

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN HUMEDAL A ESCALA
DE LABORATORIO PARA TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO
SANITARIO LA ESMERALDA.

JUAN JOSÉ MARTÍNEZ FRANCO
CRISTIAN ANDRÉS ROJAS RAMÍREZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MANIZALES

2018

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN HUMEDAL A ESCALA
DE LABORATORIO PARA TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO
SANITARIO LA ESMERALDA.

JUAN JOSÉ MARTÍNEZ FRANCO

CRISTIAN ANDRÉS ROJAS RAMÍREZ

MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO: AUTORIDAD PROPIA

ASESOR: SEBASTIÁN ISAAC PACHECO GONZÁLEZ

Ingeniero Químico

Docente Investigador

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

MANIZALES

2018

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1.1. FLUJO LIBRE O SUPERFICIAL:.....	8
1.1.2. FLUJO SUBSUPERFICIAL:	9
1.1.2.1. SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL:.....	9
1.1.2.2. SUBSUPERFICIAL VERTICAL:.....	9
1.2. VEGETACIÓN MÁS UTILIZADA	11
1.2.1. TYPHA.....	11
1.2.2. SCIRPUS	12
1.2.3. PHRAGMITES.....	13
1.4. LIXIVIADOS	16
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. METODOLOGÍA	18
3.1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	18
3.1.1. ANTECEDENTES NACIONALES.....	19
3.1.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	22
3.1.3. BIBLIOMETRÍA	27
3.2. INICIO DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE HUMEDAL	28
3.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO	40

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
5. CONCLUSIONES	48
7. REFERENCIAS	51
Ilustración 1: Clasificación de los Humedales Artificiales	9
Ilustración 2: Typha.....	11
Ilustración 3: Scirpus	12
Ilustración 4: Phragmites	13
Ilustración 5: Planta Vetiver	32
Ilustración 6: Tanque alimentador	33
Ilustración 8: Experimento agua con colorante	37
Ilustración 9: Comparación de muestras humedal plantado.....	39
Ilustración 10: Condensador.....	42
Ilustración 11: Equipo para titulación	42
Tabla 1: Parámetros del lixiviado, entrada del sistema de tratamiento, (ACUATEST, 2015)	14
Tabla 2: Parámetros del lixiviado a salida del sistema de tratamiento, (ACUATEST, 2015)	15
Tabla 3: Estado del arte	26
Gráfico 4: Publicaciones por año	27
Gráfico 5: Documentos por país.....	28

Tabla 6: Características del pasto Vetiver	29
Tabla 7: Profundidad de las capas de material filtrante.....	34
Tabla 8: Resultados DQO humedal no plantado (Fuente: Laboratorio de Química UNAL)	43
Tabla 9:Resultados DQO humedal plantado (Fuente: Laboratorio de Química UNAL)	43
Tabla 10: Comparación características de humedales	45

1. INTRODUCCIÓN

La evolución y el desarrollo de la sociedad ha traído consigo un mundo de actividades, de las cuales el hombre se ha vuelto dependiente y la gran mayoría de estas tienen su repercusión, tanto positiva como negativa sobre el medio; algunos de los subproductos con impacto negativo más trascendentales del diario vivir sin duda alguna son los residuos sólidos, además, la producción desmedida y en aumento hace aún más difícil su manejo y disposición final, mucho más si hablamos de países que se encuentran en vía de desarrollo, en este caso Colombia, ya que no se cuenta con procesos efectivos para el tratamiento de los mismos. Según la revista Semana “El 7,5% de los rellenos sanitarios del país ya se les acabó su vida útil y a un 15% le queda menos de 3 años; se estima que en los próximos 10 años la generación de residuos crecerá en un 20%; de acuerdo a esto, actualmente se producen 11,6 millones de toneladas de basura al año y solo se recicla el 17%” (Semana Sostenible, 2018). Además, es poco el apoyo que se le da a la investigación y búsqueda de soluciones científicas e ingenieriles ante tales problemáticas.

Desde el origen del hombre se han producido residuos, la gran diferencia es que anteriormente solo se generaban desechos orgánicos de fácil biodegradación, básicamente desechos de comida, pero conforme la población fue creciendo, la “modernización” se convirtió en un factor clave de desarrollo y avance científico y tecnológico, lo cual modificó las actividades cotidianas y por ende la composición de los residuos también cambió, siendo estos, de difícil manejo y degradación, afectando así la calidad del medio. La estrategia más común en cuanto al manejo de los residuos sólidos en América es el uso de los rellenos sanitarios o vertederos, anteriormente llamados botaderos a cielo abierto; estos lugares

requieren grandes extensiones de tierra, alejada de centros poblados debido a su alta producción de olores, causados por los gases que se producen debido a la materia en descomposición que allí se deposita. Un relleno sanitario trae consigo un cúmulo de impactos ambientales, desde su construcción, hasta su funcionamiento, dentro de un tiempo de vida estimado entre 20 y 25 años, principalmente por vía aérea y acuática, a causa de su generación de gases (básicamente metano), y de lixiviados respectivamente; por esto debe ser diseñado y construido bajo estrictas normas que tengan en cuenta la ya mencionada emisión de gases y vertimiento de lixiviados, además de aguas residuales domésticas y las generadas por lavado de vehículos; dichas normas de seguridad están fundamentadas técnicamente y teniendo en cuenta que las 24 horas del día y los 7 días de la semana se generan residuos sólidos, así que las estrategias de ingeniería se encaminan a canalizarlos, por medio de chimeneas y canales, que se encuentran bajo las montañas de residuos que allí reposan. El terreno se debe encontrar impermeabilizado por una capa de arcilla, acompañada por arena, geomembrana y geotextil (Röben, 2002), para que el lixiviado no filtre hacia las aguas subterráneas; la canalización del lixiviado debe darse de una forma diferenciada a la de las aguas pluviales, las cuales son separadas para evitar su entrada en el interior del proceso y por tanto generación de un mayor volumen de lixiviados, y por otra parte se obtiene una fuente de agua limpia, necesaria para el riego de los caminos perimetrales y otras actividades que demanden uso de este recurso (SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES DE MÉXICO, 2009). El tratamiento biológico y fisicoquímico que se le da al lixiviado dentro del relleno sanitario de la ciudad de Manizales “La Esmeralda” se da por medio de un biodigestor UASB, lodos activados y el proceso de floculación-coagulación (EMAS, 2017). La canalización dada por EMAS a los lixiviados es diferenciada de las aguas lluvias que tienen su conducto perimetral; según análisis realizados por la

empresa en el año 2015, el sistema de tratamiento de lixiviados posee una capacidad de remoción del 81% en DBO5 (EMAS, Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de lixiviados, 2015), que en su momento fue comparado con el DECRETO 1594 de 1984 (Derogado por el DECRETO NACIONAL 3930 de 2010) (D.C., 2010) que para este tipo de vertimientos exigía un 80% de remoción en dicho parámetro. Como es utilizado en la ciudad de Manizales, en diferentes lugares de Latinoamérica también se hace uso de las tecnologías tradicionales mencionadas para el tratamiento primario del lixiviado, como lo son la fase biológica contenida en reactores UASB y lodos activados, y la físico-química donde se da la remoción de sólidos y materia orgánica por medio de coagulantes; la construcción, operación y el mantenimiento de estos sistemas suele ser costosa (Yalcuk & Ugurlu, 2009), es ahí donde los sistemas naturales aparecen como alternativas menos costosas, gracias a su simplicidad y su fácil adaptación a los diferentes niveles de tratamiento (Giraldo, 2001). El ejemplo fundamental de sistemas naturales contenido en este documento es el de los Humedales Artificiales (HA) o Humedales Construidos (Constructed Wetlands), que se definen como sistemas de tratamiento de tipo natural, que, a partir de la emulación de procesos físicos, químicos y biológicos, mejoran la calidad del agua residual que fluye a través de estos (Wittgren & Maehlum, 1995).

1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES

Dichos humedales se pueden clasificar de acuerdo a la hidrología y flujo del mismo:

1.1.1. FLUJO LIBRE O SUPERFICIAL:

El lixiviado fluye por sobre el sustrato de forma continua. Las condiciones aerobias se ven favorecidas por el hecho de tener el agua expuesta directamente a la atmósfera (RAMSAR, 2012)

1.1.2. FLUJO SUBSUPERFICIAL:

El agua a tratar circula a través del lecho filtrante. Este último a su vez podría clasificarse según la dirección que lleva el agua (Horizontal y Vertical) (Vymazal, 2010);

1.1.2.1.SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL:

La circulación del agua se da horizontalmente por medio del sustrato. Las condiciones anaerobias se fortalecen al tener un flujo de líquido debajo del sustrato. Los procesos de desnitrificación son muy comunes en este tipo de estructura (RAMSAR, 2012)

1.1.2.2.SUBSUPERFICIAL VERTICAL:

La circulación se da verticalmente por medio del sustrato de forma intermitente. Por lo general, en sistemas a escala real se incluyen chimeneas con el fin de optimizar las condiciones aerobias. Se desarrollan procesos de nitrificación (RAMSAR, 2012)

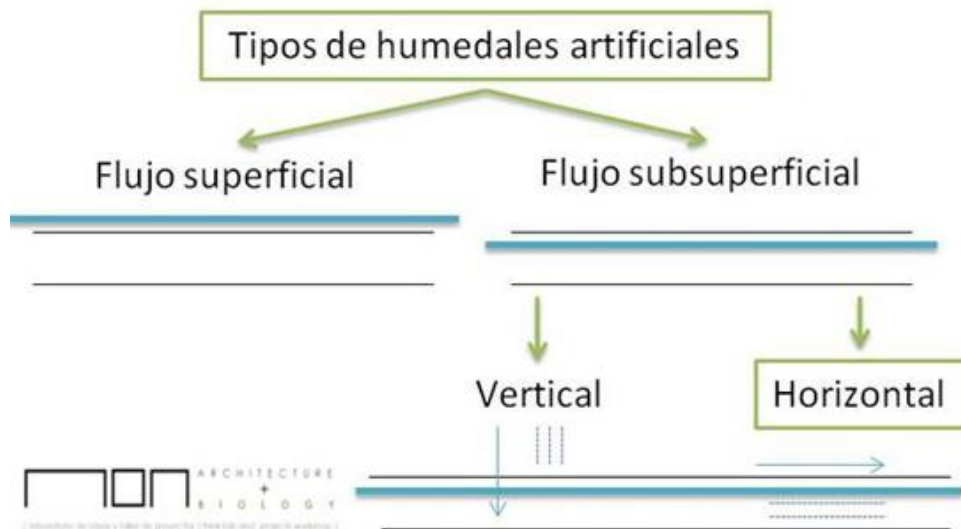


Ilustración 1: Clasificación de los Humedales Artificiales

Imagen tomada de: <https://www.iagua.es/blogs/carolina-miguel/los-humedales-artificiales-componentes-y-tipos>

Estos, según diferentes referencias bibliográficas pueden mostrar diferencias en los porcentajes de remoción, teniendo en cuenta la variación de la planta usada, el lecho filtrante y las condiciones ambientales del lugar. Los humedales de flujo subsuperficial son diseñados principalmente para el tratamiento de aguas residuales en su fase final de tratamiento, y sus principales ventajas son la prevención de insectos y de olores; y en tema económico se consideran más costosos que los de flujo libre o superficial, ya que se tiene en cuenta la utilización de la grava y la totalidad del lecho filtrante (Fonseca, 2010).

