de manera contraria sucede con un mallado grueso. Por ello se optó por un mallado fino, para que los resultados sean más exactos (Cantero, 2000).

Los parámetros del tamaño de elemento ayudan a consolidar un mallado eficaz, el tamaño máximo del elemento es de 0.141m mientras que el mínimo es de 0.0266 m, el factor de curvatura es clave para redondear aquellas zonas irregulares existentes entre un objeto y otro y este equivale a 0.5 m, a menudo es sistemas complejos como este la resolución de las regiones estrechas ocasionan cierto margen de error menor al 1%, para evitar estos inconvenientes el software cuenta con 3 sistemas de optimización básico, medio y alto, cada uno de ellos evita la formación de zonas estrechas o muy amplias (Fontes et al., 2019).

La decisión para la adecuada selección del mallado varió con respecto a la física de estudio que se incorporé, pero se ejecutará por un método de análisis de sensibilidad para su selección la forma que se predispone es tetraédrica libre.

Figura 11. *Malla (fina) del humedal artificial*



2.2.7 Resultados

La evaluación de la simulación generó una serie de resultados en base a lo procesado, en este caso se obtuvo diagramas de comportamiento de concentración final de todos los

elementos anteriormente descritos, al igual que la velocidad, perfiles de presión, líneas de flujo, y el comportamiento de cada una de ellas interaccionando con el medio.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Discusión y Análisis de resultados

3.1.1 Análisis basados en la física correspondiente a ley de Darcy

El flujo del agua a través del suelo se rige bajo factores físicos como la conductividad hidráulica, gravedad del sistema, permeabilidad del suelo (arena 0 – 7 mm, zeolita 0.8 – 2 mm, grava fina 7 - 15 mm, grava gruesa 15 - 30 mm, como se describe en la *Tabla 4*) (**Astorga Del Canto, 2018**), densidad y viscosidad del fluido (ver *Tabla 6*).

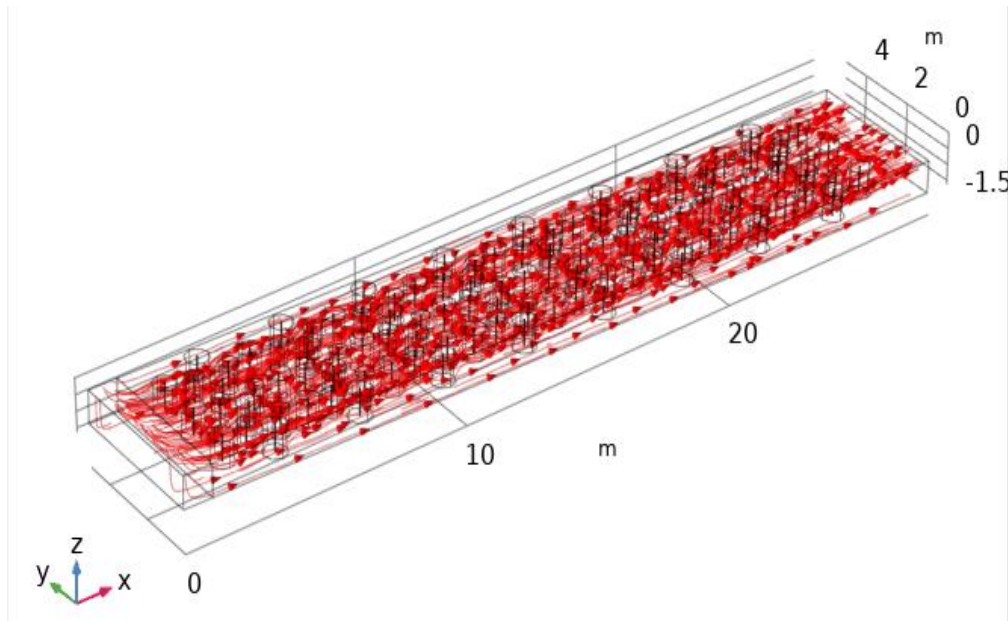
El movimiento que describe el paso del agua en un medio poroso (suelo y plantas) es relevante para conocer y establecer con mayor precisión la capacidad de agua que tiene un humedal artificial, así también para estimar la conexión que posee con el medio radicular de las plantas y también de microorganismos que se alojan en estas zonas (**Rolando et al., 2020**).

Las líneas de flujo que se generaron como resultado de la simulación, se obtuvieron de la resolución de las ecuaciones de flujo que se rigen bajo la ley de Darcy dentro de un campo tridimensional, es decir un campo espacial x, y, z por donde circula los lixiviados al humedal artificial, atravesando el medio poroso, mediante el mallado del sistema (**Cardona, 2019**).

La heterogeneidad del sistema permite obtener lo que se muestra en la *Figura 12*, las líneas de flujo representan el movimiento del fluido a través del medio poroso y las zonas radiculares de las plantas, el movimiento de estas ocurre debido a la inclinación que posee (28 cm) a lo largo del humedal artificial, además de la presión existente (**Rolando et al., 2020**).

La distribución del fluido del sistema en un tiempo estacionario permitió conocer su comportamiento, y como se observa estas tienden a extenderse de manera horizontal por todo el sistema, incluso atravesando la zona radicular que es vital para conseguir un mejor post-tratamiento de lixiviados por las reacciones que ocurren en este sector.

Figura 12. Línea de flujo: Campo de velocidad de Darcy



La velocidad alcanzada dentro de los sistemas porosos es relativamente baja y depende de factores físicos como conductividad hidráulica, porosidad del sistema, viscosidad y densidad del fluido (**Rolando et al., 2020**).

De modo que los lixiviados post-tratados van incursionándose en las cavidades intersticiales del medio, estas están sujetas a las fuerzas predisuestas de diseño o naturales (presión, gravedad, inclinación), ocasionando una determinada dirección a una velocidad promedio en conjunto con el aire que también circula por estos espacios.

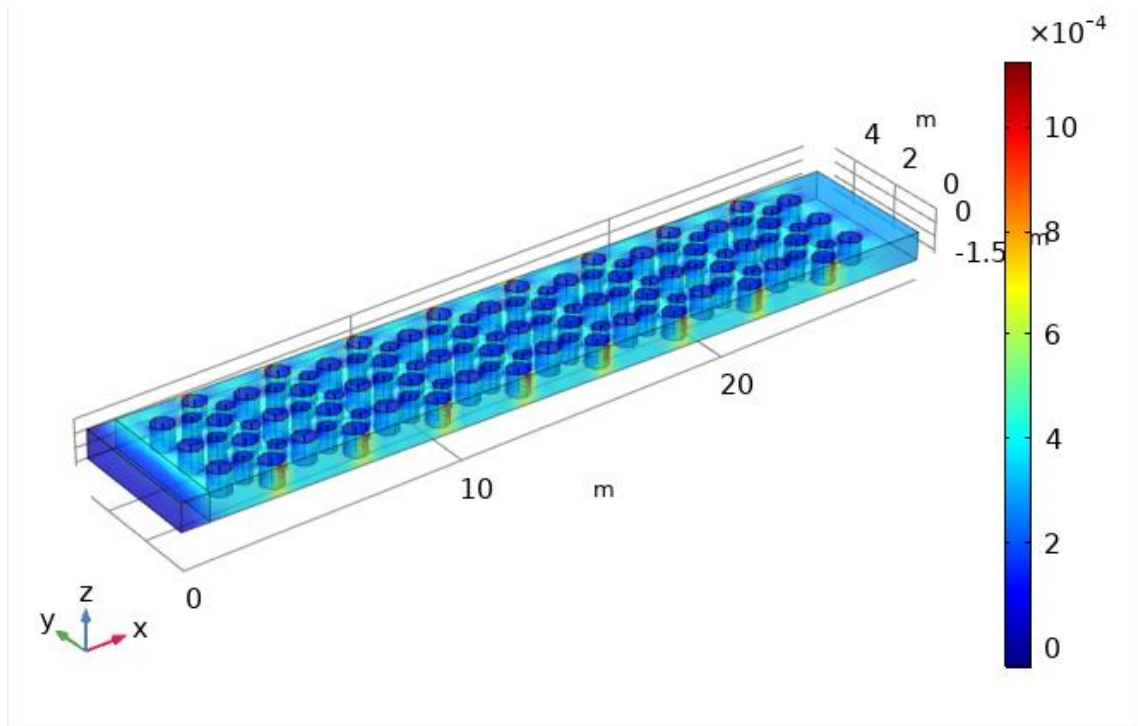
También se generaron diminutas turbulencias a velocidad bajas y es exactamente lo que describe la ley de Darcy en medios porosos parcialmente saturados (**Cardona, 2019**).

La velocidad máxima a la entrada del sistema es de 2.89×10^{-4} m/s, alcanzando pequeñas turbulencias que alcanzan velocidades de hasta 12×10^{-4} m/s, después de alcanzar el estado estacionario posee una velocidad promedio de 7×10^{-4} m/s aproximadamente tal y como se representa en la Figura 13.

Los factores porosidad y conductividad hidráulica del sistema influyen de manera drástica en la velocidad del sistema, la primera de ellas se relaciona con el tipo de material poroso esté presente en el mismo y el tamaño de partícula, según **Astorga Del Canto (2018)** manifiesta que si se tiene arena con un tamaño de 1 a 7 mm, la

porosidad será de 0.3 0 0.66, y por tanto se tomó el valor de 0.3 para que el fluido mantenga mayor contacto con el sistema en las primeras 24 horas, de igual forma sucede con la conductividad hidráulica cuyo valor es de 2.94×10^{-4} m/s para suelos húmedos, esto sucede una vez que el sistema haya alcanzado la fase estacionaria.

