

Evaluación de la efectividad en la recuperación de aguas contaminadas por hidrocarburos, mediante la técnica de Fitorremediación utilizando Pasto Vetiver

Claudia Lizeth Hernández Galván¹, Carlos Alberto Rodríguez Pérez², Ricardo Andrés Oviedo Celis³

¹Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, ²Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, ³Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, lhernandez@correo.uts.edu.co, crodriguez@correo.uts.edu.co, roviedo@correo.uts.edu.co,

Abstract– *El presente trabajo se basó en el estudio y evaluación de un tratamiento alternativo, para la reducción de la carga contaminante de las aguas residuales de producción, generadas en el Campo de Chichemene ubicado en la Región Oriental del país.*

La metodología utilizada se basó en fases, donde en la primera se realizó un diagnóstico del proceso de producción de hidrocarburos en un campo petrolero, en la segunda fase se investigó el estado de la técnica del proceso de fitorremediación de las aguas de producción, utilizando la técnica del pasto vetiver, en la tercera y última fase, se seleccionaron algunas alternativas de tratamiento que, junto con el cultivo piloto de vetiver, reducen la carga contaminante de las aguas de producción en un campo petrolero. Las actividades realizadas en el desarrollo de este trabajo, permitieron sintetizar los siguientes resultados: identificación de los componentes químicos que posee el agua de producción; El sistema de tratamiento del agua producida por la técnica del pasto vetiver, con el fin de reducir las cargas contaminantes en las aguas de producción en el Campo Chichemene.

Palabras claves: petróleo, vetiver, fitorremediación, contaminación, remoción, follaje, raíz, radicular.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales más alarmantes en la actualidad, es la contaminación de ecosistemas acuáticos; causada por actividades antrópicas como la explotación de hidrocarburos. Este proceso incluye la generación de residuos líquidos y sólidos desde las fases de extracción hasta la refinación.

En Colombia se presentan derrames de crudo, por accidentes en las actividades que comprenden el proceso de extracción, sumado a los problemas de seguridad que vive el país con los grupos al margen de la ley, que durante los últimos treinta años han ocasionado el vertido de cerca de dos millones de barriles de petróleo, todo esto ocasionando una alteración negativa en los diferentes recursos naturales,

presentes en los ecosistemas aledaños al lugar donde se presentó el derrame de crudo. [1]

Para extraer crudo es necesario aplicar las etapas que tiene la técnica, en primer lugar se localiza el yacimiento, luego se perfora el terreno cavando un pozo, y así llegar hasta el petróleo. Se debe instalar una torre metálica de 50 metros de altura para avanzar en la extracción del petróleo. Si no hay ningún problema, lo normal es que el oleoducto que se conecta a través del pozo permita la obtención de la materia para su tratamiento.

Una vez se ha conseguido la extracción, viene el proceso de eliminación de compuestos innecesarios, y que obstaculizan la formación del petróleo, por lo que hay que usar unas técnicas determinadas para ello, como la extracción mediante bombas de inyección de agua. En el proceso de extracción de crudo se generan residuos contaminantes a los diferentes recursos naturales, pero el presente estudio se concentra en el impacto generado sobre el recurso hídrico, especialmente en las aguas de producción las cuales vienen contaminadas con los compuestos que forman el petróleo.

Para ésta problemática se propone orientar ésta investigación al diseño de una alternativa de tratamiento con sistema vetiver, que permita conocer la efectividad en la aplicación de la técnica de Fitorremediación bioestimulada para la recuperación de aguas contaminadas por hidrocarburos.

II. ESTADO DEL ARTE

Durante el año 2006, se realiza un estudio de la factibilidad de las plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales, mediante la exposición de los diferentes procesos biológicos que se llevan a cabo, de igual manera concluyéndose la alta factibilidad y aplicabilidad que estas especies hidropónicas tienen para la captura y remoción de contaminantes en este tipo de aguas servidas. [2]

En el año 2013, se expone el tratamiento de aguas residuales mediante filtros e hidrosistemas naturales con pasto vetiver. En este escrito contiene información importante, sobre la implementación y construcción de humedales artificiales con

pasto vetiver, teniendo en cuenta diferentes aspectos y parámetros necesarios en todo este proceso, como la adecuación del terreno, siembra del pasto vetiver, cuidados, ventajas y funciones importantes de este proceso de fitorremediación para aguas contaminadas, es importante nombrar el avance que se generó en términos de identificación de los porcentajes de remoción de contaminantes en carga para este tratamiento. [3]

En el año 2016 se muestra alternativas para el diseño del sistema de tratamiento del agua de producción de Campo Escuela Colorado, conforme a la normatividad vigente para vertimiento en Colombia. Se muestra los impactos ambientales que generan las aguas de producción, al ser vertidas a un cuerpo hídrico o al alcantarillado sin un respectivo tratamiento de remoción de carga, también se describe la evolución que ha tenido la normatividad con referencia a este tema, por otra parte se identifican los tratamientos de descontaminación de aguas producidas, más utilizados en los campos petroleros como base para la formulación de programas que disminuyan la alteración que se está generando sobre el recurso agua y el medio ambiente que circunda. [4]

Este estudio se realiza con el apoyo de la Universidad Agrícola de Venezuela en el año 2017, acerca de las diferentes formas para el establecimiento de siembra de pasto vetiver en modalidad de viveros, a su vez enuncia el cuidado y los aspectos a tener en cuenta para llevar a feliz término el cultivo, también hace referencia a la necesidad de implementar estos tratamientos biológicos en la recuperación de aguas contaminadas en procesos industrial, basada en la efectividad del mismo y su fácil adaptación a las diferentes zonas de vida del planeta. [5]

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

El petróleo es la fuente de energía más importante en la actualidad; además es materia prima en numerosos procesos de la industria química. El origen del petróleo es similar al del carbón. En ambos casos, se hallan en las rocas sedimentarias, pero el petróleo procede de la descomposición de materia orgánica (especialmente restos de animales o grandes masas de plancton en un medio marino). Su explotación es un proceso costoso que sólo está al alcance de grandes empresas. Es un recurso fósil que se emplea como energía primaria; sustituyó al carbón que era la fuente principal de energía a finales del siglo XIX. El porcentaje respecto del total de la energía primaria consumida, en un país industrializado, ha ido aumentando desde principios de siglo hasta hace poco años. La crisis del petróleo, en 1973, motivada por la alarmante subida del precio del petróleo decretada por la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), ha estabilizado el consumo, consiguiendo incluso que varios países diversifiquen su dependencia energética y hagan descender las cifras de las

importaciones de petróleo. El petróleo es un líquido de color oscuro, aspecto aceitoso, olor fuerte y densidad comprendida entre 0'8 y 0'95. Está formado por una mezcla de hidrocarburos. [6]