En cuanto a la vegetación, generalmente las macrófitas son el tipo de planta más utilizada, por sus características acuáticas y alta resistencia. Las plantas emergentes aportan significativamente al tratamiento de las aguas residuales por medio de la estabilización de sustratos, reducción de la velocidad del agua, captación de nutrientes por medio de raíces y la incorporación de estos a los tejidos de la planta, transferencia de gases a la atmósfera a través de la evapotranspiración, además, su tallo y raíces proporcionan capacidad de fijación microbiana (Fonseca, 2010). La elección de la planta es un tema muy importante en el diseño de los humedales, sea cual sea su clasificación, ya que debe soportar un alto grado de toxicidad, además de condiciones ambientales variables, como en este caso la ciudad de Manizales y su relleno sanitario “La Esmeralda”.

1.2. VEGETACIÓN MÁS UTILIZADA

1.2.1. TYPHA



Ilustración 2: Typha

Imagen obtenida de: <https://sites.google.com/site/humedalesartificiales/2-componentes-del-humedal>

“La Espadaña es una planta capaz de crecer bajo diversas condiciones medioambientales, y se propaga fácilmente, por lo que representa una especie de planta ideal para un humedal artificial. También es capaz de producir biomasa y tiene capacidad de remoción especialmente de N y P” (Lara, 1999).

1.2.2. SCIRPUS



Ilustración 3: Scirpus

Imagen tomada de: [ps://www.northcreeknurseries.com/plantName/Scirpus-validus-](https://www.northcreeknurseries.com/plantName/Scirpus-validus-)

“Son plantas ubicuas que crecen en un rango muy diverso de aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Son capaces de crecer bien en agua desde 5 cm a 3 cm de profundidad. Las temperaturas deseables son entre 16°C y 27°C y pH de 4 a 9. Penetran en la grava aproximadamente 0,6 m por lo que son muy usadas en humedales ” (Lara, 1999).

1.2.3. PHRAGMITES



Ilustración 4: Phragmites

Imagen tomada de: <https://www.elnougarden.com/tienda/plantas/plantas-acuaticas/phragmites-australis->

Es una planta alta con rizoma perenne extenso. Los sistemas que utilizan este tipo de planta generalmente son más eficaces en cuanto al traspaso de oxígeno ya que los rizomas se encuentran en posición vertical y de esta manera se introducen en el suelo, y de una forma más profunda que las espadañas (Typha), pero en menor proporción que los juncos (Scirpus). “Su gran ventaja es que presentan un bajo valor alimenticio y por lo tanto, no se ven atacadas por animales como otros tipos de plantas” (Lara, 1999).

1.3. COMPOSICIÓN DE LOS LIXIVIADOS RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA”

Mientras discurren por la canalización, “los lixiviados arrastran material disuelto, en suspensión, fijo o volátil, lo que ocasiona un aumento en la carga orgánica y un color que varía desde café, pardo y grisáceo cuando están frescos hasta un color negro y viscoso cuando envejecen” (MIRONEL DE JESUS CORENA LUNA, 2013). En el relleno sanitario “La

Esmeralda”, según análisis químicos realizados en el año 2015, los lixiviados generados solo por las terrazas compactadas de residuos sólidos poseen los siguientes parámetros (Métodos de análisis, técnicas, unidades y fecha de ejecución)

Tabla 1: Parámetros del lixiviado, entrada del sistema de tratamiento, (ACUATEST, 2015)

Lugar:	VIA AEREA CONTROLADO EN EL PARQUE	Origen de Muestra:	NUEVO TERRAZAS
Fecha Informe:	2015/04/14	Descripción De La Muestra:	Lixiviado
Fecha Recepción:	2015/03/19	Temperatura Ambiente:	20 °C
Fecha Muestreo:	2015/03/19	Condiciones climáticas:	Día frío, tarde con lluvias
Tipo De Muestra:	Compuesta	Plan de Muestreo:	FCD-018-167
Código Muestra:	15 - 255		

Parámetro	Método	Técnica	Unidades	Valor	Fecha ejecución del ensayo
pH	S.M.4500-H+	Electrometría	---	8,10 ± 0,16	2015/03/19
Temperatura	S.M. 2550 B	Electrometría	°C	22,1	2015/03/19
Caudal		Volumétrico	L/s	2,571	2015/03/19
Oxígeno Disuelto	S.M. 4500 OG	Electrometría	mg O ₂ /L	0,9 ± 0,1	2015/03/19
Conductividad	S.M.2510 B	Electrometría	mS/cm	19,8 ± 0,5	2015/03/19
*DBO5. Demanda biológica oxígeno Total	S.M. 5210 B	Incubación	mg O ₂ /L	5690	2015/03/27
*DQO. Demanda química oxígeno Total	S.M. 4500 O G	Reflujo Cerrado	mg O ₂ /L	13000	2015/04/01
SST. Sólidos suspendidos totales	S.M.2540 D	Gravimetría	mg SST/L	2610	2015/03/31
SSed. Sólidos Sedimentables	S.M. 2540 F	Cono Imhoff	mL/L/h	150,2	2015/03/19
*Detergentes (SAAM)	S.M. 5540 C	Colorimetría	mg SAAM/L	0,720	2015/03/31
*Grasas y aceites	S.M. 5520 C	Partición Infrarrojo	mg grasas y aceites/L	125	2015/04/01
*Plata	S.M. 3111 B	Absorción Atómica	mg Ag/L	< 0,0036	2015/03/31
*Arsénico	S.M. 3500 As-B	Absorción Atómica	mg As/L	0,012	2015/04/01
*Bario	S.M. 3111 D	Absorción Atómica	mg Ba/L	2,16	2015/03/31
*Cobre	S.M. 3111 B	Absorción Atómica	mg Cu/L	0,61	2015/03/31
*Mercurio Total	S.M. 3112 B	Absorción Atómica	mg Hg/L	< 0,00027	2015/03/31
*Mercurio Orgánico	S.M. 3112 B	Absorción Atómica	mg Hg/L	0,0019	2015/03/26
*Níquel	S.M. 3111 B	Absorción Atómica	mg Ni/L	0,011	2015/03/31
*Plomo	S.M. 3111 B	Absorción Atómica	mg Pb/L	0,135	2015/03/31
*Coliformes Totales	S.M. 9222 B	Substrato Enzimático	NMP/100mL	1,7329 x 10 ⁵	2015/04/06
*E-Coli	S.M. 9222 C	Substrato Enzimático	NMP/100mL	1,1 x 10 ⁵	2015/04/06
*Cianuro Total	ASTM D7511-09	Ultravioleta	mg CN/L	0,663	2015/04/06
*Fenoles totales	S.M. 5530 B-C	Colorimétrico	mg fenoles/L	11,2	2015/03/31
*Fósforo orgánico	S.M. 4500 P	Colorimétrico	mg P/L	0,350	2015/04/06
*Fósforo inorgánico	S.M. 4500 P	Colorimétrico	mg P/L	2,96	2015/04/02
*Fósforo total	S.M. 4500 P	Colorimétrico	mg P/L	3,31	2015/03/31
*Nitratos	S.M. 4500 NO3-B	Ultravioleta	mg NO ₃ /L	7,45	2015/04/06
*Nitritos	S.M. 4500 NO2-B	Colorimétrico	mg NO ₂ /L	<0,03	2015/04/06
*Nitrógeno Total	S.M. 4500 NH3-B	Destilación	mg N/L	1760	2015/03/31
*Sulfuros	S.M. 4500 S2-F	Iodométrico	mg S ₂ /L	2,5	2015/04/07
*Pesticidas Organoclorados	EPA 8081 B	Cromatografía de gases	mg compuesto/L	< 1 x 10 ⁻⁵	2015/04/03
*Pesticidas Organofosforados	EPA 8141 B	Cromatografía de gases	mg compuesto/L	< 3 x 10 ⁻⁵	2015/04/03

Cabe anotar que como se mencionó anteriormente, estos análisis fueron dictaminados y comparados con base en la normativa DECRETO 1594 de 1984 (Derogado por el DECRETO NACIONAL 3930 de 2010), arrojando una remoción del 81% sobre una exigencia legislativa del 80%, y que actualmente, con la Resolución 0631 de 2015 no cumpliría con los límites

máximos permisivos, ya que se da con datos de concentraciones. Lo anterior con base en la siguiente tabla (Salida del sistema de tratamiento físicoquímico)

Tabla 2: Parámetros del lixiviado a salida del sistema de tratamiento, (ACUATEST, 2015)

Cliente:	EMAS	Lugar De Muestreo:	Sistema de tratamiento de lixiviados
Dirección:	Vía A Neira Corinto Km 4 - Manizales	Sitio De Muestreo:	Descarga
Fecha Informe:	2015/04/14	Descripción De La Muestra:	Lixiviado
Fecha Recepción:	2015/03/19	Temperatura Ambiente:	20 °C
Fecha Muestreo:	2015/03/19	Condiciones climáticas:	Día frío, tarde con lluvias
Tipo De Muestra:	Compuesta	Plan de Muestreo:	FCD-018-167
Código Muestra:	15 - 256		