Figura 13. Campo de velocidad (m/s)

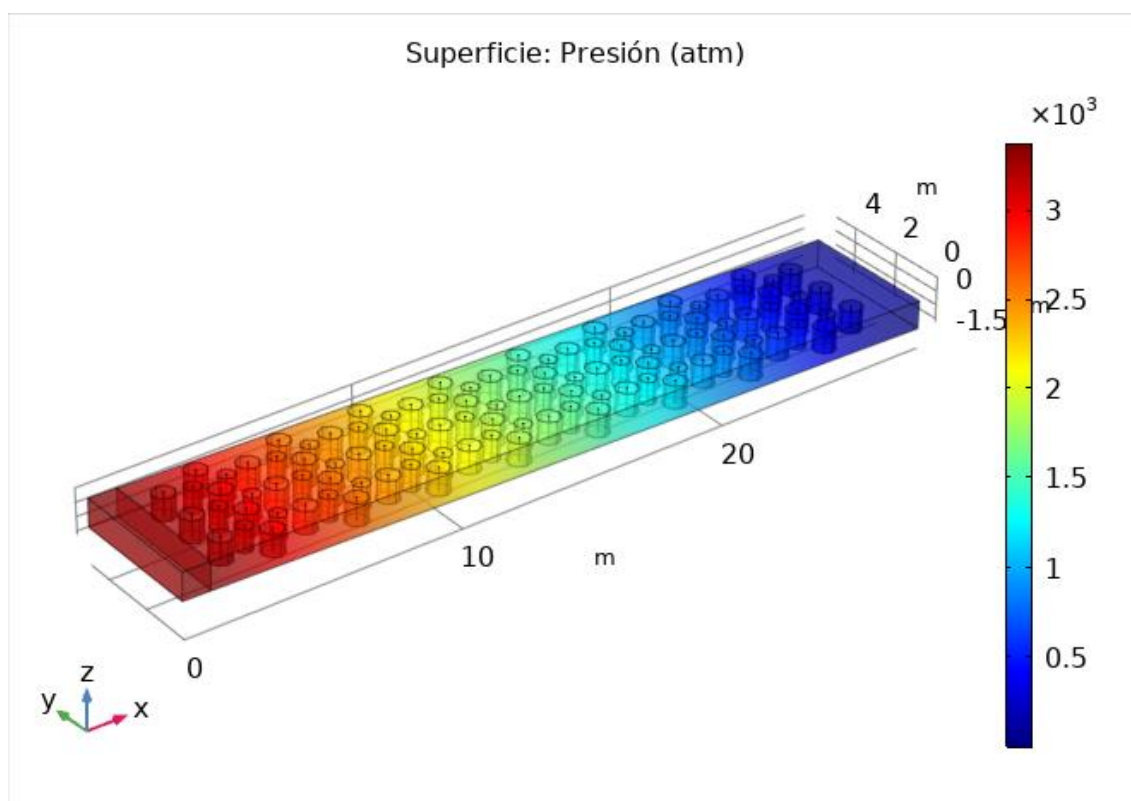


El comportamiento del fluido en el suelo poroso no saturado puede ser interpretado por la presión que manifiesta el sistema esto se debe al avance del fluido, en las primeras etapas del proceso posee mayor dificultad para infiltrarse a través del medio poroso.

Mientras avanza la dificultad disminuye, es decir la presión al comienzo del humedal artificial fue mayor alcanzado valores de 2.5 atm, y descendió paulatinamente hasta llegar a cero atmósferas así se demuestra en la *Figura 14*.

Adicionalmente existe una ligera inclinación del 1% a lo largo del sistema, existen 28 cm de diferencia entre la entrada y la salida, por tanto, hace que la presión a la entrada aumente y tienda a caer hasta cero en la salida.

Figura 14. Presión en el sistema (atm)



3.1.2 Análisis de la degradación de materia orgánica

El análisis de la materia orgánica permite conocer el tipo de compuestos que están presentes en una determinada muestra, bien sea de suelo o aguas, y según su resultado aplicar un tratamiento para la remediación, en este caso se evaluó el post-tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Ambato.

Para lograr la efectividad requerida se debe cumplir con las normas establecidas, si se tiene una relación DBO/DQO menor a 0.2 la mayoría de los contaminantes presentes es de naturaleza no biodegradable, mientras que un valor cercano a 0.6 son considerados de naturaleza biodegradable, el resultado obtenido en este estudio presenta un valor de 0.25 es decir la cantidad de compuestos presentes son de carácter ligeramente biodegradable (Bernardo & Vásquez, 2017).

Por consiguiente se deduce que la materia orgánica presente es moderadamente biodegradable, tardará un determinado tiempo para lograr su degradación dependiendo de los años de vida que tenga el relleno sanitario, lo que impide o no alcanzar altas eficiencias de remoción de DQO y DBO (Restrepo, 2015).

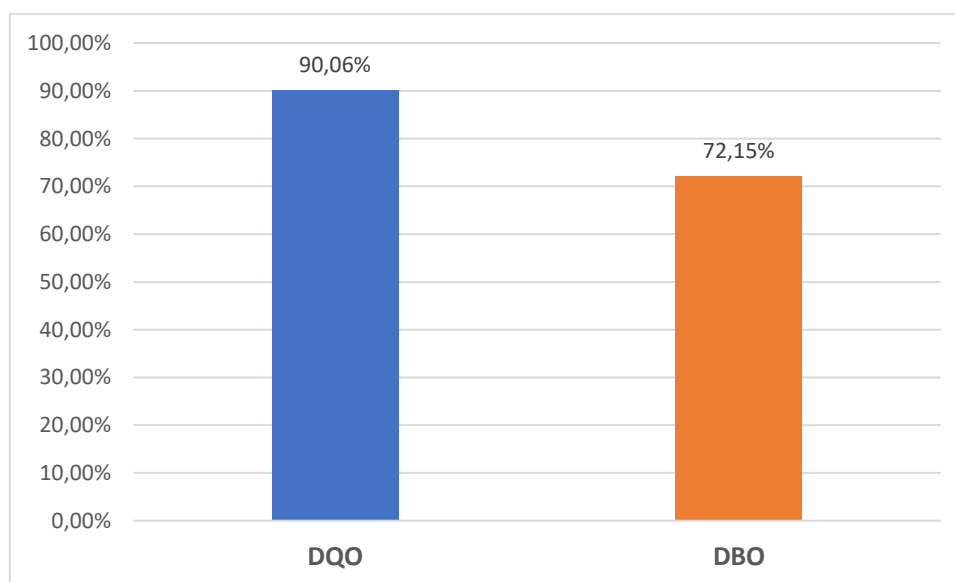
Tabla 11. Resultados de la concentración final promedio de materia orgánica obtenidos del software COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4

Materia orgánica	Concentración inicial (mg/l)	Concentración final (mg/l)	Límite máximo permisible (mg/l)	
			En alcantarillado	En agua dulce
DBO	1024	101.82	250	100
DQO	4330	1205.90	500	200

Un factor limitante dentro de los humedales artificiales subsuperficiales es la falta de aireación y por tanto limitada presencia de oxígeno, los microorganismos necesitan de este elemento para poder degradar los diferentes compuestos de carácter orgánico e inorgánico.

Esa es la principal razón del porque no se llegó a degradar completamente la materia orgánica (*Tabla 11*), a pesar de que los resultados obtenidos en la simulación compilada por el software COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4 se encuentra entre el 70% y 90% de degradación como se aprecia en la *Figura 15*, demostrando mayor presencia de contaminantes de carácter inorgánico (**Bernardo & Vásquez, 2017**).

Figura 15. Porcentaje de materia orgánica degradada



En las *Figura 16* y *Figura 17* se observa como la materia orgánica es degradada en especial en las zonas radicales en vista de que en estos lugares existe mayor aireación debido a que la porosidad aumenta por el volumen ocupado por raíces, permitiendo que

el aire drene y penetre en estas zonas muy característico en humedales artificiales subsuperficiales así los señala **Yalcuk & Ugurlu (2009)**.

En estos sistemas se genera zonas libres de oxígeno, dependiendo del material poroso que se esté usando, se usó partículas de 1 a 7 mm con 0.3 de porosidad lo que representa el tipo de arena usado, influyendo y afectando en la degradación de DQO y DBO.

Figura 16. Degradación de DBO

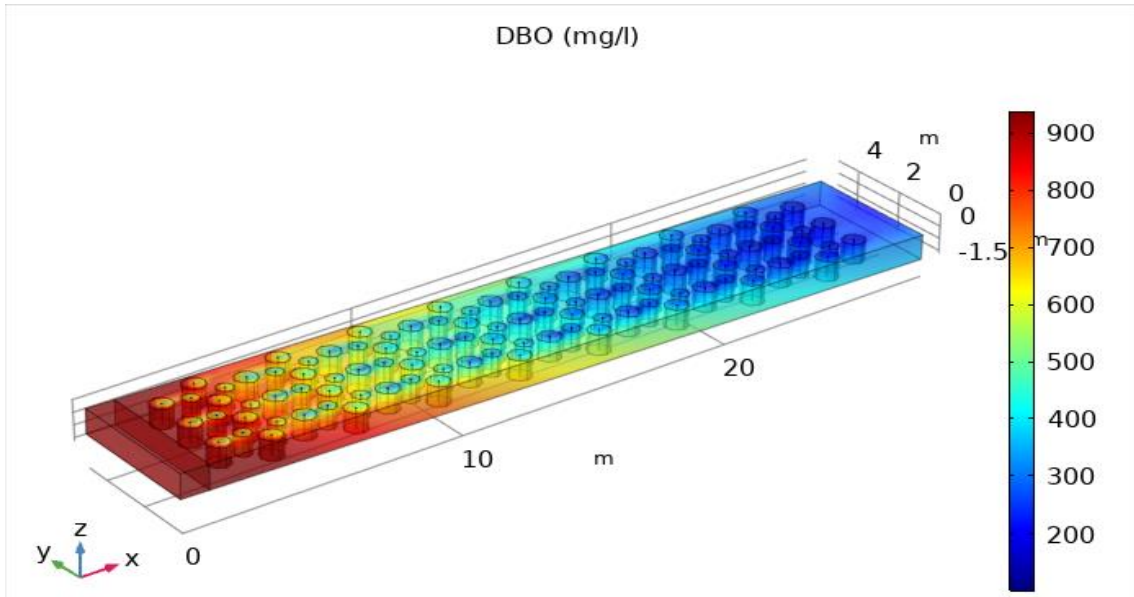
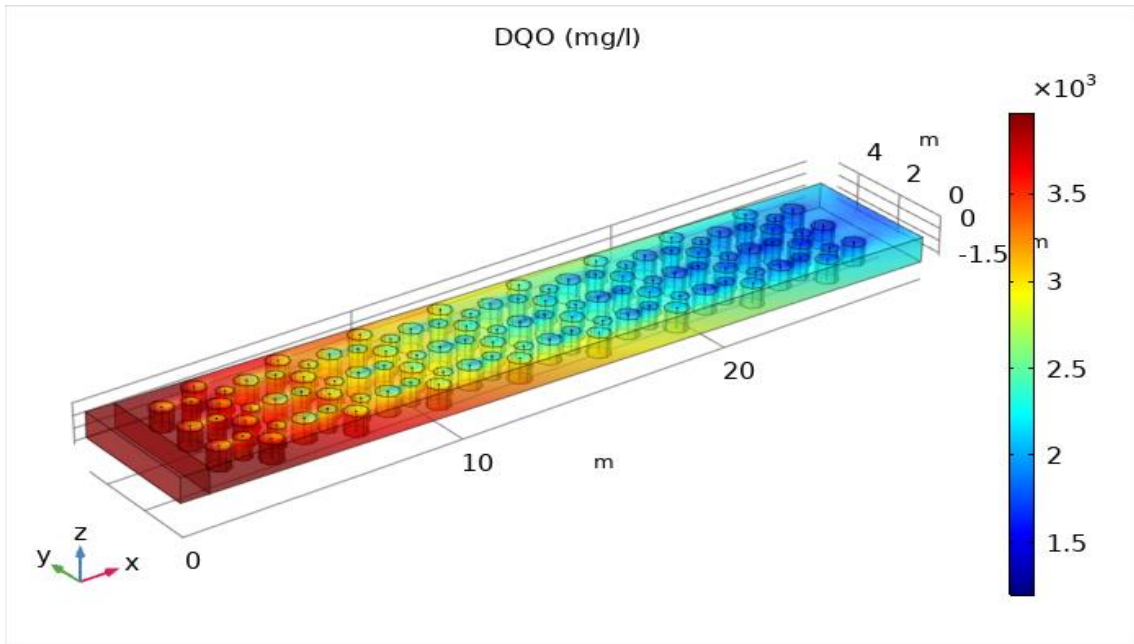