Se forma en una gran roca denominada roca madre, esta se desplaza a una gran roca porosa o "roca reservorio", donde el recurso queda atrapado gracias a una capa impermeable, estos lugares donde queda atrapado el petróleo son llamadas trampas geológicas y éstas están determinadas por la característica de la tierra que puede tener formas diversas, tal como se observa en la figura:

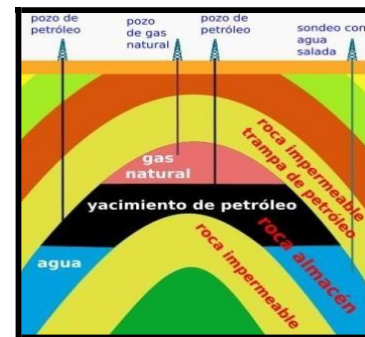


Fig. #1 Ubicación del petróleo en las capas del suelo [6]

A. *Tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales, provenientes del campo petrolífero en el proceso de producción de hidrocarburos.*

El agua de producción es el agua que sale asociada al petróleo o gas al momento de extraerlos desde el yacimiento hasta la superficie, ya sea desde una formación de interés (agua connata), un acuífero activo (agua intrusiva) o de un proyecto de reinyección (agua inyectada). De manera que estas aguas varían de pozo a pozo y tienden a aumentar a medida que pasa el tiempo. Y es frecuente encontrar contaminantes como lo son: sólidos suspendidos y disueltos, crudo residual y otros, que son particulares de cada formación.

Por lo tanto, se puede decir que en los yacimientos se hallan rocas que naturalmente están impregnadas de diferentes fluidos tales como: agua, aceite y gas. Del mismo modo, cuando se hace la extracción de los hidrocarburos, estos fluidos tienden a recolectarse en superficie y traen consigo cierta cantidad de agua que suele llamarse "agua de producción". [7]

Para determinar los componentes que posee cada agua específicamente se requiere de un análisis fisicoquímico. Además, es recomendable conocer e identificar cada constituyente presente en el agua asociada a la producción de hidrocarburos, con el objetivo de establecer el origen de los problemas más frecuentes en un sistema. Estos componentes del agua de producción provienen del contacto de éstas con los

minerales de formación, los compuestos hidrocarburos y los sólidos. Los cationes referencia a aquellos contaminantes sólidos que se encuentran disueltos cuyas cargas son positivas, y tienen tendencias a formar incrustaciones de escamas orgánicas.

Calcio (Ca^{2+}). El ion de calcio es uno de los principales componentes del agua de formación, el cual se libera del agua por medio de las rocas que contienen calcio, minerales de calcita y calizas. Este catión se une con los aniones sulfato, carbonato y bicarbonato para formar la precipitación de escamas inorgánicas.

Sodio (Na^+). El ion sodio tiende a estar asociado al ion cloruro para formar sales, que son los componentes más abundantes del agua de formación, que a determinadas condiciones de presión y temperatura pueden precipitarse para generar Cloruro de sodio.

Bario (Ba^{2+}). Es un metal pesado que en pequeñas cantidades tiende a ser tóxico para los seres humanos además de esto, si se combinan con los carbonatos o los sulfatos pueden precipitarse y formar escamas inorgánicas difícilmente solubles.

Magnesio (Mg^{2+}). Este ion junto con el Calcio son los responsables de la dureza del agua, en presencia de sulfatos y carbonatos tiende a formar sales, pero estas son más solubles y difíciles de precipitar, por ello permanecen en suspensión.

Hierro (Fe^{2+} , Fe^{3+}). La concentración de iones Hierro es muy baja en el agua de formación a menos de que haya corrosión de la tubería, este ion puede estar en forma disuelta férrica (Fe^{3+}) o ferrosa (Fe^{2+}), y puede estar en suspensión como precipitado de hierro.

Estroncio (Sr^{2+}). Es un metal pesado que, en combinación con sulfato, puede dar origen a escamas como sulfato de Estroncio el cual se encuentran precipitado junto con el sulfato de bario. Estas escamas son más solubles que las de Sulfato de Bario.

Cadmio (Cd^{2+}). Suele ser encontrado en la naturaleza en presencia del cinc, es soluble en agua, y su ingesta puede producir daños en el organismo del ser humano.

Los aniones son sustancias pertenecientes a la formación, que poseen cargas negativas y son los responsables de generar incrustaciones junto con los cationes.

Carbonato y Bicarbonato (CO_3^{2-} , HCO_3^-). Estos aniones influyen en la alcalinidad del agua, como se había mencionado con anterioridad los carbonatos tienden a precipitarse en presencia de Calcio y Bario formando escamas. Si el pH del agua es inferior a 8,3 es un indicio de que en ella no hay bicarbonato.

Sulfato (SO_4^{2-}). Este anión tiene tendencia a formar incrustaciones con el Bario altamente insolubles.