Parámetro	Método	Técnica	Unidades	Valor	Fecha ejecución del ensayo
pH	S.M.4500-H+	Electrometría	---	8,54 ± 0,17	2015/03/19
Temperatura	S.M. 2550 B	Electrometría	°C	18,6	2015/03/19
Caudal		Volumétrico	L/s	1,974	2015/03/19
Oxígeno Disuelto	S.M. 4500 OG	Electrometría	mg O ₂ /L	7,1 ± 1	2015/03/19
Conductividad	S.M.2510 B	Electrometría	mS/cm	7,94 ± 0,2	2015/03/19
DBO5. Demanda biológica	S.M. 5210 B	Incubación	mg O ₂ /L	1435 ± 49	2015/03/19
oxígeno Total	S.M. 4500 O G				2015/03/24
DQO. Demanda química	S.M. 5220 C	Reflujo Cerrado	mg O ₂ /L	3120 ± 312	2015/03/20
oxígeno Total					
SST. Sólidos suspendidos totales	S.M.2540 D	Gravimetría	mg SST/L	315 ± 23	2015/03/20
SSed. Sólidos Sedimentables	S.M. 2540 F	Cono Imhoff	mL/L/h	0,3	2015/03/19
*Detergentes (SAAM)	S.M. 5540 C	Colorimetría	mg SAAM/L	15,9	2015/03/31
*Grasas y aceites	S.M. 5520 C	Partición Infrarrojo	mg grasas y aceites/L	1,12	2015/04/01
*Plata	S.M. 3111 B	Absorción Atómica	mg Ag/L	< 0,0036	2015/03/31
*Arsénico	S.M. 3500 As-B	Absorción Atómica	mg As/L	0,005	2015/04/01
*Bario	S.M. 3111 D	Absorción Atómica	mg Ba/L	0,228	2015/03/31
Cobre	S.M. 3111 B	Absorción Atómica	mg Cu/L	< 0,04	2015/03/31
*Mercurio Total	S.M. 3112 B	Absorción Atómica	mg Hg/L	< 0,00027	2015/03/31
*Mercurio Orgánico	S.M. 3112 B	Absorción Atómica	mg Hg/L	0,0008	2015/03/26
Níquel	S.M. 3111 B	Absorción Atómica	mg Ni/L	0,115±0,002	2015/03/31
*Plomo	S.M. 3111 B	Absorción Atómica	mg Pb/L	0,015	2015/03/31
*Coliformes Totales	S.M. 9222 B	Substrato Enzimático	NMP/100mL	3,13 x 10 ³	2015/04/09
*E-Coll	S.M. 9222 C	Substrato Enzimático	NMP/100mL	1,0 x 10 ⁴	2015/04/09
*Cianuro Total	ASTM D7511-09	Ultravioleta	mg CN/L	0,065	2015/04/06
*Fenoles totales	S.M. 5530 B-C	Colorimétrico	mg fenoles/L	0,430	2015/03/31
*Fósforo orgánico	S.M. 4500 P	Colorimétrico	mg P/L	< 0,025	2015/04/06
*Fósforo inorgánico	S.M. 4500 P	Colorimétrico	mg P/L	< 0,025	2015/04/02
*Fósforo total	S.M. 4500 P	Colorimétrico	mg P/L	< 0,025	2015/03/31
*Nitratos	S.M. 4500 NO3-B	Ultravioleta	mg NO3/L	13,4	2015/04/06
*Nitritos	S.M. 4500 NO2-B	Colorimétrico	mg NO2/L	< 0,03	2015/04/06
*Nitrógeno Total	S.M. 4500 NH3-B	Destilación	mg N/L	813	2015/03/31
*Sulfuros	S.M. 4500 S2-F	Iodométrico	mg S ₂ /L	3,8	2015/04/07
*Pesticidas Organoclorados	EPA 8081 B	Cromatografía de gases	mg compuesto/L	<1 x 10 ⁻⁶	2015/04/03
*Pesticidas Organofosforados	EPA 8141 B	Cromatografía de gases	mg compuesto/L	<3 x 10 ⁻⁵	2015/04/03

1.4. LIXIVIADOS

“Los Lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos” (Giraldo, 2001).

1.4.1. CALIDAD DE LOS LIXIVIADOS

Las propiedades de los lixiviados producidos en un relleno sanitario pueden resultar muy cambiantes a través tiempo, dependiendo de las características del relleno sanitario que se tenga. Generalmente en países más desarrollados se presentan altas concentraciones de DBO, amoníaco y presencia de metales, con referencia a países en vía de desarrollo. “La diferencia es originada principalmente en los altos contenidos de materia orgánica fácilmente biodegradable, MOFBD, que se tiene en los residuos sólidos en los países en desarrollo, la cual posee un contenido de humedad alto, y se degrada rápidamente en el relleno sanitario, produciendo a su vez altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y de amoníaco” (Giraldo, 2001). Lo cual es importante analizar teniendo en cuenta las características de un país como Colombia, sus actividades productivas principales, y el manejo que se le da a los residuos; además, las características ambientales y la diferencia de ciudad a ciudad, ya sea clima, altitud, o topografía de la región.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GENERAL

- Diseñar, construir y poner en marcha un humedal a escala de laboratorio para tratamiento de lixiviados del relleno sanitario la esmeralda.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hacer una revisión del estado del arte del tratamiento de lixiviados por medio de humedales de flujo vertical.
- Diseñar y construir un humedal con capacidad volumétrica de 10 a 15 litros
- Evaluar los parámetros fisicoquímicos que permitan determinar la eficiencia de remoción de los humedales.

3. METODOLOGÍA

Para la realización del proyecto de “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN HUMEDAL A ESCALA DE LABORATORIO PARA TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA” se tuvieron en cuenta diferentes etapas, dando inicio a la investigación por medio de la búsqueda del estado del arte a través de revistas indexadas en bases de datos recomendadas; aquí se determinaron siete puntos de clasificación fundamentales que permitieran diferenciar la información, y analizar los datos que se obtuvieron, y así concluir qué es lo que verdaderamente aporta a la investigación. La clasificación fue la siguiente: Título del artículo o tesis, Tipo de humedal, Parámetros fisicoquímicos evaluados, vegetación utilizada, volumen efectivo del humedal, caudales y por último la referencia bibliográfica; con esto se pretende tener unas bases estructuradas y fundamentadas teórica y experimentalmente, que permitan determinar valores y diseños propios y acordes a las características topográficas del relleno sanitario “La Esmeralda”, partiendo de un prototipo experimental a escala de laboratorio.

3.1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Como primera etapa del proyecto fue fundamental hacer una revisión exhaustiva de los antecedentes e información bibliográfica de las temáticas con resultados exitosos relacionadas directamente con el tratamiento de lixiviados primordialmente, con puntos específicos en cuanto al diseño y construcción, tiempos de retención, caudales, tipos de plantas, lecho filtrante, y dirección del flujo. La finalidad principal es recolectar información

que enriquezca la iniciativa de construcción de un sistema de tratamiento terciario vía humedal en el relleno sanitario “La Esmeralda” de la ciudad de Manizales.

Para esto ha sido muy importante el uso de bases de datos confiables y recomendadas nacionalmente con contenido de revistas indexadas; además, fueron utilizados datos de experiencias en diferentes países de Latinoamérica, teniendo en cuenta la similitud en cuanto a producción de residuos, que de una u otra manera se convierte en tendencia en países en vía de desarrollo. Las experiencias ajenas se convierten en clave para el desarrollo del presente proyecto, por el hecho de que corrigen posibles errores, recomiendan tipos de plantas según la calidad del lixiviado, las condiciones medioambientales, las condiciones de diseño según caudal, ya sea a escala real, piloto o de laboratorio.

3.1.1. ANTECEDENTES NACIONALES

Los antecedentes de humedales construidos en Colombia se enfocan principalmente al tipo subsuperficial y a escala piloto, para el tratamiento de aguas residuales municipales o específicamente doméstica (ARD) para poblaciones pequeñas con caudales menores o aproximados a 50 L/s. A continuación, se mostrarán algunos ejemplos.

- En el año de 1997 se construyó un humedal de flujo subsuperficial en la ciudad de Tunja, como parte de un sistema de tratamiento de ARD que tenía como pretratamiento un reactor UASB, con una vigencia de 2 años, el cual tenía tiempos de retención con un rango entre 0,9 días y 3 días , un caudal promedio de 2,2 m³/día, la vegetación utilizada fue el junco (*Typhadomingueis*), obteniendo los siguientes datos de remoción: Demanda Química de Oxígeno (DQO) del 51,7%; Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) del 45,1%; Nitrógeno total del 15%; Fósforo total

del 31%; Sólidos suspendidos totales (SST) del 88,6% y Sólidos totales (ST) del 22,5% (Acero Carlos Ariel Cdiaza & Magíster en Ingeniería Civil, 2014).

- En el departamento de Cundinamarca, más específicamente en el municipio de Cogua en 2006 fue construido un humedal a escala piloto de flujo subsuperficial horizontal con un pretratamiento que constó de un tanque séptico prefabricado. El caudal promedio se manejó inicialmente en $1,34 \text{ m}^3/\text{día}$ y un afluente con DBO de 132 mg/L y efluente con 44 mg/L . El reactor fue un compartimiento con 2 metros de ancho por 5,8 metros de largo y una profundidad efectiva de 0,6 metros ($\text{Área}=11,6 \text{ m}^2$) y con un tiempo de retención hidráulica de 1,6 días y una carga hidráulica de $0,23 \text{ m/día}$. En este sistema se obtienen remociones de DBO promediadas entre el 66% y el 80%; en nitrógeno total del 30% y el 70%; para el fósforo aproximadamente 28% y por último para Sólidos suspendidos totales (SST) entre 44% y 90% (Lara, 1999).
- En el año 2009 se utilizaron humedales horizontales de flujo subsuperficial como tratamiento terciario o complementario para las aguas residuales domésticas (ARD) de la vereda La Bananera en el municipio de Pereira, Risaralda. Se prepararon cuatro humedales con una superficie de 90 m^2 cada uno, diseñados y construidos para escala real a la salida del tanque séptico y un filtro anaerobio. El caudal que le fue añadido a los humedales fue en promedio $0,27 \text{ L/s}$, para una carga hidráulica alrededor de $2542 \text{ m}^3/\text{ha}\cdot\text{d}$ además con un tiempo de retención de 1,23 días. Los resultados de remoción arrojados fueron de 49% para DBO_5 , y 45,83% de DQO (Acero Carlos Ariel Cdiaza & Magíster en Ingeniería Civil, 2014).
- La universidad Nacional ha trabajado, en su sede de la ciudad de Bogotá, un humedal artificial denominado “HUMEDAR – I”, cuyo diseño abarca un reactor anaerobio de compartimientos paralelos con flujo pistón, seguido por un humedal construido de

alta tasa, sembrado con macrófitas nativas que fueron sobrepuestas en sustrato de material de plástico reciclado con un diseño para la superficie específica de $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Dicho prototipo utiliza como lecho filtrante un soporte plástico en forma de esfero elipsoidal con una porosidad aproximada del 94% y fue desarrollado para la formación de una biopelícula sobre esta área superficial. Mediante una aplicación del mismo en la locación petrolera Caño Gandul en el departamento de Casanare, se obtuvieron remociones de la DBO_5 en un promedio de 45%, de SST obtuvo una eficiencia promedio de 92,5% con un tiempo de retención hidráulico de 2,77 d (Acero Carlos Ariel Cdiaza & Magíster en Ingeniería Civil, 2014).