Figura 17. Degradación de DQO



1.1.1 Análisis del consumo de nutrientes

La entrada de nutrientes al sistema se da especialmente por compuestos nitrogenados que están presentes en los lixiviados, el ion amonio (NH_4^+) se generó a medida que la materia orgánica disminuye, estas dos son dependientes e inversamente proporcionales, sin embargo esta especie nitrogenada no resulta significativamente asimilable, es por ello que atraviesa una etapa de conversión por bacterias nitrificantes, hasta conseguir la forma más asimilable, los nitratos (NO_3^-), estos en conjunto con los fosfatos (PO_4), representan dos de los principales nutrientes necesarios para microorganismos y especies vegetales existentes en un humedal artificial (Bernardo & Vásquez, 2017)

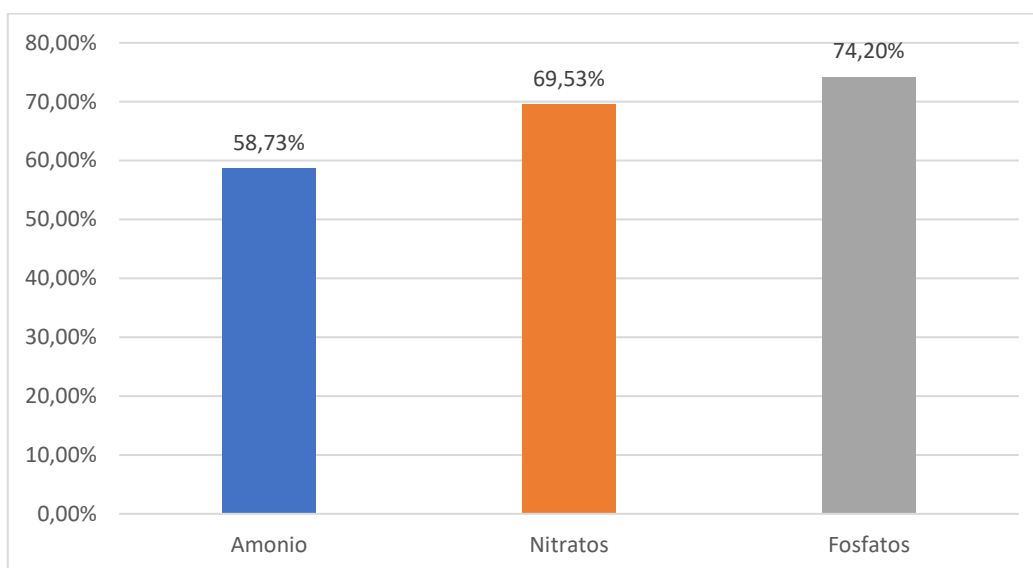
Tabla 12. Resultados de la concentración final promedio de nutrientes obtenidos del software COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4

Nutriente	Concentración inicial (mg/l)	Concentración final promedio (mg/l)	Límite máximo permisible (mg/l)	
			En alcantarillado	En agua dulce
Amonio	724	292.78	----	30
Nitratos	10	66.17	----	----
Fosfatos	70	18.06	15	10

En la *Tabla 12* se puede apreciar la concentración final promedio alcanzada al atravesar el sistema diseñado para la adsorción de nutrientes, pese a no alcanzar los valores establecidos por el Acuerdo Ministerial No. 097, no generan inconvenientes de gran impacto ambiental, por el motivo de que son nutrientes necesarios para llevar a cabo funciones vitales tanto de plantas como vida acuática (August, 1986).

En los nitratos se aprecia un incremento aparente de 10 mg/l a 66.17 mg/l, esto se generó como el resultado de la conversión alrededor de un 30% de amonio a nitrato es decir un total de 227,2 mg/l de nitratos fueron degradados a 66.17 mg/l.

Figura 18. Porcentaje adsorbido de nutrientes en la matriz

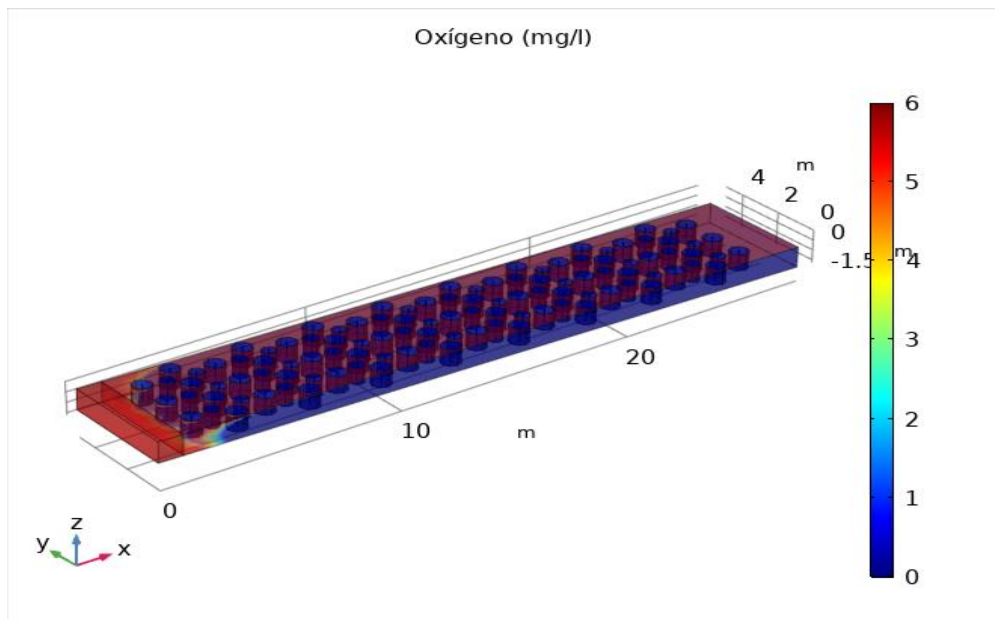


Los porcentajes de adsorción *Figura 18* de los nutrientes nitratos y fosfatos representan una regular eficacia para humedales subterráneos del tipo horizontal, sin embargo según el estudio realizado por **Bakhshoodeh et al. (2020)** y **Mosquera (2012)** en este tipo de humedales se remueve alrededor del 70% para estos nutrientes, concordando con los resultado alcanzados.

Como ya se mencionó una de las razones que impide tener una mayor eficiencia es la cantidad de oxígeno existente 1.27 mg/l es el valor de la concentración final promedio para todo el sistema, este valor limita a las bacterias nitrificantes pese a que dicha concentración es idónea, no es homogénea para todo el humedal, y no permite que el proceso de nitrificación se desarrolle con normalidad, evitando alcanzar mejores resultados.

La transferencia de oxígeno desciende desde el contacto con la superficie hacia el interior del humedal artificial como se refleja en la *Figura 19*.

Figura 19. Consumo de oxígeno



La transformación de amonio a nitrato por bacterias nitrificadoras, forma parte del proceso del nitrógeno a su forma más estable que son los nitratos, por esta razón a medida que se da esta conversión, la concentración de nitratos es mayor, a la par que está siendo consumida como nutriente por las especies vegetales, aproximadamente el 30% o 40% de nitrógeno amoniacal es convertido a nitratos **Mosquera (2012)**.