Cloruro (Cl^-). Es el anión más común del agua de formación, se caracteriza por formar el cloruro de sodio, la concentración de cloruros es utilizada para determinar la salinidad del agua, y

si las concentraciones son altas puede generar corrosión en la tubería. [8]

Dentro de otros componentes se encuentra:

- 1) *pH*, es la medida relativa de la alcalinidad o acidez de un agua, un pH alto (alcalino) permite determinar la tendencia incrustante del agua, y de lo contrario un pH bajo (ácido) puede ser un índice de que esta agua de formación es corrosiva.
- 2) *La Demanda bioquímica de oxígeno DBO* indica la presencia y biodegradabilidad del material orgánico, es una forma de estimar la cantidad de oxígeno que se requiere para estabilizar el carbono orgánico y de conocer la velocidad a la cual este material va a ser metabolizado por las bacterias que normalmente se encuentran presentes en las aguas de producción.
- 3) *La Demanda química de oxígeno DQO*, es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico independientemente de que este sea biodegradable o no biodegradable.
- 4) *Sólidos suspendidos totales*. Son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más pequeños (menos de 0.01 mm) no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables, y los más grandes (mayores de 0.01 mm) son generalmente sedimentables.
- 5) *Fenoles*. Son compuestos que presentan uno o más grupos hidroxilos (OH) unidos directamente a un anillo aromático, el cual puede ser perjudicial para el ser humano, durante la inhalación, la ingestión y su contacto con la piel.
- 6) *Amoniacal*. Es un gas altamente soluble en agua, se origina por la descomposición del nitrógeno orgánico en amoniacal, se caracteriza por presentar un pH alto lo cual lo hace responsable de la corrosión en las tuberías.
- 7) *Sólidos disueltos totales*. Son materia orgánica e inorgánica, no se pueden ver con mucha facilidad, no son sedimentables, causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos.

B. Pasto Vetiver

El pasto vetiver es una gramínea perenne que posee un sistema radicular masivo, profundo (2 a 3 m de crecimiento en un año); fuerte, su resistencia a la tracción es de 75 MPa, equivalente a 1/6 del acero blando, ello amarra el suelo, como se muestra en la figura 2. Su follaje es erecto, alto, abundante e igualmente fuerte; siendo capaz, cuando se establecen barreras con él, de soportar láminas de agua de inundación de hasta 80 cm y reducir su velocidad casi a cero, a la vez que retiene los sedimentos. Es una planta asexual, es decir, sus semillas no

son fértiles, y por ende no hay riesgo de que se convierta en maleza. Una vez establecido tolera condiciones extremas de sequías, inundaciones y quemas. [9]



Fig. #2 Pasto vetiver. [10]

El crecimiento de Pasto Vetiver, es más rápido en climas cálidos, mientras en climas fríos es un poco más lentos, pero su funcionamiento es el mismo. Su supervivencia está estipulada desde los -9°C a más de 45°C . La planta soporta sequías extremas, pero normalmente requiere un época de lluvias que dure por lo menos de 3 meses. La condición idónea es cuando las lluvias vienen regularmente durante el año, además requiere pleno sol para desarrollarse bien, se puede establecer y crecer adecuadamente en condiciones con 40% de sombra. El pasto vetiver prefiere los suelos magros arenosos profundos. Sin embargo, crece bien en un rango amplio de suelos. Puede crecer en pedregales, suelos ácidos con unidades de pH cercanas a 3 o alcalinos con unidades de pH cercanos a 11, aguanta niveles tóxicos de metales como aluminio, manganeso (550 ppm) y condiciones sódicas y lo salinas. Aguanta inundaciones por largos períodos, de 3 meses o más después de que está bien establecido. También crece bien en suelos pocos profundos.

Su sistema radicular masivo de raíces generalmente crece verticalmente y no compite con los cultivos adyacentes. En condiciones buenas, el sistema radical puede crecer hasta una profundidad de 5 m y bajo la superficie del suelo se forma una barrera en raíces que permite que los suelos se estabilicen debido al amarre que el pasto vetiver le 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, como se observa en la figura 3.



Fig. #3 Sistema radicular del pasto vetiver. [11]

Además, la planta no requiere de alta tecnología para ser utilizada en el tratamiento del agua, esto conllevó que fuera aceptada en el campo de la bioingeniería para descontaminar agua por derrame de crudo. El costo del sistema Vetiver en el tratamiento de aguas contaminadas cuesta una fracción en relación con la utilización métodos químicos y mecánicos, del mismo modo es un sistema orgánico y amigable con el medio ambiente y de fácil maniobrabilidad y consecución del material a utilizar. El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas. Sin embargo, teniendo en cuenta que la especie de pasto vetiver posee un sistema radicular que puede alcanzar entre 3 a 5 m de largo. Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados y la biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación. [7]

C. Procesos de control de la contaminación utilizando procesos de Biorremediación

Los problemas de contaminación en el ámbito local, nacional e internacional son parte de nuestra vida cotidiana; es preocupante la manera en cómo se han ido degradando los ecosistemas de nuestro planeta, y la capa superficial de la corteza terrestre no es la excepción. La actividad industrial ha ocasionado uno de los problemas más serios en materia de contaminación de suelos, donde el derrame de hidrocarburos derivados del petróleo ocupa uno de los primeros lugares.

En Colombia, y como consecuencia de varios siglos de actividad minera, la industria de la química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, han producido grandes cantidades de residuos peligrosos difíciles de cuantificar. Se sabe que, en 1999, de acuerdo a cifras publicadas por el INGEOMINAS, los sitios contaminados, aún en las estimaciones más conservadoras, ascendían a varios miles de lugares y éstos eran equivalentes a $25\,967\text{ km}^2$ de superficie de suelo degradado.

La actividad minera de la Región Pacífica y Orinoquía ocupa uno de los primeros lugares a nivel nacional. En 1998, inició con un programa de Auditoría Ambiental y como resultado de la misma se detectó suelo natural contaminado con hidrocarburos, cerca de 800 toneladas en la Orinoquía. Lo anterior debido al mantenimiento propio de la maquinaria y equipos manipulados en la extracción del petróleo. Para resolver este problema la empresa buscó asesoría para establecer una tecnología de remediación que fuera sencilla, flexible, de bajo costo y que permitiera alcanzar los niveles aceptables en la normatividad mexicana vigente. [8]

Existen numerosas tecnologías de remediación de suelos contaminados [9] se pueden agrupar en 3 tipos: a) biológicos (biorremediación, bioestimulación, fitorremediación, biolabranza, etc.), en donde las actividades metabólicas de ciertos organismos permiten la degradación, transformación o remoción de los contaminantes a productos metabólicos inocuos; b) fisicoquímicos (electrorremediación, lavado,

solidificación/estabilización, etc.), aquí se toma ventaja de las propiedades físicas y químicas de los contaminantes para destruir, separar o contener la contaminación; y c) térmicos (incineración, vitrificación, desorción térmica, etc.), en los cuales se utiliza calor para promover la volatilización, quemar, descomponer o inmovilizar los contaminantes en un suelo. [10]

La biorremediación puede emplear organismos autóctonos del sitio contaminado o de otros sitios (exógenos), puede realizarse in situ o ex situ, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo, solventes, explosivos, clorofenoles, pesticidas, conservadores de madera e hidrocarburos aromáticos policíclicos, en procesos aeróbicos y anaeróbicos. [11]

Además, se ha incursionado en el desarrollo de tecnologías emergentes e innovadoras tales como la fitorremediación, electrorremediación y electrobiorremediación, en donde si bien es cierto hoy en día la información es limitada, la investigación desarrollada respalda su uso y se encuentra cobrando auge [12]. Sin duda muchas son las alternativas reportadas como exitosas, pero para seleccionar la tecnología de remediación adecuada se debe tener en consideración: a) características del sitio, b) tipo de contaminante, concentración y características fisicoquímicas, c) propiedades fisicoquímicas y tipo de suelo a tratar y d) costo.