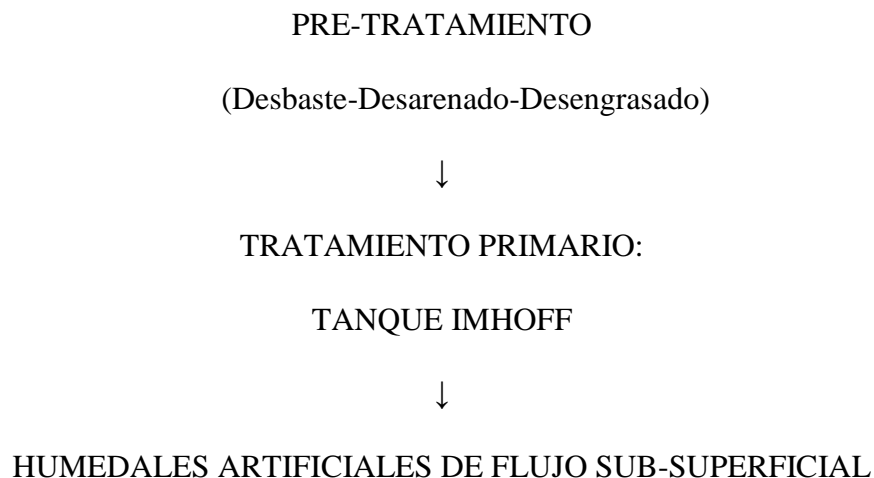
- En la Escuela Colombiana de Ingeniería de Bogotá se llevó a cabo el diseño y construcción de un humedal a escala piloto de flujo subsuperficial horizontal, el cual utilizó como lecho carbón mineral y vegetación macrófita de tipo *Zantedeschia aethiopica*; para la escogencia de esta planta se tuvieron en cuenta características de crecimiento similares al lugar de construcción y monitoreo, que fuera de fácil manipulación y adquisición en la zona, además de una buena apariencia estética, la densidad de plantas para su plantación fue de 14 plantas por m^2 . Se utilizó carbón mineral en el lecho fundamental del humedal ya que es un material con grandes propiedades de porosidad, conductividad hidráulica y absorción. La operación del mismo fue a la intemperie, y se le realizó una alimentación de agua residual hecha en laboratorio con características de Agua residual doméstica. El sistema trató un caudal promedio de 96 L/día, con un tiempo de retención hidráulica de 4 días. Se manejó una carga hidráulica superficial promedio de $480 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{día}$, una carga promedio de DQO de $506 \text{ kg}/\text{ha} \cdot \text{día}$, carga de DBO igual a $188 \text{ kg}/\text{ha} \cdot \text{día}$. Se obtuvieron

remociones superiores al 85% para turbiedad y SST. Para DQO 70% y para DBO₅ remoción del 52% (Acero Carlos Ariel Cdiaza & Magíster en Ingeniería Civil, 2014).

3.1.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

El estudio se realizó en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC), ubicada en el municipio del mismo nombre en la provincia de Sevilla (España). La PECC es un centro de investigación y de promoción de modelos sostenibles de depuración de aguas residuales. “Se construyeron 2 humedales artificiales de flujo subsuperficial (H1, H3). El H1 tiene una superficie de 320 m², cuenta con un sustrato de 60 cm de profundidad compuesto por arena gruesa de 1-2 mm y gravilla de 12-20 mm, plantado con carrizo (*Phragmites Australis*). El H3 tiene una superficie de 290 m², el sustrato está compuesto 30 cm de gravilla 4-12 mm, 30 cm de gravilla caliza de 3-8 mm y 10 cm de gravilla de 4-12 mm” (Janeth & Siachoque, 2009)

Las condiciones operativas son:



Los humedales son alimentados con efluentes provenientes del Tanque Imhoff que a su vez recibe aguas residuales que han pasado por el pre-tratamiento. Para el estudio de cada etapa, la duración fue de 19 semanas. Se evaluaron los principales parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las aguas depuradas. Los rendimientos de eliminación en cuanto a DBO5 y DQO (mayor al 90%) fueron obtenidos por el H1 trabajando con CO de 9 g DBO/m²*día (Janeth & Siachoque, 2009).

Finalmente, fue necesario clasificar y tabular los diferentes documentos, entre artículos científicos y tesis, haciendo un análisis diferenciado de los puntos clave que contribuyan a la investigación, y permitan acceder fácilmente a la información.

TÍTULO	TIPO DE HUMEDAL	PARAMETROS FISICOQUÍMICOS EVALUADOS	PLANTAS USADAS	VOLUMEN DEL REACTOR	CAUDALES	REFERENCIAS
DIVERSIDAD DE LAS COMUNIDADES DE ALGAS ASOCIADAS A UN SISTEMA ALGAL DE ALTA TASA FOTOSINTÉTICA PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS	Humedal subsuperficial de flujo horizontal	PO ₄ ³⁻ (FOSFATOS), SSV, SST, COD, DQO total y filtrada, NKT, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻	ALGAS	0,3 m ³	0,24 m ³ /día	
BIOPROSPECCIÓN DE PLANTAS NATIVAS PARA SU USO EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN: CASO HELICONA PSITTACORUM (HELICONACEA)		DQO, DBO ₅ , SST, Nitrógeno amoniacal, Nitritos y nitratos, fosfatos y metales	Heliconia			(Peña, Madera, Sanchez, & Medina, 2013)
CONTROL DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS GENERADOS EN HORTICULTURA		Nitratos y nitritos, fosfatos y potasio.				
DISEÑO DE HUMEDAL CONSTRUIDO PARA TRATAR LOS LIXIVIADOS DEL PROYECTO DE RELLENO SANITARIO DE POCOCÍ	Flujo subsuperficial	DBO, SST, Fósforo, Amoniacal	Thypa Latifolia		25 m ³ /día	(Fonseca, 2010)
ROL DE LAS MACRÓFITAS EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE UN LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO UTILIZANDO UN HUMEDAL CONSTRUIDO	Subsuperficial	DBO, DQO, Ph, nitratos y nitritos, amonio	Macrófitas (Falso junco, Lirio, Totora, Canutillo, Sagitaria.		2 L/hora	(Sánchez et al., 2013)
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO POR MEDIO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS SEMBRADOS CON POLICULTIVOS DE PLANTAS NATIVAS	Flujo subsuperficial vertical	DQO total y filtrada y metales pesados (Cd, Pb y Hg)	Thypa alatifolia y Cyperus malaccensis	10,16 m ³		(Madera-parra, 2016)
DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO "EL INGA" MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN Y FITORREMEDIACIÓN	Flujo subsuperficial vertical y adsorción con carbón activado	DBO ₅ , DQO, SST, COLOR.	Pastos (miel, elefante, ryegrass y dallis), alfalfa y maní forrajero.		0,04 ml/hora	(Guevara, Guanoluisa, & De La Torre, 2014)
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR HUMEDALES CONSTRUIDOS – ENSAYOS PRELIMINARES	Flujo superficial	DQO, SST, Metales pesados (Cr, Cd, Hg, Pb, Zn), fósforo total y nitrógenos (NO ₃ y NH ₃)	Thypa dominguensis (totoras),		785 L/día	(Flores et al., 2008)
ESTIMACIÓN CINÉTICA DE LOS PROCESOS BIOLÓGICOS DE LIXIVIADOS, A PARTIR DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL CON HUMEDALES ARTIFICIALES UTILIZANDO ESPECIES NATIVAS	Flujo superficial horizontal	DQO y SST	Crysopogon Zizanioides y Thypa Latifolia		TL: 7,82 L/día CZ: 8,52 L/día (Td: 3 días)	(Nely, Verjel, Ramón, Lenin, & Valencia, 2015)
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS MEDIANTE HUMEDALES	Flujo superficial y subsuperficial	PH, Conductividad, SS, Sulfatos, Amoniacal,	Macrófitas (Españañas,			(Mosquera, 2012)