Figura 20. Transformación y degradación del amonio

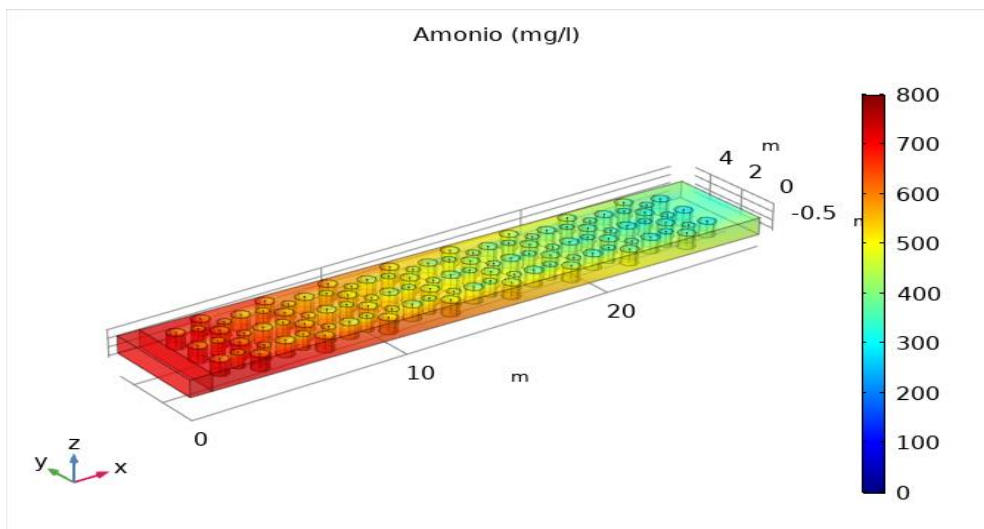


Figura 21. Consumo de nitratos

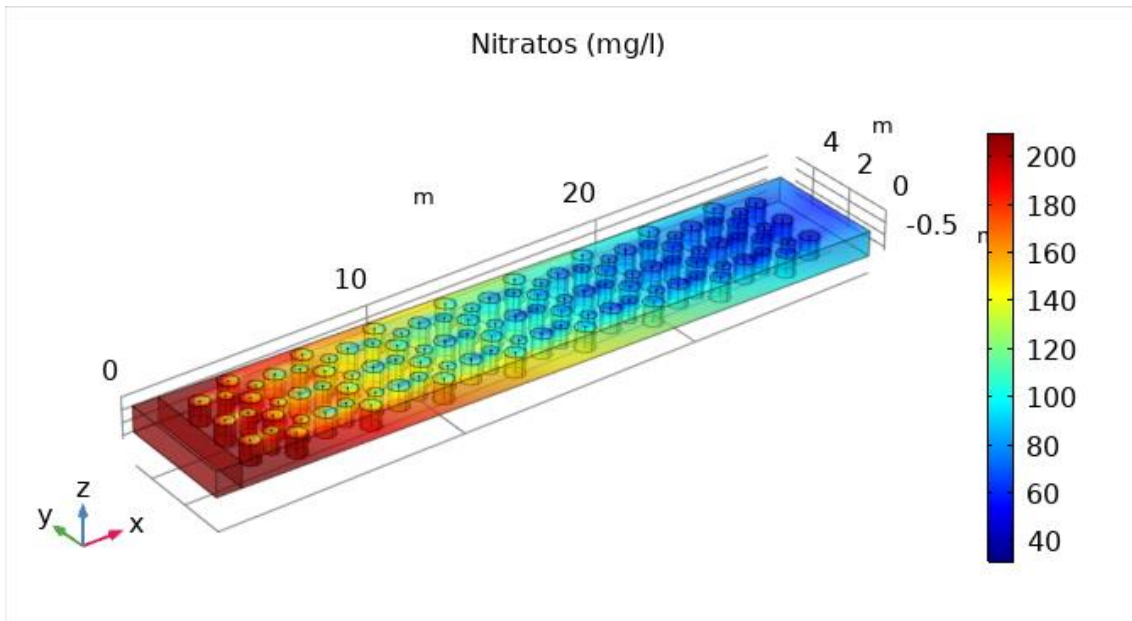
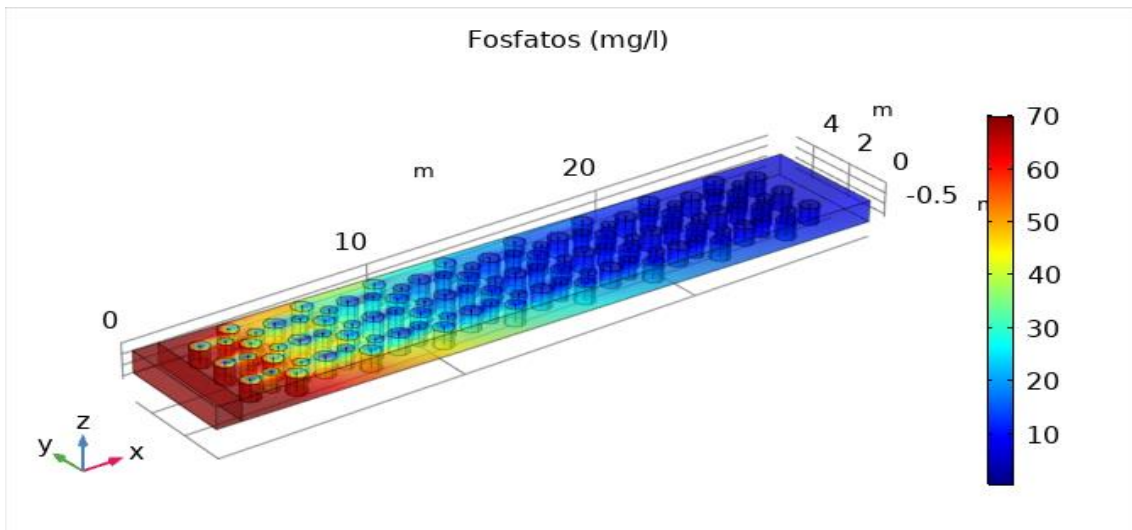


Figura 22. Consumo de fosfatos



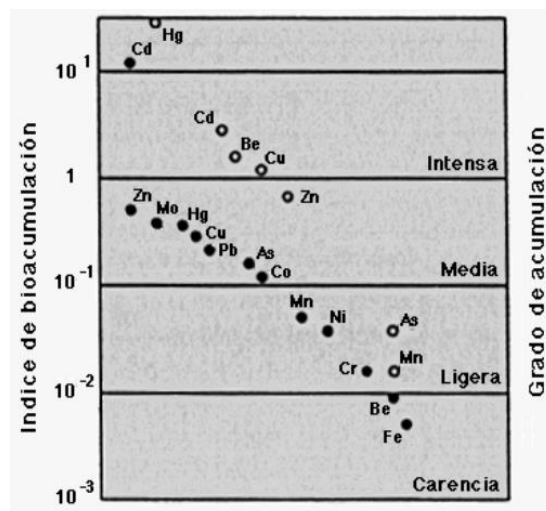
3.1.3 Análisis de la reducción de la concentración de metales pesados

La adsorción de metales pesados por sistemas biológicos es una de las alternativas más rentables y sobre todo económicas por ello son usadas con frecuencia.

Estos sistemas tienen la capacidad de acumular en su interior concentraciones de elementos traza de acuerdo con la *Figura 23* indica cuáles elementos presentan mayor índice de bioacumulación entre los que destaca el zinc, mercurio, cobre y plomo y en menor grado el cromo y manganeso, para cada uno el mecanismo de acción es diferente

y está relacionado directamente con la disponibilidad de acumulación en la planta y microorganismos (Méndez et al., 2008).

Figura 23. Índice de bioacumulación para metales pesados (mg metal/kg planta)



Fuente: (Méndez et al., 2008)

La reducción de la concentración disuelta de un metal es causada por la adsorción en la matriz del sistema, es decir si se tiene un coeficiente de partición elevado como el Pb significa que en el equilibrio la concentración en fase sólida (planta) es mayor con respecto a la fase acuosa, y a la par posee una gran capacidad de adsorción por parte del sistema y de manera contraria sucederá con coeficientes de partición bajos como en el caso de Cd, Cu y Ag (Pincay & Vallejo, 2019).

Tabla 13. Resultados de la concentración final promedio de metales pesados obtenidos del software COMSOL MULTHYPHYSICS versión 5.4

Metal	Concentración inicial (mg/l) Tiempo: 0 d	Concentración final promedio (mg/l) Tiempo: 120 d	Límite máximo permisible (mg/l)	
			En alcantarillado	En agua dulce
Cadmio	0.4	0.069	0.02	0.02
Cobre	2.6	1.11	1	1
Cromo	0.16	1.46 x 10 ⁻⁴	0.5	0.5
Mercurio	1 x 10 ⁻⁴	3.15 x 10 ⁻⁶	0.01	0.005
Niquel	8.12	0.63	2	2
Plata	0.01	4.40 x 10 ⁻³	0.5	0.1
Plomo	1.8	2.88 x 10 ⁻⁴	0.5	0.2
Zinc	0.45	0.025	10	5

A menudo en el suelo se puede encontrar 17 elementos traza como: Zn, Se, Cu, Ni, Mn, Mo, Co, Cr, Fe, Ag, Cd, Hg, Pb, As, Tl, Bi, y Sb que son muy tóxicos y perjudiciales no solo para el medio ambiente sino también para todos los seres vivos debido a que ingresan en la cadena trófica. En este estudio se trabajó con 8 metales pesados como cadmio, cromo, mercurio, plata, cobre, níquel, plomo y zinc (**Pincay & Vallejo, 2019**).

Estos elementos al no ser biodegradables en el medio ambiente suelen ser difíciles de eliminar o degradar, sin embargo, por medio de la adsorción pueden acumularse dentro de un organismo biológico y las plantas debido a su alta resistencia son la matriz idónea para llevar a cabo este proceso conocido como fitorremediación.

La fitorremediación se da en 3 fases la primera es la ya mencionada “bioacumulación”, en la segunda ocurre la estabilización por parte de la planta donde usa los metales adsorbidos en funciones específicas como defensa contra patógenos, virus e incluso herbívoros, y para sí mismas evitando el estrés biótico, y finalmente en la volatilización de estos compuestos, las plantas usadas con estos fines son de carácter autótrofo es decir necesitan la energía del sol para subsistir (**Méndez et al., 2008**).

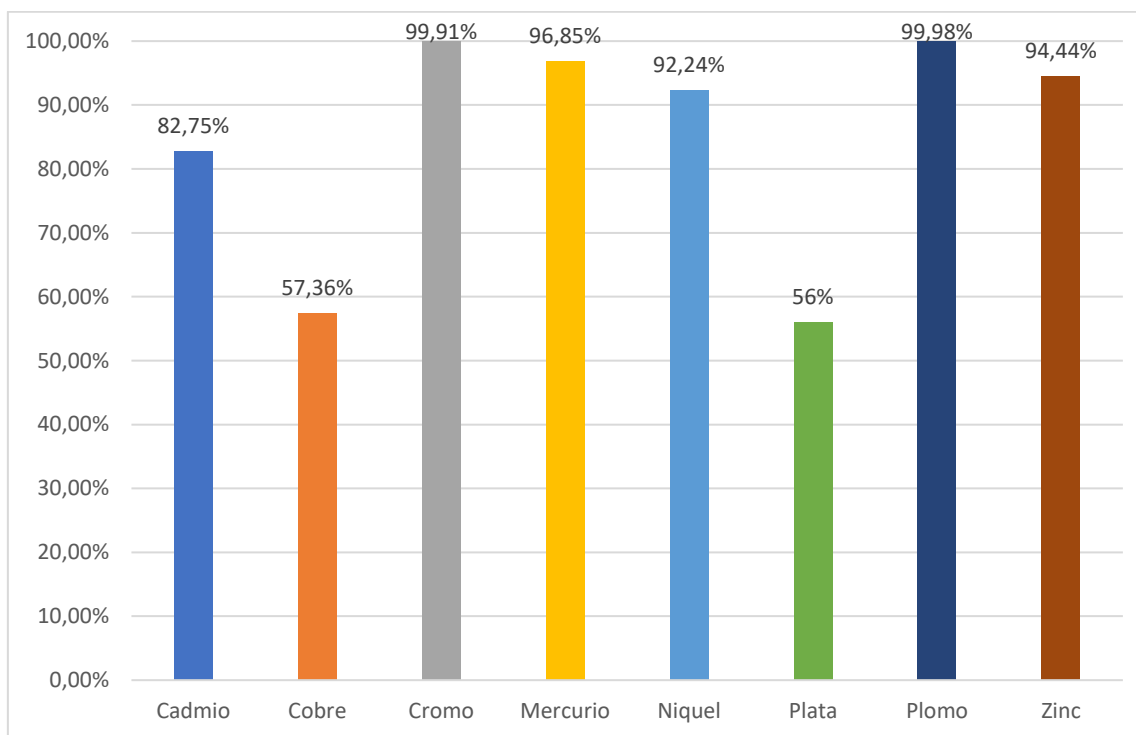
En la *Tabla 13* se puede observar la reducción de la concentración de los metales, según el Acuerdo Ministerial No. 097 los límites máximos permisibles para su liberación en alcantarillado y agua dulce difieren, con excepción del cromo, cadmio y níquel cuyo valor es el mismo (**Ministerio del Ambiente, 2019**).

