

**APLICACIÓN DE BARRERAS REACTIVAS PERMEABLES PARA LA
ELIMINACION DE HIDROCARBUROS EN SUELOS CONTAMINADOS**

MERLY SOLANYI UMBACIA SOTO

**UNIVERSIDAD EAN
ESPECIALIZACION EN GESTIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS
BOGOTA
2014**

INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

APLICACIÓN DE BARRERAS REACTIVAS PERMEABLES PARA LA ELIMINACION DE
HIDROCARBUROS EN SUELOS CONTAMINADOS

MERLY SOLANYI UMBACIA SOTO

DIRECTORES

ING. JOSE VILLASEÑOR CAMACHO
Universidad de Castilla - la Mancha UCLM

ING. MSc. JOSE ALEJANDRO MARTINEZ
Universidad EAN

UNIVERSIDAD EAN
ESPECIALIZACION EN GESTIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS
BOGOTA
2014

AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde estén o si alguna vez llegan a leer esta dedicatoria quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado, sus bendiciones y por todo el apoyo que me han dado en esta nueva etapa de mi vida.

CONTENIDO

INTRODUCCION	6
1. OBJETIVOS	8
1.1. <i>Objetivo General</i>	8
1.2. Objetivos Específicos	8
2. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN	9
3. ESTADO DE LA APLICACIÓN REAL	12
4. MARCO TEÓRICO	14
4.1. BIORREMEDIACION	14
4.2. <i>BARRERAS REACTIVAS PERMEABLES</i>	14
4.2.1. Determinación del tiempo de residencia en las BRP	15
4.3. TIPOS DE BARRERAS Y MATERIAL	15
4.3.2. Métodos Utilizados en las BRP	17
4.4. <i>CONSTRUCCIÓN DE BARRERAS REACTIVAS</i>	20
4.5. <i>INSTALACIONES DE LAS BARRERAS REACTIVAS</i>	22
4.6. CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN	24
4.7. VENTAJAS E INCONVENIENTES	25
5. EVALUACION DE LOS COSTOS	27
CONCLUSIONES	30
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Número de publicaciones relacionadas con el hierro metálico y desarrollo BRP y aplicación desde 1964. (Adaptado de la base de datos de referencias hierro mantenido Instituto Universitario de Oregon.: Http://cgr.es.ee.edu/ironrefs/).....	9
Figura 2: Perfil de una biobarrera reactiva impermeable. Fuente EPA (1996).....	15
Figura 3 Tipos de material reactivo utilizados en las técnicas de las biobarreras. Fuente: tesis Sistemas de tratamiento pasivo de paredes para tratar aguas subterráneas contaminadas.....	17
Figura 4 Métodos utilizados en la BRP, Fuente: Artículo Recuperación de Suelos contaminados mediante biobarreras, Junio 99.....	19
Figura 5. Esquema básico del proceso de electro remediación, las especies ionicas migran por la acción del campo eléctrico. El frente acido se forma en el anodo y migra hacia el catado. Fuente: Electroremediación de suelos contaminados, artículo científico.....	20
Figura 6. Ilustración del concepto de embudo y puerta. Fuente: Geotechnical techniques for the construction of reactive barriers,Journal of hazardous materials, Artículo científico.....	22
Figura 7 Grafica comparativa de costos BRP versus bombeo y tratamiento, fuente (evaluación a escala laboratorio de proceso de eliminación de hidrocarburos aromáticos).....	28
Figura 8. Costos por unidad de las BRP, Fuente: Guía del ciudadano para las Barreras Reactivas Permeables	29

RESUMEN

Uno de los sistemas de tratamiento para la recuperación de suelos y aguas subterráneas contaminados es la instalación de barreras permeables reactivas (BRP) en el subsuelo, la cual consiste en paredes que se construyen bajo la superficie del terreno para eliminar la contaminación de las aguas subterráneas. Son permeables porque dejan pasar el agua a través de los poros, mientras que los materiales adsorbentes de la barrera atrapan las sustancias químicas reduciendo su movilidad y toxicidad, estas barreras se ha considerado como una técnica de remediación in situ, la cual se ha convertido en una técnica innovadora y llamativa ya que promete ser una alternativa viable y económica.