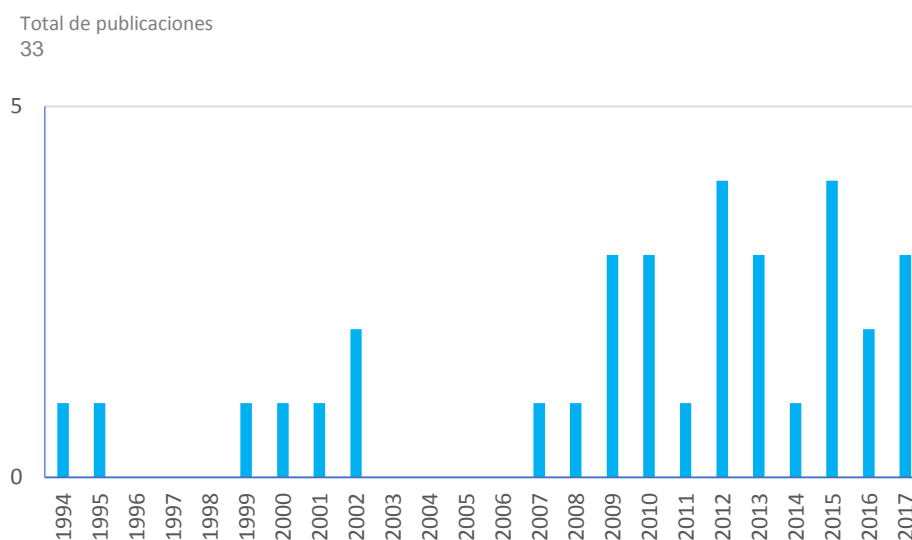
ARTIFICIALES: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE		Hierro, Plomo, DBO y DQO	Carrizos, Pasto alpiste)			
BIODEGRADABILIDAD DE FLUJOS DE ALIMENTACIÓN: EN HUMEDALES ARTIFICIALES PILOTO PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO "ANTANAS"	Flujo subsuperficial	DBO, DQO	Totora		20 ml/s	(Zamora, Freire, & Jurado, 2009)
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS		DBO, DQO, Amoniac, Fósforo, PH, Sales disueltas, Metales pesados				(Giraldo, 2001)
DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL CON MACRÓFITAS COMO TRATAMIENTO PARA LA DEPURACIÓN Y REDUCCIÓN DE LOS LIXIVIADOS PROVENIENTES DE LAS PISCINAS DE LIXIVIADOS DEL PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL "LAS BATEAS", EN EL MUNICIPIO DE AGUACHICA, CESAR	Flujo superficial	DBO5, DQO, OD, SST, PH.	Buchón de Agua (Eichhornia crassipes), Macrófita		3,8 L/s	(Hoja, Para, & Grado, 2012)
PURIFICACIÓN COMBINADA Y REUTILIZACIÓN DE LIXIVIADOS POR MEDIO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS Y RIEGO DE HIERBA Y SAUCES	Flujo subsuperficial horizontal y vertical	DBO, PH, SST, DQO, Nitrógeno total, Ca, Mg, K, Na, h	Phragmites australis, Sauce			(Justin & Zupančič, 2009)
ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS PRESENTES EN LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS POR MEDIO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS EN FLUJO VERTICAL A ESCALA DE LABORATORIO	Flujo Subsuperficial vertical	Metales pesados (Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn)	Juncus effusus, Phragmites	5 L	3 ml/min	(Dan, Fujii, Soda, Machimura, & Ike, 2017)
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN HUMEDALES DE UN VERTEDERO CERRADO	Flujo superficial	Amoniac, DBO, SST	Thypa latifolia			
ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS DEL LIXIVIADO DE ROBLE EN SISTEMAS DE HUMEDALES A ESCALA PILOTO ¿CUÁN EFICIENTES SON LOS TRATAMIENTOS DE AIREACIÓN Y VEGETACIÓN?		DQO, PPs (Polifenoles) y color,	Phragmites australis	600 L	42,9 L/día	(Svensson, Ekstam, Marques, & Hogland, 2015)
CO TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE VERTEDERO Y AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES UTILIZANDO EL SISTEMA DE HUMEDAL CONSTRUIDO "ZELIAC/ZEOLITA"	Flujo superficial	DQO, Color, Amoniac, Níquel y Cadmio.	Thypa domingensis	43 L		(Mojiri, Ziyang, Tajuddin, Farraji, & Alifar, 2016)

TRATAMIENTO DE LIXIVIADO DE COMPOST MEDIANTE UN HUMEDAL CONSTRUIDO EN UN FLUJO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL A ESCALA PILOTO	Flujo horizontal subsuperficial	DBO5, COD, Nitritos y nitratos	Vetiveria zizanioides y otro sin plantar	0,375 m ³ (375 L)	24 L/día	(Bakhshoodeh, Alavi, Majlesi, & Paydary, 2017)
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN RELLENOS SANITARIOS UTILIZANDO UN HUMEDAL CONSTRUIDO DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	Flujo subsuperficial	DQO, SST, DBO5, Nitrógeno amoniacal, Fósforo total, Nitrógeno total y metales pesados (Fe, Mg, Mn y Zn)	Cyperus Haspan			(Akinbile, Yusoff, & Ahmad Zuki, 2012)
HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN CLIMA FRÍO -UNA REVISIÓN		Metales pesados		20 m ³ /día		(Wang, Zhang, Dong, & Tan, 2017)
POTENCIAL Y LÍMITES DEL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DE VERTEDEROS EN UN HUMEDAL CONSTRUIDO DE FLUJO SUBSUPERFICIAL DE MÚLTIPLES ETAPAS – EVALUACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS Y NITRÓGENO	Flujo subsuperficial vertical	DQO, Nitrógeno,	Phragmites australis (caña común)		95 L/día	(Wojciechowska, 2017)
ELIMINACIÓN DE PPCPS SELECCIONADOS, EDCS Y GENES DE RESISTENCIA A ANTIBIÓTICOS EN LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS MEDIANTE UN SISTEMA DE HUMEDALES CONSTRUIDOS A ESCALA COMPLETA						

Tabla 3: Estado del arte

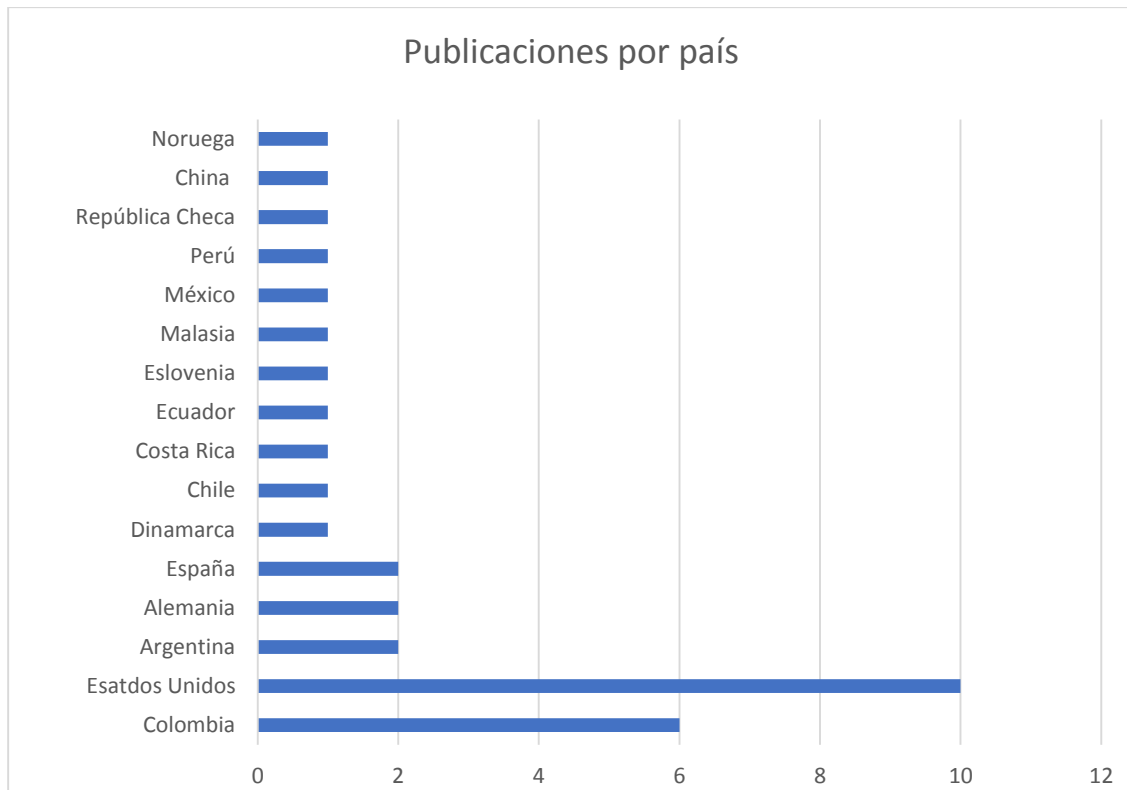
3.1.3. BIBLIOMETRÍA

Gráfico 4: Publicaciones por año



La gráfica muestra citas publicadas en periodos de tiempo comprendidos entre los años 1995 hasta 2017, donde notoriamente hay intermitencias de estas entre los años 1996 a 1998 y 2003 a 2006. La continuidad de publicaciones más alta se da en los últimos 11 años empezando desde el año 2007, donde los valores más altos se dan para los años 2012 y 2015 con 4 publicaciones cada uno.

Gráfico 5: Documentos por país



Se revisó todo el estado del arte citado en el trabajo, y se observa que Colombia posee la mayor revisión de información con 9 artículos citados, lo sigue Estados Unidos con 3 y Argentina, Alemania y España con 2, el resto de los países que hacen parte de las referencias cuentan con 1 cada uno de ellos.

3.2. INICIO DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE HUMEDAL

Para la experimentación, se decidió construir dos prototipos con los cuales se pudiera comparar la eficiencia de remoción entre un humedal plantado y otro no plantado, tal como se muestra en algunas referencias bibliográficas (Dan et al., 2017). Para esta investigación se utilizó la planta *Chrysopogon Zizanioides* o más conocida como Pasto Vetiver, el cual es un

tipo de planta gramínea que se reconoce mundialmente en sistemas de tratamiento de aguas como una tecnología con un valor agregado (Vetivercolsas, s.f.); y posee las siguientes características:

Tabla 6: Características del pasto Vetiver

FORMA	Gramínea perenne
	Alturas hasta de 2 m
	Crece verticalmente con profundidades hasta de 5 m
	Naturalmente hidrófila, aunque crece bien bajo condiciones xerófitas (secas)
TEMPERATURA	Supervivencia de -9°C a más de 45°C
	Cuando el suelo se congela la planta muere
	Su crecimiento es más rápido en climas cálidos
HUMEDAD	En un adecuado manejo, con condiciones áridas (de 300 mm), pero es preferible de 700 en adelante
	Aguanta sequías extremas, pero requiere normalmente de una época de lluvias de al menos 3 meses
	Crece mejor bajo condiciones húmedas
	Es una planta C4 (“Las plantas C4 incorporan el CO2 en otros compuestos,

<p style="text-align: center;">LUZ Y SOMBRA</p>	<p>como una adaptación para soportar mejor la luz solar intensa y la sequía” (Bolufer, 2010)). Con un porcentaje de 40% de sombra se puede dar una buena adecuación de la planta.</p>
<p style="text-align: center;">SUELOS</p>	<p>Suelos magros arenosos y profundos. Sin embargo, puede crecer en superficies pedregosas, suelos ácidos (pH3) o alcalinos (pH11), puede resistir niveles tóxicos como el aluminio, manganeso (550 ppm) y condiciones sódicas o salinas. También tiene resistencia ante inundaciones duraderas (Vetivercolsas, s.f.)</p>
<p style="text-align: center;">ALTITUD</p>	<p>Desde alturas a nivel del nivel del mar hasta superiores de 2800 msnm. Pero tiene un problema con las temperaturas más bajas que se dan en altitudes mayores y con alta nubosidad.</p>
<p style="text-align: center;">SISTEMA RADICAL</p>	<p>“En condiciones favorables, el sistema de raíces puede tomar una profundidad de hasta 5 metros, y bajo la superficie del suelo se forma una barrera en raíces que permite que los suelos se estabilicen debido al</p>

	<p>amarre que el pasto Vetiver les aporta a los suelos en laderas, jarillones y taludes de carreteras. Las raíces penetrarán hasta la capa "C" y adentro la roca podrida (saprolite), y crecen en rajaduras en la roca lo podrida” (Vetivercolsas, s.f.).</p>
<p>SIEMBRA</p>	<p>“La siembra de barreras debe ser durante el inicio de la estación lluviosa cuando el suelo está bien húmedo y se espera tener un mínimo de 30 a 45 días más de lluvias. Dos a tres tallos deben de estar sembrados y separados a cada 10 - 15 cm” (Vetivercolsas, s.f.).</p>
<p>BAJO COSTO</p>	<p>La aplicación de sistemas de tratamiento para agua residual con el uso del pasto Vetiver genera una fracción de costos en relación a métodos químicos y mecánicos, además de que es un sistema orgánico y natural, de fácil manejo y mantenimiento.</p>

Fuente: (Vetivercolsas, s.f.)