Según **García (2013)** una elevada concentración de metales pesados inhibe el proceso de degradación de la materia orgánica y nutrientes, sin embargo la simulación está basada en un post-tratamiento de lixiviados donde las concentraciones iniciales (*Tabla 7*) de estos elementos se encuentra reducida y en conjunto con la adsorción de la matriz se logró alcanzar los límites máximos permisibles, con excepción del cadmio debido a que el coeficiente de partición es el segundo más bajo (0.794 kg/m^3), el primero es del metal Plata con 0.398 kg/m^3 (*Tabla 10*) la diferencia resulta en la concentración inicial es mucho mayor del Cd en comparación a la de Ag (ver *Tabla 13*).

Los porcentajes de adsorción de metales pesados varían entre 56% y 99% (ver *Figura 24*), generando buenos resultados en la adsorción para el cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo, y zinc. Por otro lado, los metales, cobre y plata presentan bajos porcentajes de adsorción.

En la simulación ejecutada se usaron coeficientes de partición obtenidos de la investigación realizada por Allison & Allison (2005) en base a una recopilación de estudios, por tanto estos resultados pueden variar dependiendo el especie de planta empleado, tipo de suelo, y tiempo de retención hidráulica.

Figura 24. Porcentaje adsorbido de metales pesados en la matriz



El plomo como se refleja en la *Figura 25* posee mayor capacidad de adsorción en estos sistemas, debido que varias especies de plantas (Girasol) posibilitan la bioacumulación de este metal, especialmente en las raíces ya que se forman enlaces fosfato-plomo, permitiendo retener una mayor cantidad de Pb, mientras que el Cd (*Figura 26*) es adsorbido en su mayoría por una capa externa de la zona radicular lo que permite formar complejos metálicos, sin embargo, su afinidad es menor que el plomo, por esta razón no se logró alcanzar el valor dentro del límite máximo permitido establecido en el Acuerdo Ministerial No. 097 (Cerrón et al., 2020).

Figura 25. Variación de la concentración de plomo en el tiempo

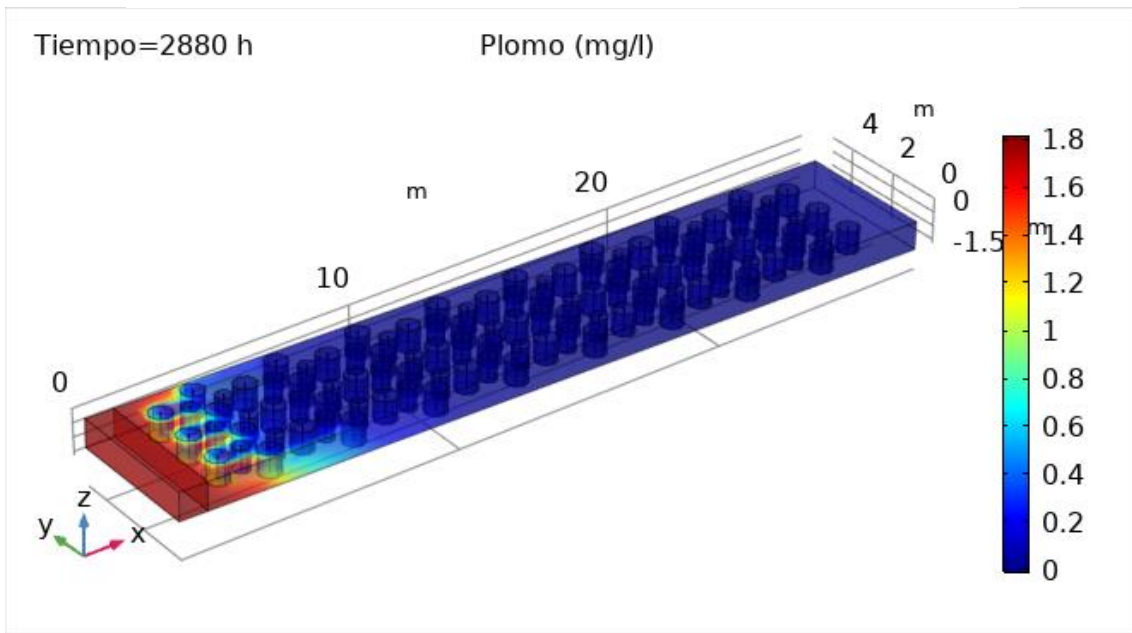
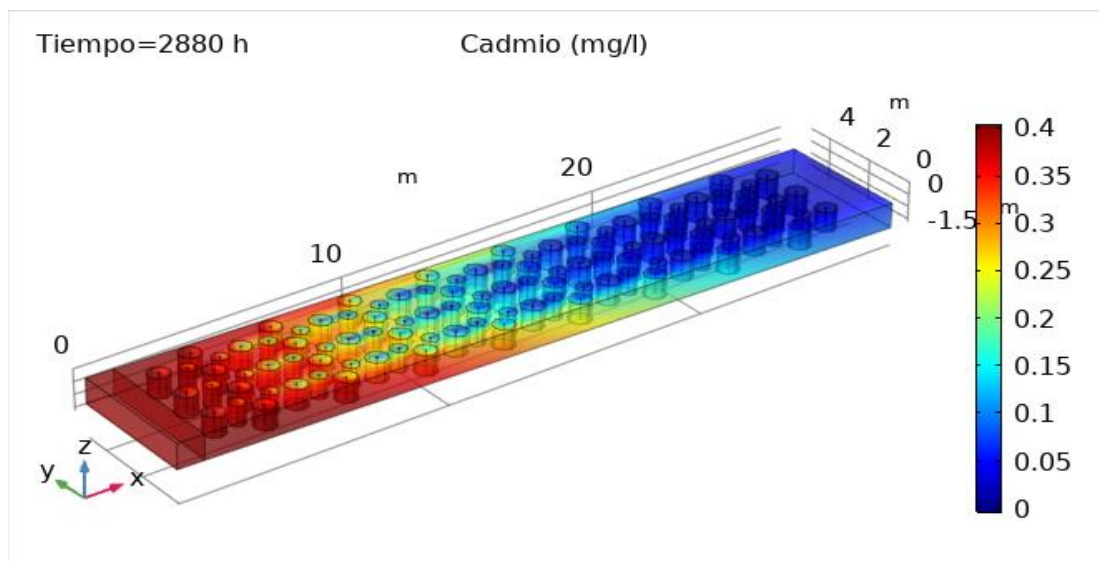
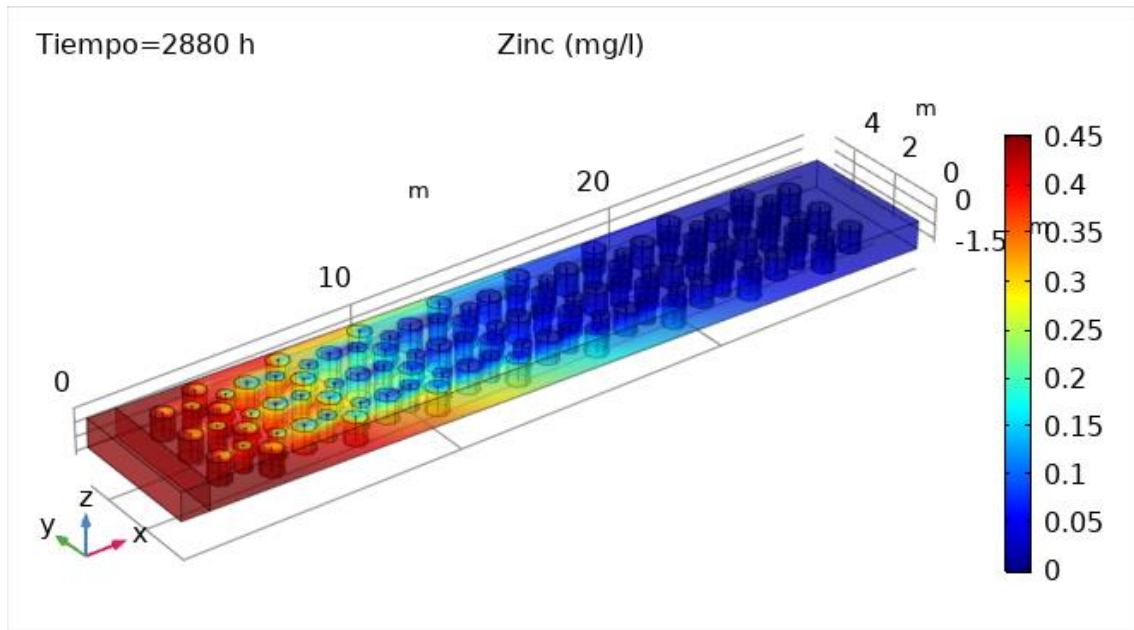