Teniendo en cuenta que los microorganismos son los agentes primarios de la degradación de contaminantes orgánicos en el suelo, una premisa es que al incrementar la densidad microbiana en un suelo contaminado, se puede también acelerar la degradación de los contaminantes orgánicos como los hidrocarburos. De acuerdo a lo anterior, el proceso más ampliamente usado es la biorremediación y la variable a controlar es la bioestimulación de los microorganismos nativos del suelo a través de la adición de nutrientes (fuente alterna). Tal aseveración está basada en el hecho de que la entrada de grandes cantidades de carbono (hidrocarburos) perturba el balance natural de nutrientes en el sistema ocasionando una rápida disminución de otros, como el nitrógeno y el fósforo, y con ello se reduce o detiene la tasa de crecimiento bacteriano. [13]

Como ya se mencionó, los lodos residuales contienen grandes concentraciones de nitrógeno inorgánico, fósforo y materia orgánica, lo que los hace ideales para estimular la actividad microbiana del suelo. Los lodos residuales pueden ser usados como fuente alterna de macro y micro nutrientes y al estimular la actividad microbiana se logrará una mayor degradación de los hidrocarburos presentes en el suelo, siempre y cuando la concentración de patógenos, metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos sea baja [14]. Dicha práctica resulta benéfica para el ambiente, dándole un uso a lo que comúnmente se ha venido manejando como un desecho.

La biorremediación es un proceso de mineralización, al que también se le conoce como composteo. Dicho proceso es usado para estabilizar los lodos residuales y del cual se obtiene el humus como producto, mismo que funge como mejorador de las características físicas de un suelo. Lo que resulta de la combinación de suelo con hidrocarburo y lodos residuales es un suelo mejorado en sus características físicas y sin el contaminante, apto para ser usado en cualquier actividad agrícola. [15].

Con base en dichos antecedentes y para resolver el problema de suelo contaminado de la mina, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar al proceso aeróbico de biorremediación como sistema de tratamiento, considerando para esto el uso de lodos residuales como fuente alterna de nutrientes.

D. Tipos de cargas contaminantes que se remueven con el sistema vetiver.

Al Pasto Vetiver se le ha señalado como una planta que puede eliminar diversas sustancias contaminantes de las aguas, entre ellos algunos macro nutrientes tales como el Nitrógeno, Fósforo y algunos metales pesados: Níquel, Cadmio, Plomo, Mercurio, Cianuro y recientemente Flúor, el cual se midió en raíces y área foliar para tratar aguas contaminadas con este halógeno. También se menciona como planta que puede absorber algunos cationes.

La utilización de Pasto Vetiver, es un método de bajo costo y muy eficiente para tratar aguas residuales domésticas e industriales. En investigaciones se ha demostrado que el pasto vetiver bajo condiciones hidropónicas es capaz de bajar el nitrógeno total de 100 mgL⁻¹ a 6 mgL⁻¹ (94 % de eficiencia); el fósforo total de 10 mgL⁻¹ a 1 mgL⁻¹ (90 %), Coliformes fecales ≥ 1.600 org /100 mL a 900 org /100 mL (44 %); E. Coli %, E. Coli de ≥ 1.600 org /100 mL a 140 org /100 mL (91 %); Oxígeno disuelto de < 1 mgL⁻¹ a 8 mgL⁻¹ (>800); conductividad eléctrica de 928 μ Scm⁻¹ a 468 μ Scm⁻¹; pH 7.3 a 6,0 y puede evapotranspirar 1,1 L/día/cuatro plantas/ tambor, todo esto con un tiempo de retención de cuatro días. [16]

Por otro lado, se demostró el potencial del pasto vetiver, el cual tiene una capacidad de producir hasta 132 t/ha/año de materia seca, biomasa, muy por encima de cualquier gramínea. Una capacidad potencial de exportar hasta 1.920 kg/ha/año de Nitrógeno y 198 kg/ha/año de Fósforo; pero puede crecer con suplencias hasta de 6.000 kg/ha/año nitrógeno combinado con una suplencia de 250 kg de fósforo/ha/año. Esto le comunica a esta planta unas extraordinarias capacidades para eliminar tales nutrientes de aguas contaminadas. Para utilizar este sistema se debe implementar un mecanismo de balsas flotantes a las cuales se les siembre la cantidad necesaria de plantas de vetiver, para que absorban mediante sus sistemas la mayor cantidad de compuestos

químicos que llevan las aguas residuales, y que entreguen a los causes de aguas naturales un líquido lo más altamente descontaminado, que en el proceso con pasto vetiver supera el 95%, según estudios comprobados en Venezuela, India, China, Australia, México y E.E.U.U. [17]

TABLA I
PARÁMETROS QUE REMUEVE EL SISTEMA VETIVER

Parámetro ^a	Porcentaje de Remoción (%) ^a
Turbidez ^a	90
DQO	98
DBO	96
Sólidos Suspendidos Totales	70
Sólidos Sedimentables	85
Grasas y Aceites	70-90
Metales Pesados	60-70
Fenoles	80
Compuestos Orgánicos Volátiles	50
Nitrógeno Total	90
E.Coli	90
Coliformes Totales	45

^a SCAVO. ET AL. 2005. ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COMPLEMENTARIO, CON PASTO VETIVER [18]