Ilustración 5: Planta Vetiver

Imagen obtenida de: <http://www.vetivercolsas.com/pasto-vetiver>

El ejemplar utilizado para la experimentación fue obtenido del invernadero de la Universidad Católica de Manizales, el cual tenía una previa manipulación como blanco en un proyecto anterior de tratamiento de aguas con hidrocarburos, y fue facilitado por el docente Luis Felipe Valencia.

El lixiviado utilizado fue obtenido a la descarga del sistema de tratamiento fisicoquímico que efectúa EMAS a este líquido. Para esto se utilizaron dos recipientes de 20 litros cada uno, con la finalidad de hacer circular el lixiviado por los dos humedales, y adaptar a la planta, cabe mencionar que el llenado de estos no tuvo una periodicidad marcada, todo dependió de

la disponibilidad de los encargados en el relleno sanitario “La Esmeralda”, y de la necesidad de cambio que solicitara tal circulación. A los tanques alimentadores se les adhirió una venoclisis en la parte inferior para la regulación del caudal de entrada a los humedales.



Ilustración 6: Tanque alimentador

Para la construcción de los humedales se utilizaron dos tubos de 5 pulgadas de diámetro y una altura de 110 cm, con la parte superior abierta, para el ingreso del lecho, la prolongación de la planta y la entrada del afluente; por otra parte, la sección inferior fue sellada con un tapón ciego, y la descarga del mismo se dio por medio de un tubo de 1 pulgada a 10 cm sobre

la altura cero (0). Esta construcción está fundamentada teóricamente en el estado del arte, y se muestra por medio de la siguiente tabla

Tabla 7: Profundidad de las capas de material filtrante

Tabla. Profundidades de las capas de material filtrante.			
Ubicación de la capa y tipo de material	Profundidad de la capa y tamaño de partícula	Referencia	
Fondo; grava	20 cm	Von Munch	
	15cm grava(20-40mm) en el fondo, seguido por 5cm grava (5-10mm)	UN, 2008	
	10 cm grava(20-40mm) en el fondo, seguido por 10-20cm grava (3-10mm)	Infoandina	
	20 cm grava (8-16mm)en el fondo	Brix	
Zona media (capa principal); arena	15 cm (3-6cm grava lavada)	Vymazal, 1998, p. 40; Oakland Park	
	20 cm de grava (16-32mm) en el fondo; seguido por 10 cm capa de transición (4-8mm)	Vymazal, 1998, p. 40, tomado de ONORM 1996.	
	al menos 50cm de arena	Von Munch	
	45 cm de arena	UN, 2008	
	60 cm (0-4mm /4-8mm /1-1mm);	Vymazal	
	al menos 30 cm de arena	Infoandina	
	100cm de arena	Brix	
	Zona superior; grava	15 cm de grava	Von Munch
		5cm de grava (5-10mm) en la parte superior	UN, 2008
		8 cm capa superior (sharp sand); 15cm (6 mm); 10cm (12mm)	Vymazal, 1998, Oaklands Park
5-20 cm capa de protección (8-16mm)		Vymazal, 1998, p.40, tomado de ONORM 1996.	
20 cm de grava (8-16mm) en la parte superior		Brix	

FUENTES: (HOFFMANN, 2011), (Brix, 1994), (Vymazal, 2010)

Basados en la información y toda la investigación apoyada en experiencias científicas, se determinaron unas medidas para la altura de cada capa en el humedal, así como el diámetro

de grano, y los materiales a utilizar, a través de promedios según los valores arrojados en la tabla anterior y experimentación conforme se construían los humedales.

Primera capa: Como bien se mencionó anteriormente, el tubo de salida se ubicó a 10 cm de la altura cero (0) del humedal, así que esta porción del recipiente y otros 5 cm más de altura fue rellena con grava gruesa, de aproximadamente 3-4 cm de diámetro, y se compactó con arena, la cual llenó espacios sobrantes.

Segunda capa: Esta sección fue conformada por grava más fina, con un diámetro de 0,5-1 cm y cubrió una totalidad de 15 cm de altura. Cabe agregar que la grava fue previamente seleccionada para que fuera lo más pareja posible y además se le llevó a cabo un lavado estricto para limpiar partículas menores.

Tercera capa: Como la mayor de las capas en este experimento y una de las más recomendadas por el estado del arte, se presentan 50 cm de arena tamizada y de la más fina, la cual, por su número de espacios más reducido genera un mayor tiempo de retención del agua problema y mayor intermitencia en el flujo de la misma.

Cuarta capa: En esta última sección se utilizó piedra pómez, como factor nuevo y principalmente por sus características porosas. Dicha capa fue dada con una altura de 10 cm, y las piedras con un diámetro aproximadamente entre 1-3 cm.

Quinta capa: Aquí fue donde se dio la posición final de la planta Pasto Vetiver, que fue sembrada con su substrato (tierra), y con una altura de aproximadamente 12 cm.

Para la adecuación de la planta, y por recomendación del Ingeniero y docente Luis Felipe Valencia, se le proporcionó fertilizante genérico a lo largo de mes y medio cada semana, en una proporción de 15 g por dos Litros. Es importante tener en cuenta que los humedales se

situaron al aire libre, donde han recibido todas las inclemencias meteorológicas de la ciudad de Manizales. Después de la agregación del fertilizante, se procedió a la circulación de agua con colorante a través de los humedales para dar una estimada inicial del tiempo de retención y además del correcto funcionamiento de estos, en cuanto al flujo; en torno a esto las características visuales mostraron una disminución en el color del agua utilizada inicialmente.



Ilustración 7: Experimento agua con colorante

1. Agua con colorante
2. Agua tratada por humedal no plantado
3. Agua tratada por humedal plantado

A continuación, se procedió a utilizar lixiviado extraído de la canalización final del relleno sanitario “La Esmeralda”; teniendo en cuenta su alta toxicidad, previamente mostrada por las tablas de análisis fisicoquímicos, se le añadió un pequeño caudal al sistema con el fin de estabilizar la planta, siempre al aire libre, intentando emular las condiciones ambientales del relleno sanitario. Tal estabilización tuvo lugar en un tiempo de aproximadamente 8 meses entre 2017 y 2018, y la planta demostró una gran resistencia, tanto con las características del lixiviado como las condiciones ambientales. Esta circulación fue periódica, dos veces al mes se dio paso al flujo a través del sistema, con el objetivo de dar adaptación a la planta. Una vez se dio fin a esta fase del proyecto se renovó el lixiviado, tomando muestras de nuevo del relleno y se determinó un caudal de entrada para los humedales, teniendo en cuenta la siguiente fórmula

$$Q * \frac{DBO \left(\frac{g}{m^3} \right)}{A(m^2)} = Carga \left(30 \frac{gDBO}{m^2 * dia} \right)$$

$$Q = \frac{Carga * \text{Área}}{DBO}$$

$$DBO = 1,43 \frac{g}{m^3}$$

$$\text{Area} = 0,179 m^2$$

$$Q = \frac{\left(\frac{30gDBO}{m^2 * día} \right) * (0,179 m^2)}{\frac{1,43g}{m^3}} = 0,00374 \frac{m^3}{día} = 3,74 \frac{l}{día}$$

Una vez determinado el flujo de entrada se inició el proceso, inicialmente para determinar el tiempo de retención, para lo cual se vació completamente el sistema y así asegurar la salida del líquido que estaba entrando y que no se viera afectado por aguas lluvias acumuladas. Se realizaron 3 medidas diferentes para el tiempo de retención, siempre manteniendo el mismo caudal, y el valor obtenido fue de 42 min.

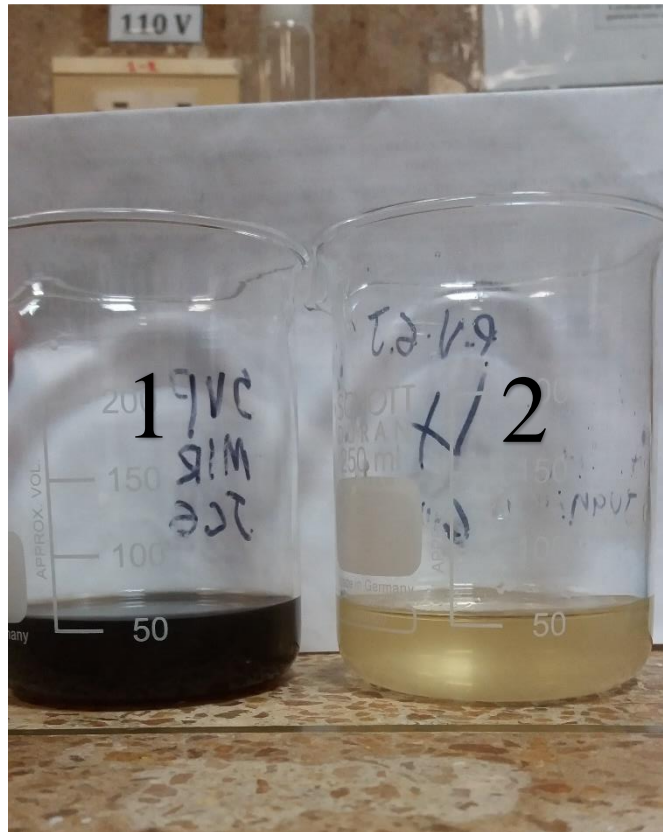


Ilustración 8: Comparación de muestras humedal plantado

1. Lixiviado crudo, obtenido del relleno sanitario
2. Lixiviado tratado, obtenido de la descarga del humedal

Como primera impresión, se puede identificar una gran remoción de color por parte del humedal plantado, además el olor disminuyó considerablemente, lo cual muestra una correcta adaptación de la planta al medio.