Figura 26. Variación de la concentración de cadmio en el tiempo



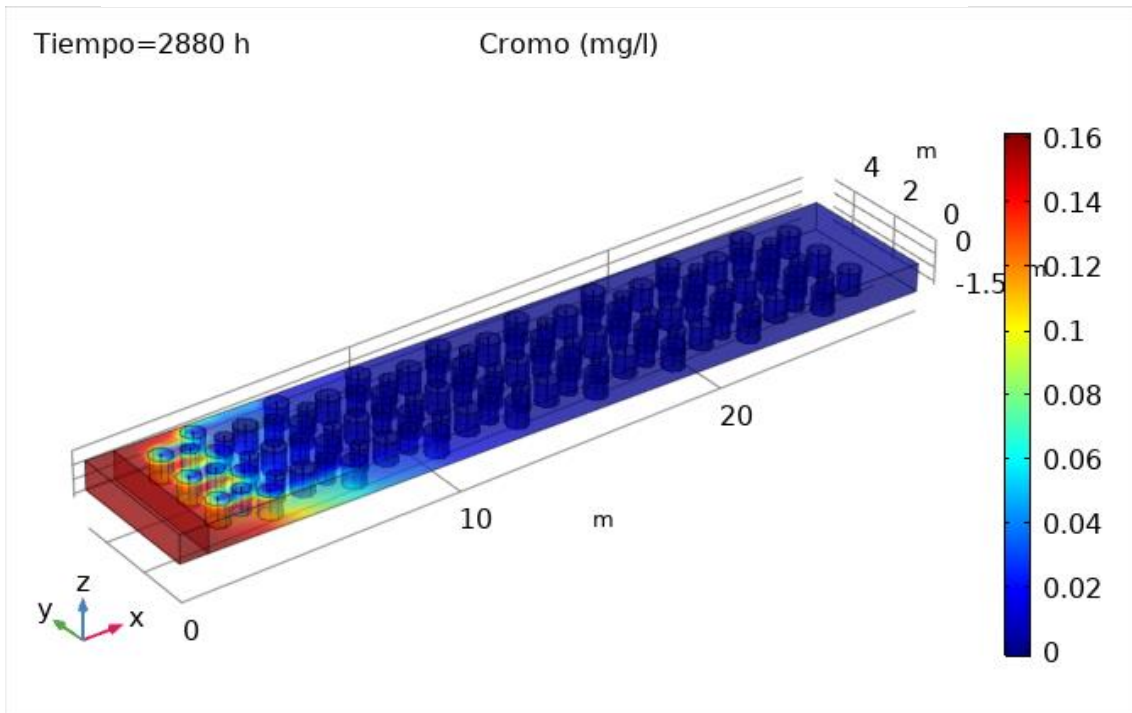
Uno de los micronutrientes usados es el Zn, vital para el desarrollo y crecimiento de plantas y microorganismos, a pesar de que un alto porcentaje es adsorbido (94.44%), tiene una limitada capacidad de adsorción como se puede evidenciar en la *Figura 27*, donde a partir de los 60 días empieza la acumulación del mismo en el sistema (**Ruiz et al., 2010**).

Figura 27. Variación de la concentración de zinc en el tiempo



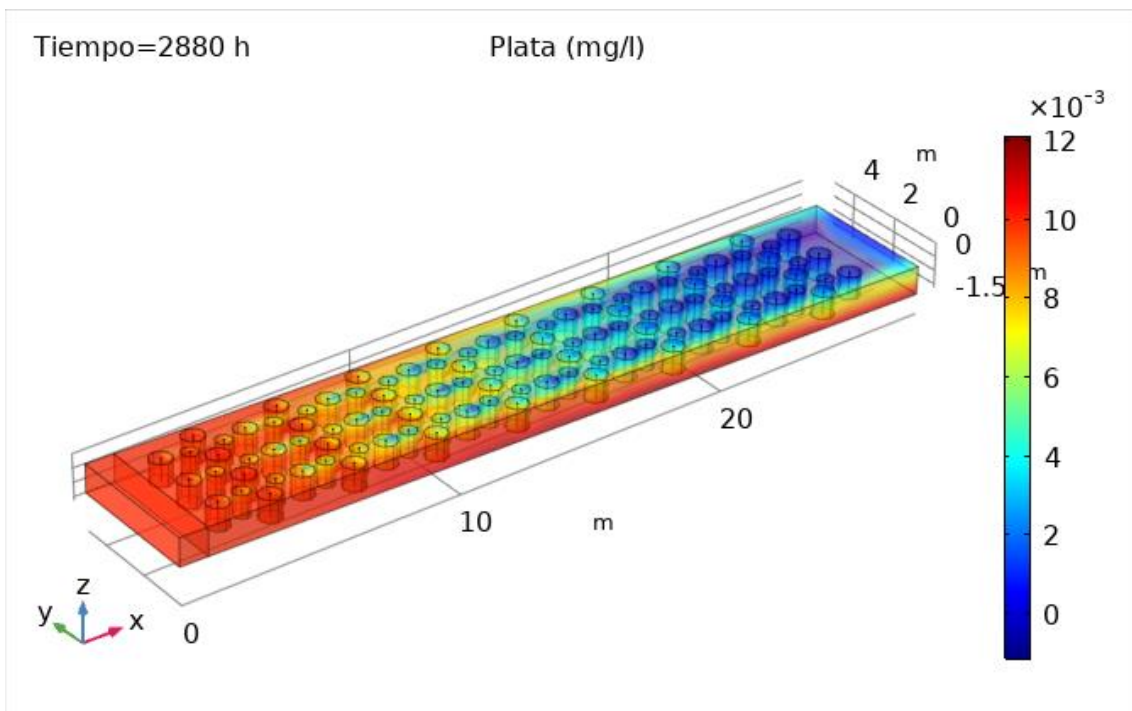
Algunos metales pesados como el cromo se encuentran de forma natural o por acciones antropogénicas en la naturaleza, en elevadas concentraciones puede ser perjudicial para el medio ambiente y salud de todos los seres vivos, el Cr es un componente altamente tóxico, mutagénico y cancerígeno, por medio de la fitorremediación en la simulación realizada se logró una adsorción del 99.91% contribuyendo a reducir su poder contaminante de manera eficiente, aunque una vez excedido la concentración máxima tolerable por la especie vegetal empieza la acumulación fuera de esta (Figura 28) (Estrada, 2010).

Figura 28. Variación de la concentración de cromo en el tiempo



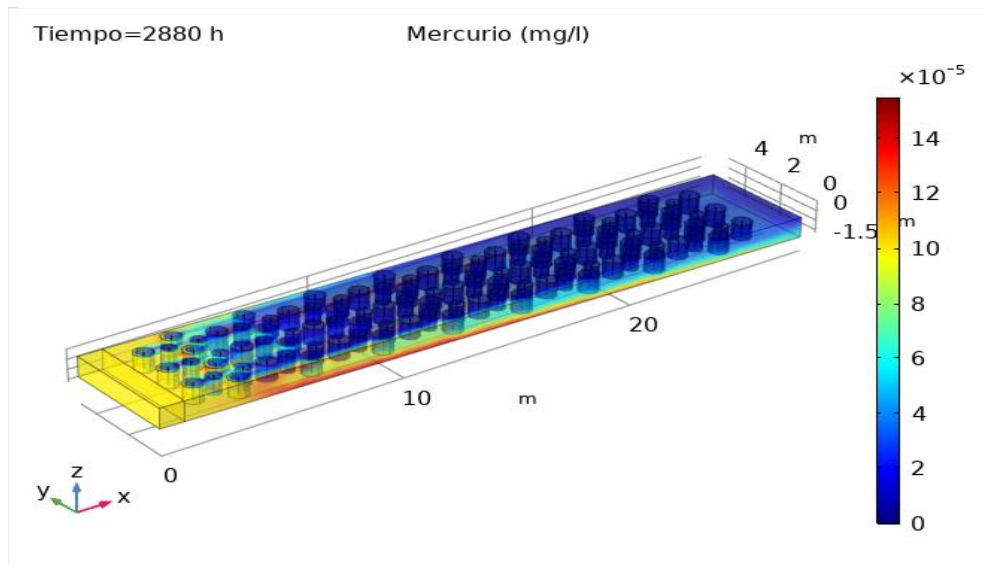
El metal Ag es otro de los compuestos que puede generar toxicidad en el medio, por esta razón presenta el más bajo coeficiente de partición entre los metales estudiados, y el de menor porcentaje adsorbido (56%, ver *Figura 24*), a pesar de ello en conjunto con los tratamientos previos se logró disminuir la concentración, a la par que rápidamente el medio empieza a saturarse (Ibers & Schomaker, 1953).

Figura 29. Variación de la concentración de plata en el tiempo



El al igual que el cromo, el mercurio es un elemento altamente tóxico, ventajosamente posee un coeficiente de adsorción favorable para estos sistemas de post-tratamiento y a menudo se encuentra en bajas concentraciones, presenta el tercer mejor porcentaje de remoción (*Figura 24*) y como se refleja en la *Figura 30* la disminución de este metal es notable, aunque también tiene tendencia limitante por la toxicidad que pueda generar en los microorganismos y especies vegetales presentes (**Amábilis-Sosa et al., 2015**)

Figura 30. Variación de la concentración de mercurio en el tiempo



El cobre y níquel a diferencia de los anteriores mencionados son vitales para el desarrollo y crecimiento de la planta siempre y cuando no sobrepasen la dosis permitida 0.1 mg/l y 0.05 mg/l respectivamente, sin embargo al tratarse de los seres vivos con mayor resistencia en el mundo las plantas, estas son capaces de almacenar el 100% más de su capacidad, aunque esto implique repercusiones en su funcionalidad, ventajosamente gracias a aquello, estas especies vegetales pueden ser usadas en el saneamiento del medio ambiente por fitorremediación (*Figura 31 y Figura 32*).