E. Factibilidad del sistema vetiver en la recuperación de aguas contaminadas en operaciones de extracción de petróleo.

La factibilidad o viabilidad que se identificó, una vez realizada la búsqueda de documentación bibliográfica, para el desarrollo e implementación del sistema mediante humedal artificial con la incorporación de la especie vegetal pasto vetiver, en la recuperación de aguas contaminadas en operaciones de extracción de petróleo, se resume en los siguientes aspectos:

- Las áreas* donde se establece un campo petrolífero, cuentan generalmente con grandes extensiones de terreno, por lo cual es viable la incorporación de un sistema artificial con pasto vetiver.
- Los lugares* donde se establecen campos petroleros, están ubicados generalmente en zonas de temperaturas altas, siendo este factor no incómodo para la germinación y desarrollo del pasto vetiver, pues este soporta variedad de climas.
- Es viable implementarlo pues disminuye la carga de Nitrógeno Total, Fósforo Total, Coliformes Fecales, Conductividad Eléctrica, pH, aumenta la presencia de Oxígeno Disuelto.

El Pasto Vetiver es un gran purificador de aguas contaminadas con el proceso de extracción de petróleo, logrando descontaminación de sustancias pesadas como Kriptón, Argón, Calcio, Magnesio, Plomo y Cadmio. [19]

Es prácticamente estéril y debido a que no produce estolones ni rizomas, no se convierte en maleza. Su corona se halla bajo la superficie, lo que la protege contra el fuego y el exceso de pastoreo. Sus hojas afiladas y sus raíces aromáticas repelen a los roedores, las serpientes y otras plagas similares. Sus hojas y raíces han demostrado ser resistentes a la mayoría de las enfermedades. Es tanto xerófila como hidrófila, una vez establecida puede resistir sequías inundaciones y prolongados periodos de anegamiento. Debido a que las raíces de vetiver poseen alto contenido aromático son usadas en la industria farmacéutica para la extracción de aceites esenciales y fabricación de perfumes. [20]

La biomasa de Pasto Vetiver, sus hojas y tallos son usadas en este momento como material de combustión para calderas en industrias papeleras y cementeras, que reducen el nivel de contaminación atmosférica, ya que las que se están usando en la actualidad, que son derivados del petróleo, ocasionan daños enormemente grandes a la atmósfera, reduciendo el nivel de oxígeno y aumentando la concentración de dióxido de carbono a la atmósfera. Es una planta perfectamente adaptada, de modo que aun cuando todas las demás plantas de los alrededores han sido destruidas por la sequía, las inundaciones, las plagas, las enfermedades u otras circunstancias adversas, el vetiver permanece en su lugar para proteger al suelo de las próximas lluvias. [21]

F. Descripción de alternativas planteadas para el sistema de Tratamiento de Aguas de Producción, adjuntos al cultivo piloto de Pasto Vetiver

1) *Laguna de almacenamiento.* La laguna consiste en el almacenamiento de aguas residuales durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y las condiciones climáticas, esta estructura es un método biológico natural de tratamiento, basada en el principio de autodepuración. El agua de producción que se genera en el proceso de extracción del petróleo, en un yacimiento o pozo, el cual está siendo operado en el campo petrolero, ingresa a una laguna o piscina de almacenamiento, como primer paso en el sistema de tratamiento. Para el diseño de la laguna se consideró el caudal promedio generado por un pozo petrolero ubicado en los llanos orientales del país (Ecopetrol S.A.), el agua de producción es obtenida en superficie a través de pozos de petróleo, el agua será succionada por medio de una bomba centrífuga de 220 V, y será transportada mediante una tubería de 0.1016 m.

El diseño de la laguna dependió de la carga superficial de la DBO, es decir la cantidad de este parámetro aplicada por unidad de área de superficie de la laguna por día. El área de la laguna facultativa se calculó con la ecuación (1):

$$A = \frac{Li \cdot Q \text{ diseño}}{CS \text{ diseño}} \quad (1)$$

Donde

A = Área de la profundidad de la laguna.

Li = DBO del afluente a la laguna.

Q diseño = Caudal de diseño de la laguna.

Cs = Carga Superficial de DBO de diseño de la laguna.

Para hallar la carga superficial de DBO se tuvo como base lo establecido por Matamoros (1997) para el diseño de lagunas, y se tendrá en cuenta los siguientes parámetros, según la ecuación (2):

$$CS = 357,4 \cdot 1,085^{T-20} \quad (2)$$

El tiempo de retención para la laguna de almacenamiento se calculó con la ecuación (3):

$$t = \frac{Ah}{Q \text{ diseño}} \quad (3)$$

Donde:

h = es la altura efectiva de líquido en la laguna, en teoría el valor de estará entre 1,50 y 2,50 m.

t = es el tiempo de retención hidráulica de la laguna.

Una vez revisado los cálculos, la laguna de almacenamiento tendrá las siguientes dimensiones:

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO: LAGUNA DE ALMACENAMIENTO

Parámetros de Diseño ^b	
Caudal	11.129 m ³ /d
Largo	121.4 m
Ancho	27,6 m
Profundidad	0.6 m
Área Superficial	3.350,5 m ²
Tiempo de retención	0,13 h
Tubería	0,1016 m
DBO del afluente	125 kg/d

FUENTE: ^bAUTORES

Por la mitad de la laguna transitara una tubería de 0.1016 m la cual posee gran cantidad de perforaciones por donde entra el agua de producción, esta es conducida por la acción de la bomba centrífuga al tanque de distribución. Esta piscina de almacenamiento está cubierta de una geomembrana para evitar filtraciones de aguas de producción, al subsuelo.

2) *Tanque de distribución.* El suministro de agua de producción al proceso de tratamiento, se realiza mediante el

tanque de distribución. El agua de producción es transportada por tubería de 0.1016 m al tanque de distribución. Se realizará la instalación de un tanque de 5 m³, de acuerdo a las indicaciones del fabricante, puesto que facilitan el proceso de depuración de las aguas residuales y es más sencillo de regular el caudal a tratar. Se le adaptaron las tuberías de conducción, purga y rebose. La purga del tanque se instaló de 0.0508 m. Las líneas de succión de las bombas periféricas, se introdujeron a una profundidad de manera que quedaran a 0.5 m desde el fondo garantizando que la succión de cada bomba no succione aire ni lodos, tal como se observa en la figura 4. Cada tubería de succión tiene uniones universales para hacer limpiezas en caso de taponamientos.