Este trabajo tiene como objetivo conocer más a fondo la aplicación que tiene estas barreras para la descontaminación de suelos impactados con hidrocarburos, así mismo las ventajas, costos y el estado actual en que se encuentra su aplicación.

ABSTRACT

One-treatment systems for the recovery of contaminated soil and groundwater is the installation of permeable reactive barriers (BRP) in the basement, which consists of walls that were make under the ground surface to eliminate contamination of groundwater. Are permeable because let water pass through the pores, while the adsorbent material of the barrier trapping chemicals reducing its mobility and toxicity, these barriers have been considered as an in situ remediation technique, which has become innovative technology and attractive as it promises to be an affordable alternative.

This work aims to learn in deep the application with these barriers impacted soil decontamination also the benefits, costs and the current state found its application.

INTRODUCCION

Las tecnologías convencionales para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas como el bombeo y posterior tratamiento tienen grandes inconvenientes debido a su elevado costo, especialmente cuando se trata de tratamientos prolongados, y resulta difícil disminuir la concentración de los contaminantes hasta los niveles máximos permitidos. En consecuencia, se están desarrollando nuevas tecnologías in-situ entre estas las barreras reactivas permeables, las cuales han despertado un gran interés debido a su bajo costo y eficiencia.

Después de múltiples investigaciones, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, (EPA, por sus siglas en inglés), en la década del 90 propone el uso de las barreras reactivas permeables como una alternativa viable para la remediación de las aguas subterráneas contaminadas con sustancias precedentes de diferentes orígenes, debido a que su implementación resulta menos invasiva, de menor costo de instalación y funcionamiento en comparación con otros métodos de remediación, además de ser amigable con el medio ambiente, entre sus principales características. Sin embargo, para la puesta en práctica de esta tecnología, es indispensable la realización de estudios y pruebas, en primer lugar, a escala de laboratorio para identificar el o los materiales de relleno que puedan ser utilizados como relleno, constituyéndose así, en el principal componente para la instalación y funcionamiento de las barreras reactivas permeables, (EPA, 1996)¹

Una barrera biológica activada (BRP) in situ es una zona local en un medio poroso natural que presenta una mayor actividad para la biodegradación de compuestos orgánicos peligrosos al tiempo que una alta capacidad de inmovilización y retención de los contaminantes, los contaminantes son eliminados del agua subterránea a medida que ésta fluye a través de la pantalla (remediación), bajo la influencia del gradiente hidráulico natural. De esta forma, los suelos, acuíferos y otros posibles receptores a favor de gradiente están protegidos de los contaminantes. Las barreras biológicas se basan en procesos completamente biológicos o en una combinación de procesos biológicos y físico-químicos

¹ Evaluación de tres materiales a escala de laboratorio para ser utilizado como material de relleno en barreras reactivas permeables, 2010. Chile.

Las BRP actualmente se están utilizando para tratar una amplia variedad de contaminantes que afecta el agua subterránea, incluyendo cloro disolventes, compuestos orgánicos, metales y compuestos inorgánicos.

Una de las ventajas de las BRP es el bajo costo en relación con otras tecnologías de remediación, así mismo por su eficacia y por la no alteración al medio ambiente la cual la convierte en toda una nueva clase de tecnología de remediación.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Conocer la tecnología de las barreras reactivas permeables para su uso en tratamientos in-situ de suelos contaminados con hidrocarburos.

1.2. Objetivos Específicos

- Conocer los medios reactivos utilizados para la generación de barreras reactivas permeables.
- Determinar las ventajas y desventajas que tiene esta nueva tecnología de remediación en relación con las tecnologías ya existentes.
- Establecer los diferentes tipos de barreras reactivas permeables existentes.
- Conocer el estado en el que se encuentra el proceso de investigación de las barreras reactivas permeables en relación con el tratamiento in- situ de suelos contaminados con hidrocarburos.

2. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN

En los últimos 5 años, ha habido una explosión de actividad dirigida al desarrollo y la aplicación de Barreras Reactivas Permeables (BRP). La cual es refleja en la Figura 1, que muestra un fuerte aumento reciente en el número de publicaciones relacionadas con las aguas subterráneas limpiadas con biobarreras.

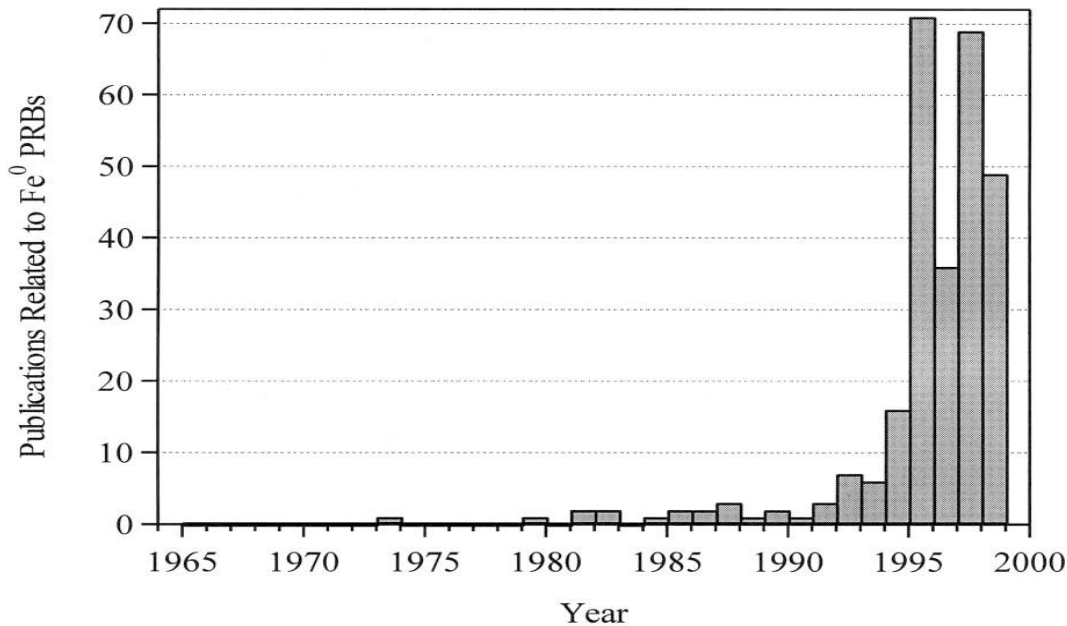


Figura 1 Número de publicaciones relacionadas con el hierro metálico y desarrollo BRP y aplicación desde 1964. (Adaptado de la base de datos de referencias hierro mantenido Instituto Universitario de Oregon: [Http://cgr.ese.ogi.edu/ironrefs/](http://cgr.ese.ogi.edu/ironrefs/))

El fuerte aumento del interés en las BRP fue durante la década de 1990, Más de 20 barreras reactivas se han instalado en Norte Estados Unidos desde 1994 a 1997, y aproximadamente la misma cantidad en 1998. Se han desarrollado varias revisiones y críticas acerca de las tecnologías de BRP las cuales se han publicado recientemente; éstas críticas se han centrado básicamente en el diseño y ejecución de las BRP.

En 1997 varias publicaciones revisaron el estado de la tecnología de barrera reactiva permeable y se identificaron 124 proyectos que ya están utilizando o planeando instalar las biobarreras reactivas, los cuales maneja principalmente los grupos de contaminantes como son: compuestos alifáticos (54%) halogenados, metales pesados (30%), y radionúclidos (12%). Por otra

parte los contaminantes inorgánicos típicos son tratados también por las BRP como son el cromo, plomo, molibdeno, el arsénico, el cadmio. La mayoría de los estos proyectos de BRP se encuentran todavía en la fase de laboratorio el cual constituye un (58%), y las aplicaciones comerciales representan sólo el 16%, el hierro es el medio más frecuentemente utilizado, que representa aproximadamente el 45% de la implementación de las BRP, sin embargo, hay una amplia variedad de otros materiales distinto al metal de hierro que han sido valuado para su uso en las tecnologías de barrera reactiva ²