Figura 31. Variación de la concentración de níquel en el tiempo

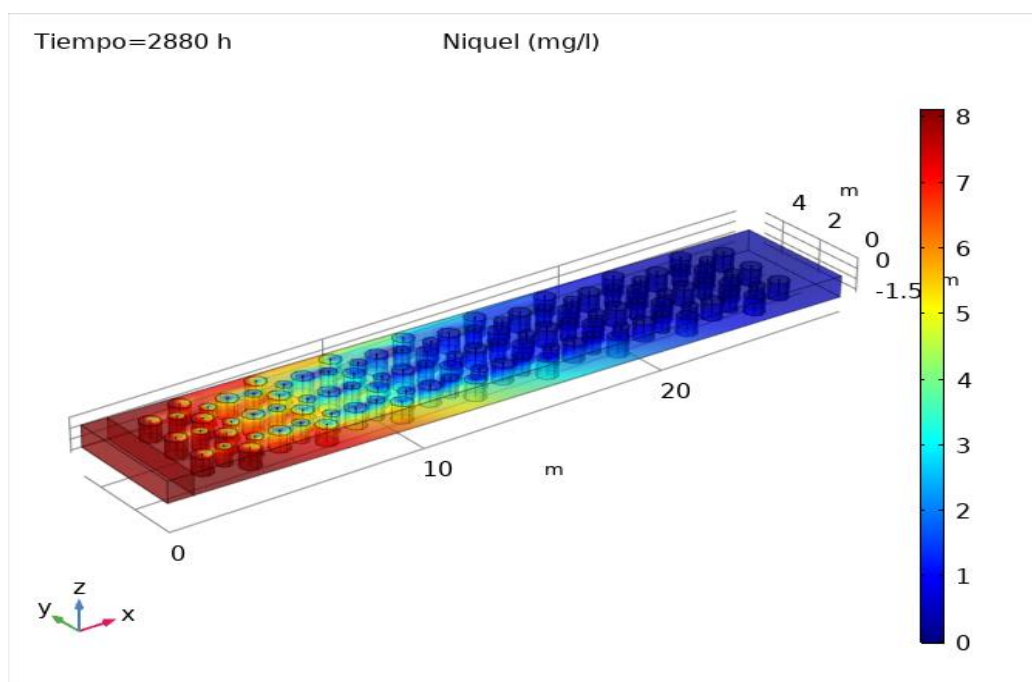
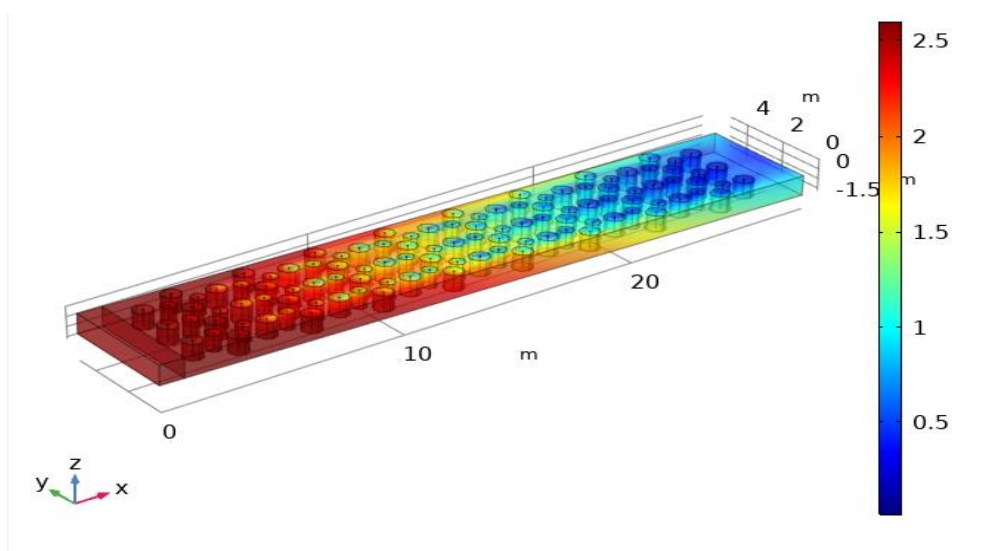


Figura 32. Variación de la concentración de cobre en el tiempo



Los perfiles de concentración que describen los metales pesados estudiados (Cd, Hg, Pb, Ag, Cr, Cu, Ni y Zn), permiten conocer el comportamiento a través del tiempo, y como

se evidencia en las *Figura 33*, *Figura 34* y *Figura 35* el cadmio, cobre, níquel, zinc y plata presentan un aumento considerable en la concentración, y de estos solo el Zn posee un alto porcentaje adsorbido por el sistema, por tanto, se deberá tener mayor énfasis en el tratamiento de estos dos metales, a pesar de que cumplan la normativa señalada, con excepción del cadmio.

Figura 33. Perfil de concentración para Cd, Zn y Pb

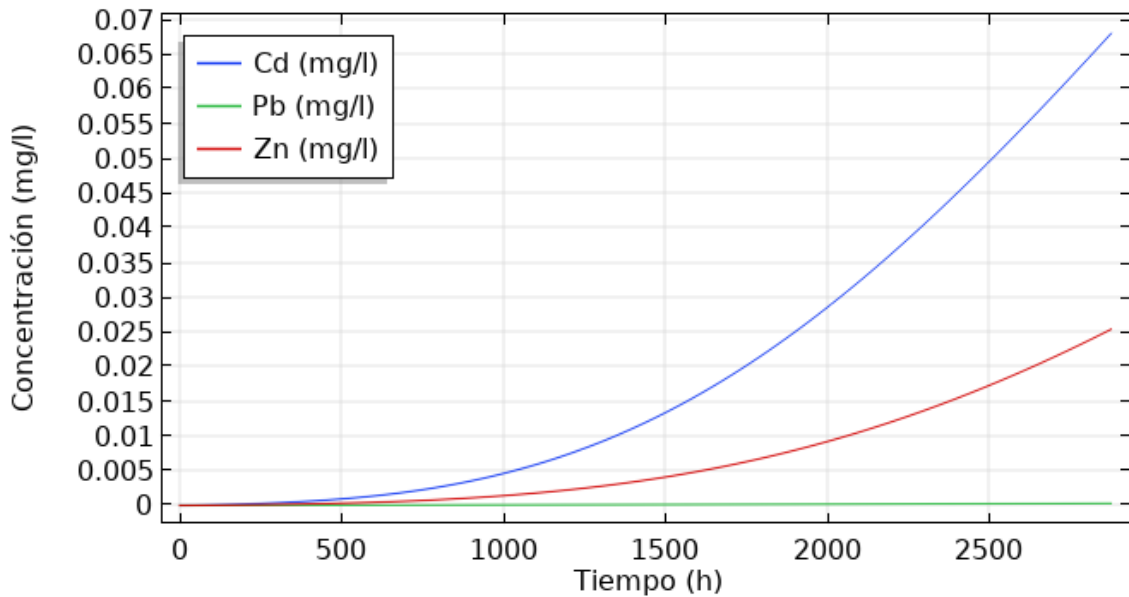


Figura 34. Perfil de concentración para Ag, Cr y Hg

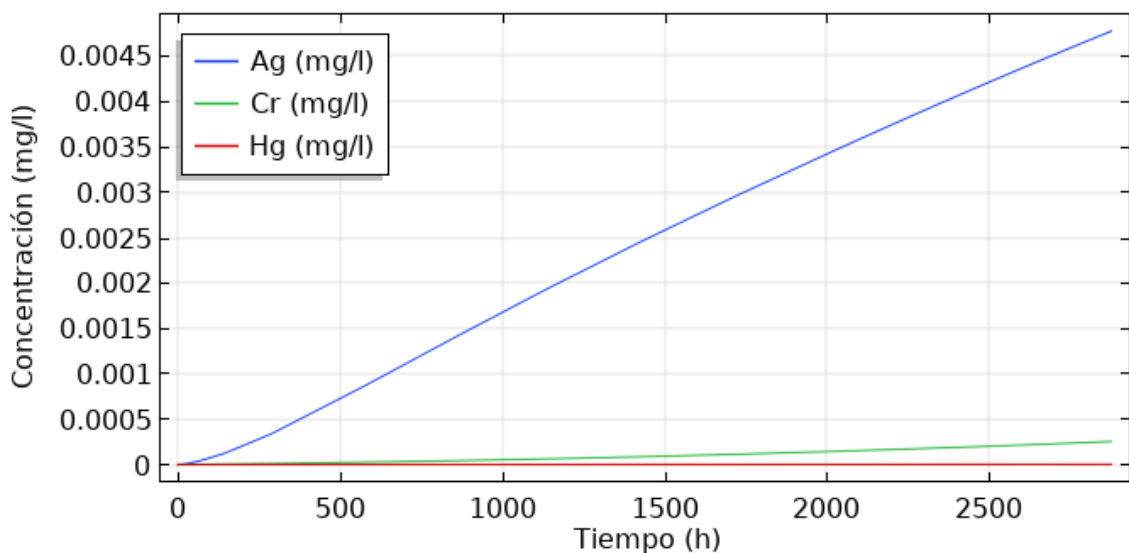
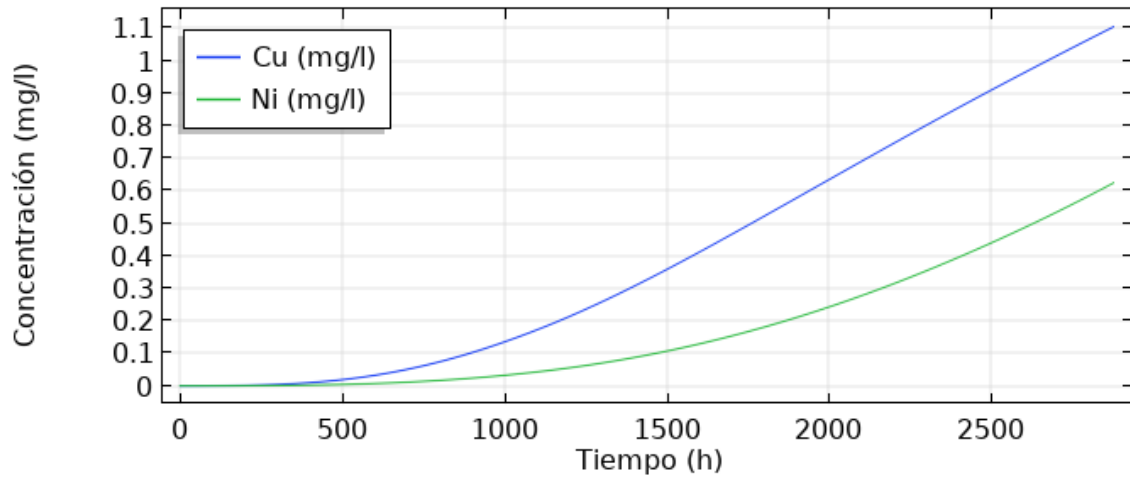


Figura 35. Perfil de concentración para Cu y Ni



La aplicación de estos mecanismos para la degradación o reducción de contaminantes en la simulación realizada, confiere una clara y eficiente alternativa para el post-tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Ambato.

3.2 Verificación de la hipótesis

$H_0 \neq 0$ Se rechaza la hipótesis nula

$H_a = 0$ Se acepta la hipótesis alternativa y se llega a la conclusión de que el medio poroso, la interacción de las plantas, el tiempo de residencia y orientación del humedal artificial subsuperficial (horizontal) influyen significativamente en la remoción de los contaminantes presentes en los lixiviados que se generan en el relleno sanitario de Ambato.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se logró modelar un humedal artificial del tipo horizontal a través de una simulación computacional, tomando datos de diseño reales, así como también las diferentes variables y constantes apropiadas para asemejar aún más con la realidad y proyectar una posible solución viable, efectiva y sobre todo sostenible con el medio ambiente como post-tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario de Ambato.

Se estableció los procesos físicos como el flujo a través de la ley de Darcy, el transporte de especies diluidas en un medio poroso, las reacciones superficiales esenciales para la degradación y adsorción de materia orgánica, nutrientes y metales, que ocurren con mayor frecuencia y más relevancia aportan al post-tratamiento en los lixiviados del relleno sanitario Ambato.

Se programó los modelos matemáticos para lograr que se efectuó correctamente la simulación, usando la Ley de Darcy para lograr el movimiento de flujo ideal a través del medio poroso (suelo) y el sistema biótico presente en un tiempo estacionario.