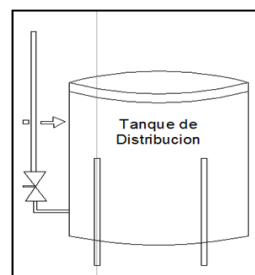


Fig. #4 Tanque de distribución.
Fuente. Autores - AutoCad 2019

3) *Humedal artificial con pasto vetiver.* Una vez el agua de producción que se encuentra en el tratamiento, sigue su recorrido mediante una tubería de 0.1016 m, y entra al humedal artificial compuesto por Pasto Vetiver. Los humedales artificiales son sistemas de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (no superan por lo general 1 m) plantados con vegetales propios de las zonas húmedas (especies endémicas) y en los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Esta tecnología es eficiente en la remoción, fácil operación, que no requiere de energía convencional, reduce el impacto sobre ambientes acuáticos por exceso de nutrientes, reduce impactos visuales y finalmente por su efectividad y limpieza en el tratamiento. La especie para establecer el humedal tienen un enraizamiento promedio superior a 0,60 m. Así que el espesor del lecho en su caso debe ser mínimo de 0,6 m. Estas especies originarias de la India se han adaptado plenamente en el territorio colombiano y son adecuadas para tratamiento de aguas industriales. Se escogen una profundidad del lecho de 60 cm, recomendada por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico en Colombia (RAS) para este tipo de humedales. La pendiente del lecho se basa en la topografía del lugar. La mayoría de los sistemas humedales Flujo Subsuperficial se diseñan con una pendiente del 1% o ligeramente superior. Para éste diseño se elige la

recomendación del RAS y otros autores, con pendiente de 2%. Además, recomienda que cuando se utilice grava como medio que carece de nutrientes, las semillas se planten en un medio fértil con el fin de evitar problemas posteriores. La conductividad del humedal nunca debe ser mayor que la del medio soporte.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE MEDIOS PARA HUMEDALES ARTIFICIALES^c

Tipo de medio	Tamaño efectivo D ₁₀ (m)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, (m ³ /m ² .d)
Arena gruesa	0,002	28-32	100-1.000
Arena gravosa	0,008	30-35	500-5.000
Grava fina	0,016	35-38	1.000-10.000
Grava media	0,032	36-40	10.000-50.000
Roca gruesa	0,128	38-45	50.000-250.000

FUENTE: ^cU.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY

Es recomendable que la conductividad hidráulica sea medida en el terreno antes del diseño final. Estas ecuaciones, así como los valores de la Tabla I, que muestra los parámetros que remueve el Pasto Vetiver, son útiles solamente para un diseño preliminar o para estimar un orden de magnitud. El diseño final de un humedal de Flujo Subsuperficial debe basarse en mediciones reales de los parámetros conductividad hidráulica y porosidad.

Cálculo de la temperatura de diseño [22]. Para conocer la temperatura de diseño se emplea la ecuación (4)

$$T = T_a + \frac{T_o - T_a}{3} \quad (4)$$

Donde:

T = temperatura de diseño, o C.

T_a = promedio temperatura aire durante la semana más fría del año, ° C.

T_o = temperatura del afluente durante la semana más fría del año, ° C.

$$T = 26\text{ °C} + \frac{29\text{ °C} - 26\text{ °C}}{3} ; \quad T = 27\text{ °C}$$

Calcular la constante cinética de primer orden. En humedales de flujo subsuperficial es frecuente utilizar la ecuación para reacciones de flujo pistón. Con esta se puede determinar el valor de la constante k.

$$K_t = k \theta^{T-20} \quad (5)$$

El valor de la corrección por temperatura θ , oscila entre 1,02 y 1,06 es común trabajar con 1,06.

$$K_{27} = K_{20} (1,06)^{27-20}$$

$$A_s = 5W^2$$

$$W = \sqrt{A_s / 5}$$

El valor de k_{20} para humedales de flujo subsuperficial es de 1,104 d⁻¹. Se aclara que estos valores varían según el tipo de agua y condiciones de operación. Por experiencias en varios diseños de humedales de flujo subsuperficial se ha establecido un valor k_{20} de 1,104 d⁻¹.

$$K_{27} = 1,104 \text{ d}^{-1} (1,06)^7$$

$$K_{27} = 1,66 \text{ d}^{-1}$$

a) Área superficial:

$$A_s = \frac{Q (\ln C_0 - \ln C_d)}{K_t (y) (n)} \quad (6)$$

Donde:

K_t = constante cinética de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹

y = profundidad del sistema, m

n = porosidad del humedal, fracción decimal.

$$A_s = \frac{11.129 \text{ m}^3/\text{d} (\ln 5 - \ln 1)}{1,66 \text{ d}^{-1} (0,6\text{m}) (0,36)}$$

$$A_s = 49.953,8 \text{ m}^2$$

$$A_s = 49.954 \text{ m}^2$$

b) Tiempo de retención (θ) :

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (7)$$

$$\theta = \frac{A_s * y * n}{Q}$$

$$\theta = 49.954 \text{ m}^2 * 0,6 \text{ m} * 0,36 / 11.129 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$(\theta) = 0,96 \text{ d}$$

$$(\theta) = 1 \text{ d}$$

Para consideraciones de flujo pistón se pueden tomar relaciones largo: ancho de 2:1, 3:1, 4:1 o 5:1. A continuación se elaboran las dimensiones con relaciones 5:1, se construirán 10 celdas de humedal. Por lo que el área calculada se divide entre 10. Esto arroja un área por humedal de 4.995 m² aproximadamente. Cabe destacar que el flujo que ingresa a cada celda es de 11.129 m³/d aproximadamente.

$$L = 5W \quad (8)$$

$$A_s = LW$$

$$A_s = 5WW$$

Al definir que las relaciones ancho: largo del humedal son de 1:5 se puede obtener el ancho W del humedal:

$$W = \sqrt{4.995 \text{ m}^2 / 5}$$

$$W = 31,61 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$L = 5W$$

$$L = 5 (31,61 \text{ m})$$

$$L = 158,05 \text{ m}$$

Se calcula el área transversal con la expresión siguiente:

$$A_c = W * y$$

$$(9) A_c = 31,61 * 0,6 \text{ m}$$

$$A_s = 18,966 \text{ m}^2 = 19 \text{ m}^2$$

Con éstas medidas se puede dimensionar cada celda humedal artificial, como se observa en la tabla IV:

TABLA IV
CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE MEDIOS PARA HUMEDALES ARTIFICIALES^c

Parámetro	Valor por celda de humedal
Profundidad (y)	0,6 m
Sección transversal (Ac)	19 m ²
Área superficial (As)	4996 m ²
Longitud (L)	158,05 m
Ancho (W)	31,61 m
Caudal (Q)	11.129 m ³ /d aproximadamente
Tiempo de retención (θ)	1 d
Pendiente (m)	2

FUENTE: AUTORES

A continuación, se observa la estructura en planta y corte del sistema vetiver, que se propone como fase en el sistema de tratamiento de aguas de producción en el campo Chichemene.

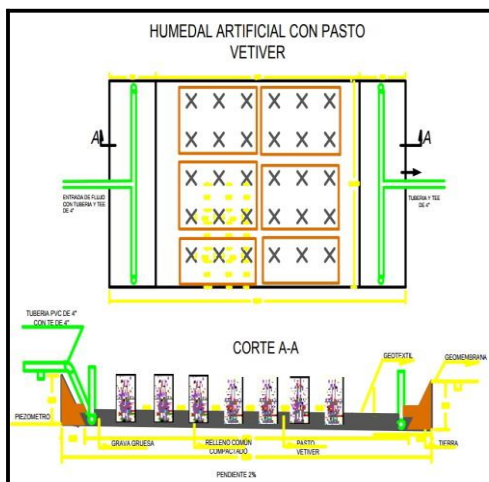


Fig. #5. Humedal artificial con Pasto Vetiver Fuente. Autores - AutoCad 2019

De acuerdo a los cálculos realizados para las dimensiones del humedal, se instalarán aproximadamente 300 plántulas de *Chrysopogon zizanioides*. Estas serán sembradas hidropónicamente por medio de módulos o balsas diseñadas para tal fin, los módulos ocuparán aproximadamente el 30% del espejo de agua. El humedal contará con un volumen de agua de producción aproximado de 7,2 m³ donde se espera que las plantas estén completamente adaptadas. [23]

A la salida de humedal se propone instalar llaves de jardín para tomar muestras, también contará con su respectivo tubo de purga. En esta propuesta quedan planteadas las dimensiones del humedal artificial de flujo subsuperficial con especies de Pasto Vetiver. Se resalta que un humedal de flujo subsuperficial necesita un sustrato y especies emergentes tal cual como el Pasto Vetiver.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se puede analizar que la biorremediación debe enfocarse en la gravedad de los problemas de contaminación, como la presencia de metales pesados, COV, PCBs, etc, que causan problemas de salud pública y degradación de los ecosistemas, se establece que se debe dar prioridad al tratamiento biológico y avanzado con el fin de disminuir la concentración de estos compuestos en las aguas residuales, suelo y aire. Se identifica claramente, en las diversas posiciones asumidas, que existe la necesidad de transferencia de tecnologías limpias a las industrias a escala local, regional y global, para el tratamiento de los medios que han sido contaminados por las actividades productivas sin ningún control. Contribuyendo en el corto, mediano o largo plazo, a la búsqueda del objetivo de desarrollo sustentable de reducir sustancialmente el número de muertes causadas por productos químicos peligrosos, la contaminación del agua y el suelo, incluso en las regiones más marginadas, que resultan ser las más afectadas por estas problemáticas, al aplicar tratamientos que, si bien no generan soluciones inmediatas, puedan contribuir a recuperar efectivamente los sitios contaminados. Cada vez más las consideraciones de sostenibilidad en la gestión ambiental se dirigen hacia el desarrollo tecnológico, que involucre la dimensión ambiental, social, económica, política y cultural, para definir los límites de lo aceptable. La aplicación de la biorremediación en la descontaminación de diversos medios afectados por las crecientes actividades productivas, abre nuevos espacios de intercambio público-privado a nivel científico, tecnológico y productivo. Se debe tener en cuenta que la investigación aplicada a la tecnología ambiental se enfrenta a problemas de falta de inversión (debido a que los precios de mercado no compensan de manera suficiente un adecuado cuidado del ambiente), lenta difusión, falta de capital de riesgo, aversión al mismo o burocracia [24].

Deben estar bien definidas, las herramientas y metodologías para la incorporación de consideraciones de sostenibilidad en el diseño de las operaciones de tratamiento y disposición final tanto de los contaminantes.

IV. CONCLUSIONES

La evolución de la Normatividad Ambiental Colombiana, en referencia al tratamiento y disposición final del agua de producción, en base a los Decretos 1594/1984, Decreto 3930/2010 y Resolución 0631/2015, ha sido muy positiva, teniendo en cuenta que los decretos iniciales no se nombraba específicamente este proceso, estableciéndose hoy en día los parámetros y los límites máximos permisibles de vertimiento a un cuerpo de agua o al alcantarillado; esto con el fin de mitigar los impactos ambientales generados sobre el recurso agua.

El proceso de extracción de hidrocarburos genera residuos líquidos identificados como las aguas de producción, estas son utilizadas para la separación del petróleo y el gas de las capas subsuperficiales del suelo, las cuales son nocivas para el ser humano y el medio ambiente, todo esto aludido a sus características carcinogénicas.

El pasto vetiver es una alternativa de solución muy probable para enfrentar la problemática de contaminación en aguas con compuestos derivados del petróleo, por su bajo costo, fácil manejo y promueve eficiencias de remoción de contaminantes del 44 al 98%. [25]

Como proceso adicional o pos-tratamiento al sistema definido para el tratamiento de las aguas de producción en el sector petrolero, se plantea un conjunto de alternativas que constituyen laguna de almacenamiento, tanque de distribución y humedales artificiales, con el fin de para mejorar las condiciones físico químicas del agua residual tratada y disminuir la carga contaminante del efluente que es vertido al suelo y/o a fuentes hídricas, esperándose una efectividad de remoción de más del 90 %.