Para el caso del humedal no plantado se realizó la circulación con las mismas características que las del humedal plantado, precisamente para relacionar y comparar los resultados y concluir la importancia de la planta. Se agregó el mismo tipo de lixiviado, con igual caudal (0,043 ml/s), esta vez lo más relevante del proceso fue que el tiempo de retención disminuyó en comparación con el otro humedal (31 min 40 s).

3.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Para concluir y determinar la eficiencia de los humedales se escogieron los parámetros a medir, con base en el estado del arte, la importancia y la facilidad para acceder a los análisis y su medición. Estos parámetros son: DQO (Demanda Química de Oxígeno), que “corresponde a la cantidad de oxígeno requerida para oxidar completamente por medios químicos los compuestos orgánicos a CO_2 y H_2O ” (Cisterna & Peña, 2009). Y como representación de los metales pesados el Cromo (Cr), que normalmente es producido por actividades industriales tales como producción de acero, peleterías, textiles, pintura eléctrica (Carvajal, 2007). Este último se dio por medio de espectrofotometría de absorción atómica, aprovechando las instalaciones de la Universidad Católica de Manizales, y su lámpara para el análisis de este componente, dicha “técnica tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada, esta radiación es absorbida selectivamente

por átomos que tengan niveles energéticos cuya diferencia en energía corresponda en valor a la energía de los fotones incidentes” (Rocha Castro, 2000).

Para la recolección de muestras y su determinación de DQO se tomaron 100 ml a la salida de cada humedal, los cuales fueron llevados a refrigeración (3°C), para luego ser entregados a los laboratorios de química de la Universidad Nacional Campus La Nubia, y así ser determinado este parámetro.

➤ MÉTODO DE ANÁLISIS DQO

Este análisis fue realizado por medio del “*Standard Methods 5220C*”, en el laboratorio de química de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, el cual constó del siguiente proceso:

Se calienta la muestra problema en una solución fuertemente ácida con un volumen en exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Cuando termina la digestión, el sobrante de $K_2Cr_2O_7$ no reducido se debe titular con sulfato de amonio ferroso para llegar al dato final de $K_2Cr_2O_7$ consumido y la materia oxidable se calcula en términos de oxígeno equivalente. Se mantienen las proporciones de pesos, volúmenes y concentraciones de reactivos constantes cuando se usan volúmenes de muestras distintos a 50 ml. El tiempo estándar de 2 horas puede ser reducido solo si se demuestra que un periodo más corto produce los mismos resultados. Los resultados se potencian aún más al hacer reaccionar una cantidad máxima de dicromato, siempre que quede algo de dicromato residual. (Standard Methods Committee, 1997)



Ilustración 9: Condensador



Ilustración 10: Equipo para titulación

Este análisis arrojó los siguientes resultados

Tabla 8: Resultados DQO humedal no plantado (Fuente: Laboratorio de Química UNAL)

SUPLEMENTO AL INFORME DE ENSAYO LQIE-0168-2018

N°. de muestra :18818
 Tipo de muestra : Lixiviado
 Identificación : Humedal No Plantado
 Toma de la muestra : Cliente
 Fecha de recepción : 06 de junio de 2018

DETERMINACIÓN	FECHA DE ANÁLISIS	UNIDADES	RESULTADO*	MÉTODO
DQO	2018/06/07	mg O ₂ /L	2.671,29	Reflujo Abierto

$$\%E = \frac{4475 \frac{mg}{l} - 2671,3 \frac{mg}{l}}{4475 \frac{mg}{l}} * 100 = 40\%$$

Tabla 9: Resultados DQO humedal plantado (Fuente: Laboratorio de Química UNAL)

INFORME DE ENSAYO LQIE-0167-2018

N°. de muestra :18817
 Tipo de muestra : Lixiviado
 Toma de la muestra : Cliente
 Fecha de recepción : 06 de junio de 2018

DETERMINACIÓN	FECHA DE ANÁLISIS	UNIDADES	RESULTADO	MÉTODO
DQO	2018/06/07	mg O ₂ /L	681,44	Reflujo Abierto

$$\%E = \frac{4475 \frac{mg}{l} - 681,44 \frac{mg}{l}}{4475 \frac{mg}{l}} * 100 = 84,7\%$$

➤ MÉTODO DE ANÁLISIS CROMO

Se extrajeron las dos muestras de lixiviado (Crudo y Tratado), de cada una de ellas se tomaron 60 ml, los cuales fueron filtrados por medio de una membrana filtrante para evitar que los

sólidos presentes afectaran la lectura del espectrofotómetro; este sistema de espectrofotometría fue graduado por medio de una curva de calibración, posteriormente se sacó de cada muestra 1 ml, y cada uno fue depositado en un balón de 100 ml respectivo, para luego aforar con 100 ml de agua destilada cada uno (Relación 1:100), y a este recipiente le fue aplicada la prueba de espectrofotometría de absorción atómica, por medio de la lámpara de Cromo. Los resultados arrojados fueron los siguientes:

Lixiviado crudo (o, de entrada): 0,790 mg/l

Lixiviado tratado (o de salida): 0,503 mg/l

Se realiza el factor de conversión a la dilución

$$\text{Entrada} = C_1V_1 = C_2V_2 \quad \text{entonces} \quad C_1 * 1ml = 0,79 \frac{mg}{l} * 100ml$$

$$C_1 = 79 \frac{mg}{l}$$

$$\text{Salida} = C_1V_1 = C_2V_2 \quad \text{entonces} \quad C_1 * 1ml = 0,503 \frac{mg}{l} * 100ml$$

$$C_1 = 50,3 \frac{mg}{l}$$

Con base en estos resultados se determina el porcentaje de remoción de la siguiente manera

$$\%E = \frac{\text{Entra} - \text{Sale}}{\text{Entra}} * 100$$

$$\%E = \frac{79 \frac{mg}{l} - 50,3 \frac{mg}{l}}{79 \frac{mg}{l}} * 100 = 36,32 \%$$

La eficiencia de remoción del humedal plantado fue del 36,32%

Tabla 10: Comparación características de humedales

COMPARACIÓN HUMEDALES			
HUMEDALVERTICAL	PLANTADO	NO PLANTADO	NORMATIVA (Resolución 0631 de 2015)
Caudal de entrada (ml/s)	0,043	0,043	
Tiempo de retención	42 min 15 s	31 min 40 s	
DQO inicial lixiviado (mg/l)	4475*	4475*	
DQO final lixiviado	681,44	2671,3	2000
CROMO inicial lixiviado (mg/l)	0,79	0,79	
CROMO final lixiviado (mg/l)	0,50		0,5
REMOCIÓN DQO (%)	84	40	6-9

REMOCIÓN (%)	CROMO	36		
-----------------	-------	----	--	--

*Dato proporcionado por EMAS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta la necesidad que se tiene de un tratamiento más completo y eficiente de lixiviados en el relleno sanitario “La Esmeralda” de la ciudad de Manizales, aparece la oportunidad de experimentar con un sistema no explorado en la ciudad, al menos a escala real, y que ha tenido buenos resultados en otros lugares del país y fuera de él, humedales construidos; sistema que ha demostrado altas eficiencias de remoción, facilidad de diseño y construcción, y además bajos costos de mantenimiento. Según las visitas realizadas a dicho vertedero de residuos, la calidad del lixiviado que se deposita en el cuerpo de agua “Quebrada Olivares” es muy pobre, ya que genera fuertes olores, color muy opaco, además de gran cantidad de espumas, lo que demuestra que el sistema de tratamiento fisicoquímico tiene falencias importantes, que hacen necesario un fortalecimiento del mismo y por qué no, la búsqueda de nuevas alternativas más amigables con el medio ambiente como es el caso de los humedales.

El humedal plantado mostró mayor eficiencia de remoción en cuanto a los parámetros evaluados y con relación al humedal no plantado. Aunque no se genera una brecha muy alta

de remoción, el humedal plantado removió un 10% más de DQO que el no plantado, lo cual habla de una considerablemente aceptable adecuación de la planta, sabiendo que pueden mejorar las condiciones y tener una mayor variación en las condiciones de diseño de los humedales, así como su contenido de lecho.

Según los resultados de laboratorio que se obtuvieron de DQO y al compararlos con la normativa colombiana vigente en cuanto a límites máximos permisivos en descargas a cuerpos de agua, se tiene una gran aproximación (R0631: 150 mg/l; Humedal Plantado: 267,13 mg/l; Humedal no plantado: 681,44 mg/l), lo cual habla de una buena metodología y eficiencia de los materiales utilizados, las características propias del lecho utilizado, además del tiempo de retención, que tomando en cuenta futuras experimentaciones con este tipo de humedal se puede modificar esta variable para comparar si es o no proporcional con el porcentaje de remoción.

El cromo se identificó como parámetro importante en aguas residuales, ya que su presencia en altas concentraciones genera gran toxicidad, especialmente cuando su estado de oxidación aumenta, además el laboratorio de la Universidad Católica de Manizales cuenta con la lámpara para la identificación de Cromo con el equipo de espectrofotometría atómica. La remoción de este contaminante se dio en un porcentaje menor a la de la DQO, con resultados del 36% en el humedal plantado, donde no se demuestra un gran rango de diferencia por presencia de la planta; en comparación a la normativa que pide 0,1 mg/l ante 0,5 y 0,6 mg/l de este lixiviado tratado, se podría decir que necesita otro tipo de tratamiento, determinando primero qué tipo de cromo está contenido (nivel de oxidación), y utilizando nuevas variables de diseño para los humedales (tiempo de retención, volumen, caudal).

Los datos iniciales de parámetros evaluados por EMAS son del año 2015, esto nos genera un margen de error desconocido, teniendo en cuenta que se toma como punto de partida información que puede variar a lo largo de tres años, y finalmente determinar una concentración de contaminantes a la salida del tratamiento vía humedal; según esto, los datos de remoción podrían ser distintos, tema que se puede solucionar dándole continuidad al proyecto, donde se haga un estudio más minucioso al lixiviado actual.