El transporte de especies diluidas en medios porosos, generando reacciones superficiales para la degradación y adsorción de nutrientes y metales pesados respectivamente.

También se usó reacciones de primer orden para la degradación de materia orgánica, generando un sistema de ecuaciones diferenciales que es resuelto por el mallado construido a partir del modelo geométrico realizado.

Se obtuvo representaciones gráficas en 3D de la degradación de materia orgánica que varía alrededor del 70% y 90% de degradación en el modelo original, en cuanto a metales pesados los porcentajes de remoción variaron entre un 56% y 99%, mientras que la toma de nutrientes fue cercana al 70% del total.

4.2 Recomendaciones

Diseñar un mallado extremadamente fino para verificar los resultados alcanzados, disminuyendo el margen de error en la resolución de ecuaciones diferenciales.

Simplificar el diseño geométrico para evitar una alta duración de cálculo ocasionando grandes cantidades de tiempo en la compilación de procesos a efectuar.

Empezar el diseño básico en 2D, para conocer la disponibilidad del sistema de reproducir los procedimientos sin errores en el ensamble.

Enlazar un sistema adicional de depuración para lograr que todas las tasas de remoción sean mayores del 95%.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, R., Valiente, Y., Oliver, D., Franco, C., Díaz, F., Méndez, F., & Luna, C. (2018). *pollution*. 21(4), 401–407.
- Allison, J. D., & Allison, T. L. (2005). Partitioning coefficients for metals in surface water, soil and waste. *U.S. Environmental Protection Agency. Office of Research and Development, July*, 1–93. <q:/Euras/Literature/pdf database/V-176 Allison and Allison 2005.pdf>
- Aluko, O. O., & Sridhar, M. K. C. (2005). Application of constructed wetlands to the treatment of leachates from a municipal solid waste landfill in Ibadan, Nigeria. *Journal of Environmental Health*, 67(10), 58–62.
- Amábilis-Sosa, L. E., Siebe, C., Moeller-Chávez, G., & Durán-Domínguez-De-Bazúa, M. D. C. (2015). Remoción de mercurio, cromo y plomo por humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(2), 21–34.
- Aracely Yaren, E. P., & Ronny Paúl, V. C. (2019). *Absorción Y Bioacumulación De Metales Pesados De Tres Especies Vegetales Introducidas En La Amazonía Ecuatoriana En Relaves Mineros*. 89.
- Arcila, B., El, O., Sanitario, R., Fe, S., Se, T., Sanitario, R., & Fe, S. (2018). *CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL LIXIVIADO Y LAGUNAS*.
- Artos, B., & Constante, J. (2019). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. *Tesis*, Vi, 1–57. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- Astorga Del Canto, C. F. (2018). Tratamiento De Lixiviados De Un Relleno Sanitario : Propuesta Y. *Tesis*, I, 100. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152920/Tratamiento-de-lixivados-de-un-relleno-sanitario-Propuesta-y-evaluación-de-un-sistema.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- August, R. (1986). *ROLE OF AQUATIC PLANTS IN WASTEWATER TREATMENT BY ARTIFICIAL WETLANDS*. 20(3), 363–368.
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146(May 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725>
- Behrends, F. (2007). *Transporte de microorganismos indicadores de contaminación fecal en una cuenca de la Pampa Ondulada. El rol de las propiedades físicas y químicas de los suelos y de los sedimentos*.
- Bernardo, J., & Vásquez, L. (2017). Cinética de la remoción de DBO 5 en humedales con flujo sub-superficial horizontal Kinetics of BOD 5 removal in constructed wetlands with horizontal subsurface flow. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXVIII(1), 17–30.
- Caballero, D., de la Garza, F., Andrade, E. del C., & Briones, F. (2011). Los rellenos sanitarios: una alternativa para la disposición final de los residuos sólidos urbanos.

- Cantero, M. (2000). SIMULACIÓN DE FLUJOS TURBULENTOS, OBSTRUIDOS Y TÉRMICAMENTE ACOPLADOS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS. *Reaction Engineering for Pollution Prevention*, 316. <https://doi.org/10.1016/b978-044450215-5/50094-9>
- Castillo, E. (2017). *Eficiencia de Lemna sp y Eichohornia crassipess, en la remoción de nutrientes del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales en Celendín.(Tesis de grado)*. 107.
- Cerrón, R. M., Sánchez, G. G., Yachachi, Y. M., Ramos, F. P., Gonzales, L. V., & Torres, R. C. (2020). Lead and cadmium uptake by sunflower from contaminated soil and remediated with organic amendments in the form of compost and vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 177–186. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.02.04>
- Delgadillo, O., Camacho, A., & Andrade, M. (2010). *I. A cleaner causes a mob to undergo two displacements on a floor. If the resultant displacement has a magnitude of 120 cm and is directed at an angle of 55.*
- Estrada, I. (2010). Monografía Sobre Humedales Artificiales De Flujo Subsuperficial (Hafss) Para Remoción De Metales Pesados En Aguas Residuales. *To Βημα Του Ασκληπιου*, 9(1), 178.
- Fontes, E., Ab, C., Cifuentes, A., Addlink, L., & Científico, S. (2019). *Conferencia de COMSOL Multiphysics 2019 – Viernes 28 junio*. 0–19.
- Gallego-Alarcón, I., & García-Pulido, D. (2017). Remoción de nitrógeno amoniacal total en un biofiltro: percolador-columna de arena. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(1), 81–93. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-06>
- Gargallo Bellés, S. (2017). *Modelación de la calidad de las aguas en los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS). Aplicación a los HAFS del Tancat de la Pipa en l'Albufera de València*. 279. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/78215/GARGALLO - MODELACION DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL...pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/78215/GARGALLO_MODELACION_DE_LA_CALIDAD_DE_LAS_AGUAS_EN_LOS_HUMEDALES_ARTIFICIALES_DE_FLUJO_SUPERFICIAL...pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Giraldo, E. (2014). Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de Ingeniería*, 0(14), 44. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>
- Ibers, J. A., & Schomaker, V. (1953). The structure of oxygen fluoride. *Journal of Physical Chemistry*, 57(7), 699–701. <https://doi.org/10.1021/j150508a023>
- INEC. (2016). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Contenido*. 15–17. http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Gestion_Integral_de_Residuos_Solidos/2016/Presentacion_Residuos_Solidos_2016_F.pdf
- Lavrova, S., & Koumanova, B. (2010). Influence of recirculation in a lab-scale vertical flow constructed wetland on the treatment efficiency of landfill leachate. *Bioresource Technology*, 101(6), 1756–1761. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.028>

- Londoño, L. A., & Vanegas, C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética. *Society*, 3, 212.
- MAE. (2015). Acuerdo 097A. *Registro Oficial No. 387, 097, 407*. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155128.pdf>
- Méndez, P., Ramírez, G., César, A., Gutiérrez, R., Alma, D., & García, P. (2008). Plant Contamination and Phytotoxicity Due To Heavy Metals From Soil and Water. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 19–44.
- Metcalf and Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*.
- Ministerio del Ambiente. (2003). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, TULSMA. *Registro Oficial Edición Especial 2 de 31-Mar.-2003*, 3399, 1–578.
- Mosquera Beltrán, Y. (2012). Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte. *Tumbaga*, 1(7), 6.
- Núñez, L. T. (2015). *ACUERDO MINISTERIAL 140 Registro Oficial --Edición Especial N° 387 -Miércoles 4 de noviembre de 2015 --79*.
- Pérez Montiel, J. I., Aldana Villasmil, G. J., & Rojano Alvarado, R. E. (2016). Hydraulic evaluation of an upflow anaerobic sludge reactor (UASB) using an axial dispersion model. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(3), 281–291. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.03>
- Pozo, W., Sanfeliu, T., & Carrera, G. (2011). Metales pesados en humedales de arroz en la cuenca baja del río Guayas. *Maskana*, 2(1), 17–30. <https://doi.org/10.18537/mskn.02.01.02>
- Restrepo, D. G. (2015). *Remoción de Contaminantes en HC de flujo vertical sembrados con heliconia psittacorum y alimentados con diferentes frecuencias*. 96.
- Rodríguez-Miranda, J. P., Gómez, E., Garavito, L., & López, F. (2010). Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(1), 59–68.
- Rolando, H., Quispe, S., Chipantiza, J. G., Bonilla, A., & Mendoza, C. (2020). *Solución analítica de la ecuación de Richards en suelos no saturados basada en el modelo de Gardner . Caso de difusividad constant Analytical Solution of Richards ' Equation in Unsaturated Soils based on Gardner ' s Model . Constant Diffusivity case study*. 17(1), 1–11. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.5727>
- Ruiz, V., González Sandoval, M. R., Barrera Godínez, J. A., Moeller Chávez, G., Ramírez Camperos, E., & Durán-Domínguez de Bazúa, M. C. (2010). Cadmium and zinc removal from a mining reprocessing aqueous stream using artificial wetlands. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*, 25(1), 27–34.
- Salgado-García, S. (2013). *and Metal Accumulation Studies*. 400.
- SILVA, Á. S., & ZAMORA, H. D. (2005). Humedales Artificiales. *PhD Proposal*, 1, 100.

- Soler, C., Crespi, R., Soler, E., & Pugliese, M. (2018). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre superficial con macrófitas acuáticas flotantes. *Ingeniería Del Agua*, 22(2), 69. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8596>
- Torres Lozada, P., Barba Ho, L. E., Ojeda, C., Martínez, J., & Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), 245–256. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n1.2014.960>
- Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista Ion*, 27(1), 17–34.
- Under, P., & Law, D. S. (2019). *MÉTODO DE GALERKIN LIBRE DE ELEMENTOS PARA RESOLVER*. XXXVII, 5–7.
- Valderrama, M., Javier, C., Del Águila, M., Miche, E., Pio, C., & Erika, L. (2016). Optimización Del Proceso Fenton En El Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 82(4), 454–466. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v82i4.135>
- Vilanova, R., Santín, I., & Pedret, C. (2017). Control and operation of wastewater treatment plants (I). *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 14(3), 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2017.05.004>
- Villacrés, M. (2011). FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS CARRERA DE INGENIERÍA BIOQUÍMICA. “ESTRUCTURA, IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO AMBATO.”
- Yalcuk, A., & Ugurlu, A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource Technology*, 100(9), 2521–2526. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.029>
- Yang, L., & Tsai, K. Y. (2011). Treatment of landfill leachate with high levels of ammonia by constructed wetland systems. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 46(7), 736–741. <https://doi.org/10.1080/10934529.2011.571586>

ANEXOS