Las alternativas seleccionadas para el tratamiento de aguas de producción en este Campo petrolero, permiten la remoción de grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos, DQO, DBO, Sales, Cloruros, Bario, plomo, Arsénico y Selenio, arrojando un rango de efectividad del 60% al 98%.

Se revisan los procesos de Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia, como una alternativa sostenible frente al deterioro progresivo de la calidad del medio ambiente por el derrame de hidrocarburos.

En la legislación ambiental en Colombia y en el mundo, todo residuo contaminado con hidrocarburos es considerado un residuo peligroso; por lo tanto, no puede ser dispuesto en suelo, aguas o incinerado a cielo abierto, lo que ha motivado a empresas del país en el mundo a implementar procesos de tratamiento de lodos contaminados. [26]

En Colombia las empresas petroleras, han venido implementando la biorremediación de lodos contaminados con hidrocarburos como alternativas, para el manejo de residuos resultantes de los derrames que se presentan en las actividades de explotación, refinación, transporte y distribución del producto.

Estas prácticas deben ser consideradas sustentables por su fácil implementación, por los bajos costos que generan la operación y aplicación del proceso y por el beneficio para el medio ambiente. Entre los impactos positivos que estas prácticas han generado, se puede considerar las siguientes: solución a la problemática de generación de lodos contaminados con hidrocarburos, alternativas de disposición final de los mismos sin afectar los recursos suelo, agua y aire, el bajo costo en la operación y experiencia técnica de desarrollo sostenible que puede continuar implementándose en empresas similares donde se presenten este tipo de residuos peligrosos.

REFERENCIAS

- [1] Kraus R 2010. Petróleo: Prospección y perforación, <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/nciclopediaOIT/tomo3/75.pdf>
- [2] Frers, C. (2006). El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. p. 1-10.
- [3] Daza R (2013) Tratamiento de aguas residuales mediante filtros e hidrosistemas naturales con pasto vetiver. http://www.vetiver.org/COL_TRATAMIENTO%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20MEDIANTE%20FILTROS.pdf.
- [4] Patino, S y Prada, P. (2016). Alternativas para el diseño del sistema de tratamiento del agua de producción de campo escuela colorado conforme a la normatividad vigente para vertimiento en Colombia. p. 65-80.
- [5] Andrade, Onelia. (2017). El pasto vetiver: instalación y manejo de viveros. Universidad Agrícola [En línea]. <http://universidadagricola.com/vetiver-instalacion-manejo-viveros>

REFERENCIAS

- [6] Pacheco, E; Villegas, M; Pérez, M; Corral, V. (2012). El Petróleo. [En línea] <http://platea.pntic.mec.es/~rmartini/petroleo.htm>
- [7] Hirschfeldt, Marcelo. (2015). El manejo del agua producida en la industria petrolera Argentina, *Jornal of Oil Production Consulting*.
- [8] SEMARNAT (2003). Norma Oficial NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. 29 de Marzo de 2005.
- [9] Volke T. y Velasco J. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología, México, 64 pp.
- [10] Dragun J. y Barkach J.H. (2000). Overview: Fate of Petroleum in Soil systems. En: *Assessment and remediation of oil contaminated soils*. Arab School on Science and Technology. State of Kuwait. 18-22 March 1995. Amherst, MA: Amherst Scientific Publications.
- [11] Gurrola-Nevárez B.A. (2008). Tratamiento de un suelo de la industria minera contaminado con hidrocarburos, empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes: Biorremediación a nivel piloto. Tesis de Maestría. Departamento de Ingenierías Química y Bioquímica. Instituto Tecnológico de Durango. Durango, México, 151 pp.
- [12] De la Rosa-Pérez D.A., Teutli-León M.M.M. y Ramírez-Islas M.E. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 23, 129-138.
- [13] Lee S.H., Lee S., Kim D.Y. y Kim J.G. (2007). Degradation characteristics of waste lubricants under different nutrient conditions. *J. Hazard. Mater.* 143, 65-72.
- [14] Rivera-Espinoza Y. y Dendooven L. (2004). Dynamics of carbon, nitrogen and hydrocarbons in diesel-contaminated soil amended with biosolids and maize. *Chemosphere* 54, 379-386.
- [15] Osorio-Rodríguez A.L. (2010). Biorremediación a nivel piloto de un suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo empleando lodos compostados como fuente alterna de nutrientes. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingenierías Química y Bioquímica. Instituto Tecnológico de Durango.
- [16] Vianna, Javier. (2009). Guía para la disposición y el tratamiento de agua producida, Asociación regional de empresas de petróleo y gas natural en Latinoamérica y el Caribe (ARPEL)
- [17] Hengchaovanich, D. & Nilaweera, N. (2012). An assessment of strength properties of vetiver grass sods. In relation to slope stabilization. *Proceedings of the first international conference of vetiver*. Office of the Royal Development project board, Bangkok
- [18] Tratamiento de aguas residuales con Pasto Vetiver. (2015). [En línea] <https://es.slideshare.net/julioestrada/tratamiento-de-aguas-residuales-con-vetiver>
- [19] Delgadillo, O.; Camacho, A.; Pérez, L.; Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Bolivia. Serie Técnica.
- [20] Marín, Loaiza (2016) rehabilitación de suelos degradados con *Chrysopogon Zizanioides*
- [21] SCAVO, Mónica. et al. (2005) Estudio de un sistema de tratamiento de aguas residuales complementario, con Pasto vetiver (*Vetiveria zizanioides* L.), provenientes de una planta de producción de gaseosas, en villa de cura, Estado Aragua". p. 6-9.
- [22] Sanabria, O. (2012). Humedales Artificiales de Alta Tasa - HAATReactores de flujo horizontal subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales.
- [23] Romero. Rojas J.A. (2011) Tratamiento de Aguas Residuales. Editorial Escuela Colombiana de Ingenieros, Tercera Edición.
- [24] Di Paola, M. Vicen C. Biorremediación: vinculaciones entre investigaciones, desarrollo y legislación. Argentina: CEURT-CONICET 2010.
- [25] Guemini-Schenberg AC. Biotechnology and sustainable development, study advanced 2010; 24 (April 2008).
- [26] World Health Organization Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Geneve: WHO; 2016.