5. CONCLUSIONES

- La búsqueda de información y experiencias previas documentadas en el estado del arte ha sido fundamental en este proceso investigativo, principalmente para la determinación de características propias de los humedales, como su contenido, altura, tipo de vegetación, caudales, tiempos de retención y demás propiedades que se hacen necesarias para un proyecto exitoso.
- Las propiedades del pasto Vetiver fueron demostradas en la medida de este proceso investigativo; su adaptación fue exitosa y demostró gran resistencia ante las eventualidades climáticas a las que fue expuesto, así como a la toxicidad del lixiviado que le fue añadido. La planta tuvo un difícil proceso de adaptación al inicio, pero a lo largo del experimento germinó de nuevo y fue fundamental en la remoción de contaminantes del lixiviado.
- El caudal apropiado para este tipo de humedal a escala de laboratorio permite una optimización en el porcentaje de remoción, demostrado por el humedal plantado, del cual se obtuvieron los mejores resultados, que por medio de un tiempo de retención más alto arroja mayor eficiencia.

- Con base en los resultados de laboratorio se puede decir que la eficiencia del humedal plantado es alta, con un 84% de remoción en DQO, mientras que del humedal no plantado se tiene una eficiencia media (40%) y demuestra un buen trabajo de adaptación de la planta, y buena utilización de parámetros de diseño.
- Teniendo en cuenta los resultados químicos y visuales que arrojó el tratamiento del lixiviado con el humedal plantado sería una buena opción a tomar en cuenta por parte de EMAS para el proceso que se le da a sus lixiviados como tratamiento alternativo, sabiendo que sus costes de mantenimiento son bajos en comparación a otras tecnologías.

6. RECOMENDACIONES

- Analizar la viabilidad de adaptación de humedales como tratamiento complementario en el relleno sanitario “La Esmeralda” de la ciudad de Manizales, tanto en el tema ambiental, a mediano y largo plazo, como en el tema económico.
- Promover la propuesta del presente trabajo para convertirlo en un proyecto institucionalizado que cuente con la presencia de docentes y estudiantes.
- Ampliar el seguimiento de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos en el humedal.
- Hacer un estudio de tratabilidad del lixiviado en la descarga de los humedales.

7. REFERENCIAS

- [1] Acero Carlos Ariel Cdiaza, D., & Magíster en Ingeniería Civil, U. (2014). Tratamiento de agua residual a través de humedales. *Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja Tratamiento*, 30. Retrieved from <http://www.ustatunja.edu.co/cong-civil/images/Articulos/-TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL A TRAVES DE HUMEDALES.pdf>
- [2] ACUATEST, L. d. (2015). *ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE LIXIVIADOS*. Manizales.
- [3] Akinbile, C. O., Yusoff, M. S., & Ahmad Zuki, A. Z. (2012). Landfill leachate treatment using sub-surface flow constructed wetland by *Cyperus haspan*. *Waste Management*, 32(7), 1387–1393. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.002>
- [4] Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Majlesi, M., & Paydary, P. (2017). Compost leachate treatment by a pilot-scale subsurface horizontal flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 105, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.058>
- [5] Brix, H. (1994). Use of constructed wetlands in water-pollution control - historical development, present status, and future perspectives. *Water Sci. Technol.*, 30(8), 209–223. <https://doi.org/10.2166/wst.1994.0413>
- [6] Bolufer, P. (19 de Octubre de 2010). *Interempresas.net*. Obtenido de <http://www.interempresas.net/Agricola/Articulos/44231-La-fotosintesis-C4-de-alto-rendimiento.html>
- [7] Carvajal, A. L. (2007). Estudio para la remoción de metales pesados en los lixiviados de rellenos sanitarios. *Facultad de Ingeniería Y Arquitectura, Especialis*, 94.

- [8] Cisterna, P., & Peña, D. (2009). Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región., 1–18.
- [9] D.C., S. J. (25 de Octubre de 2010). *Alcaldía de Bogotá*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620#79>
- [10] Dan, D. A., Fujii, D., Soda, S., Machimura, T., & Ike, M. (2017). Removal of heavy metals from synthetic landfill leachate in lab-scale vertical flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 578, 566–576. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.232>
- [11] EMAS. (2015). *Análisis físicoquímicos y microbiológicos de lixiviados*. Manizales.
- [12] EMAS. (2017). Manizales, Colombia.
- [13] Flores, M. D. P., Jejer, C. S., Barboza, O. M., Russo, H. R., Kruzolek, C., Smorzcewski, M. B., & Acuña, M. G. (2008). Tratamiento De Lixiviados Por Humedales Construidos –Ensayos Preliminares. *Rev. Cienc. Tecnol. Año N°*, 10(10), 54–58. Retrieved from <http://www.fceqyn.unam.edu.ar/recyt/index.php/recyt/article/view/349>
- [14] Fonseca, C. (2010). Diseño de Humedal Construido para tratar los lixiviados del Proyecto de Relleno Sanitario de Pococí, 63. Retrieved from http://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6158/diseño_humedal_lixiviados_proyecto_relleno_sanitario_Poci.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [15] Giraldo, E. (2001). Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de Ingeniería*, (14), 44–55. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>

- [16] Guevara, A., Guanoluisa, L., & De La Torre, E. (2014). Diseño de Sistemas de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario El Inga mediante Electrocoagulación y Fitorremediación, 34(1), 1–8. Retrieved from <http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen34/tomo1/DisenodeSistemasdeTratamientodeLixiviadosdelRellenoSanitario.pdf>
- [17] HOFFMANN, H. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. *GIZ Y ECOSAN, Eschborn, Alemania*, 38. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Revisión+Técnica+de+Humedales+Artificiales+de+flujo+subsuperficial+para+el+tratamiento+de+aguas+grises#0>
- [18] Hoja, F., Para, D. E. R., & Grado, T. D. E. (2012). *Universidad francisco de paula santander ocaña*. Universidad San Fransisco de Paula Santander Ocaña. Retrieved from <http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/handle/123456789/1349>
- [19] Janeth, I., & Siachoque, F. (2009). Estudio Del Comportamiento De Humedales Artificiales De Flujo Sub-Superficial En La Planta Experimental De Carrión De Los Cespedes, (Sevilla, Espana).
- [20] Justin, M. Z., & Zupančič, M. (2009). Combined purification and reuse of landfill leachate by constructed wetland and irrigation of grass and willows. *Desalination*, 246(1–3), 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.049>
- [21] Lara, A. J. (1999). Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, 122.

- [22] Madera-parra, C. A. (2016). Treatment of landfill leachate by polyculture constructed wetlands planted with native plants construidos sembrados con policultivos de plantas nativas, *192*(2), 183–192. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-30332016000200017&lng=es&nrm=?if
- [23] MIRONEL DE JESUS CORENA LUNA. (2013). Sistemas De Tratamientos Para Lixiviados Generados En Rellenos Sanitarios, *53*, 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [24] Mojiri, A., Ziyang, L., Tajuddin, R. M., Farraji, H., & Alifar, N. (2016). Co-treatment of landfill leachate and municipal wastewater using the ZELIAC/zeolite constructed wetland system. *Journal of Environmental Management*, *166*, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.020>
- [25] Mosquera, Y. N. (2012). Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte. *Revista Tumbaga*, *1*(7), 3–9. Retrieved from <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/377/314>
- [26] Nely, A., Verjel, A., Ramón, J. A., Lenin, J., & Valencia, R. (2015). a partir de un sistema experimental con humedales artificiales utilizando especies nativas Estimate of kinetic processes in the system of biological leachate treatment , from the landfill through an experimental system constructed wetlands using native sp. Retrieved from <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:9CR6niZIVtIJ:https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6041484.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>
- [27] Peña, E., Madera, C., Sanchez, J., & Medina, J. (2013). Biospecting of native plants for

their use in bioremediation process - *Heliconia psittacorum* case (HELICONIACEAE).
Revista Académica Colombiana de Ciencias, XXXVII(0370–3908), 469–481.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.29>

[28] RAMSAR, C. (2012). *Los humedales artificiales. Componentes y tipos*. Pamplona, España.

[29] Rocha Castro, E. (2000). Espectrometría de absorción atómica. *Facultad de Ciencias Químicas*, 123–203.

[30] Röben, E. (2002). *Servicio Alemán de Cooperación Social*. Obtenido de http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/fulltext/loja.pdf

[31] Sánchez, G. C., Camaño Silvestrini, N. E., Gonzalez, C. I., Pedro, M. C., Caffaratti, S. E., Hadad, H. R., & Maine, M. A. (2013). Rol de macrófitas en la remoción de contaminantes de un lixiviado de relleno sanitario utilizando un wetland construido subsuperficial, 1–10. Retrieved from http://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04_025/papers/07e/07e_1535_188.pdf

[32] SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES DE MÉXICO. (Octubre de 2009). MANUAL DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS SANITARIOS PARA RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) Y RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL (RME). Ciudad de México. Obtenido de http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/publicaciones_conagua/RESIDUOS%20PELIGROSOS/MANU-ESP-TEC2010.pdf

[33] Semana Sostenible. (2018). Basura a punto de explotar. *Semana*, 1.

- [34] Standard Methods Committee. (1997). 5220 CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD)* 5220 B . Open Reflux Method. *Compute*, (5000), 14–19.
- [35] Svensson, H., Ekstam, B., Marques, M., & Hogland, W. (2015). Removal of organic pollutants from oak leachate in pilot scale wetland systems: How efficient are aeration and vegetation treatments? *Water Research*, 84, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.07.017>
- [36] Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- [37] Vetivercolsas. (s.f.). *VETIVERCOL*. Obtenido de <http://www.vetivercolsas.com/pasto-vetiver>
- [38] Wang, M., Zhang, D. Q., Dong, J. W., & Tan, S. K. (2017). Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate — A review. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019>
- [39] Wittgren , H. B., & Maehlum, T. (1995). Wastewater treatment wetlands in cold climates. *Water Science and Technology*, 32.
- [40] Wojciechowska, E. (2017). Potential and limits of landfill leachate treatment in a multi-stage subsurface flow constructed wetland – Evaluation of organics and nitrogen removal. *Bioresource Technology*, 236, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.185>
- [41] Yalcuk, A., & Ugurlu, A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource Technology*.

- [42] Zamora, H. D., Freire, P. A., & Jurado, K. (2009). Biodegradabilidad de flujos de alimentación en humedales artificiales piloto para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario “Antanas.” *Unimar*, 52, 89–95.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>