Por otra parte, a través de los diferentes medios de búsqueda como Google científico, Scopus- document, Science Direct, Scirus for scientific information only, Jstor y Ebsco host, se encontraron diferentes artículos científicos los cuales trataban acerca de la aplicación de las biobarreras, excepto en la base científica de Scirus for scientific information only, en donde se encontraron tres artículos científicos los cuales traban acerca de aplicación de las barreras permeables reactivas para descontaminar suelos con metales pesados, la mayor parte de los estudios publicados contiene información acerca de las pruebas y la aplicación a diferentes escalas como (laboratorio, piloto y escala completa), cada uno señalaban buenos resultados en términos de eficiencia y eliminación de contaminantes, sin embargo también se señalaba que debería implementarse el diseño de un sistema de remediación competente.

Por otra parte a través de la base de datos Scirus for scientific information only, se identificaron tres investigadores que maneja actualmente estudios de laboratorio con barreras reactivas impermeables para la eliminación de metales pesados, estas investigaciones dan como resultado que el carbón orgánico el cual es un reactivo para las barreras reactivas permeables puede ser eficaz para el tratamiento de agua subterránea contaminada por un conjunto de metales disueltos incluyendo Ni, Pb, hidrocarburos, Co y Zn, otro de los resultados que se obtiene es la capacidad que tienes la barrera para seguir eliminando los metales en un futuro el cual dependerá de la función del tiempo - reactividad la cual será determinado por el monitoreo a largo plazo en el lugar del evento.

² Michelle M (2010). Schere, *Critical Reviews in environmental science and technology*, 364-366.

En relación con las técnicas construcción de las biobarreras, la que más presenta eficacia es la técnica del embudo y la puerta, esto debido a las investigaciones efectuadas en donde se demuestra que el sistema de puerta ha sido eficaz en el tratamiento de hidrocarburos de petróleo en el agua subterránea a poco profunda en el sitio.

Por otra parte se han efectuado estudios utilizando como medio reactor *Trichoderma longibrachiatum* y esponja de nylon para la eliminación de hidrocarburos aromáticos policíclicos, como resultado a esta investigación se creó un hongo el cual formo una gran cantidad de biopelícula fuertemente adhesiva entre esponja de nylon. Después, la capacidad del medio de biorreactivo desarrollada fue probada para remediar hidrocarburos en medio acuoso y en el suelo. En medio acuoso, un 90% de reducción de la concentración de hidrocarburo fue observada después de 14 d. Sin embargo, la eliminación de contaminantes en el suelo anterior requiere la colonización de hongos y el nivel alcanzado fue de alrededor de 70% después de 28 d, se concluye que los BRP con el *T. longibrachiatum* soportados sobre una esponja de nylon pueden ser un método eficaz para el tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos.

Por último y de acuerdo a las investigaciones publicadas se dice que las técnicas de las BRP están avanzando rápidamente, ya que el método de tratamiento gana popularidad como una alternativa a los sistemas de bombeo y tratamiento. De hecho, las barreras permeables se han convertido en toda una nueva clase de tecnologías y actualmente se está estudiando aplicar las BRP en los contaminantes tales como disolventes, metales y radionúclidos.

3. ESTADO DE LA APLICACIÓN REAL

Desde 1987 en los Estados Unidos de Norteamérica (EUA) se han aplicado técnicas de electroremediación a nivel comercial para restaurar suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos (residuos peligrosos y radioactivos, metales, solventes, entre otros), así mismo se han realizado demostraciones a nivel piloto y de campo para determinar la efectividad de la técnica (USEPA 1995, 1997). Actualmente, en los EUA y en Europa existen compañías que ofrecen la remediación electrocinética dentro de su portafolio de tecnologías. Dentro de estas compañías de servicio de remediación de suelos contaminados se encuentran Electrokinetics Inc, Geokinetics International Inc. y Battelle Memorial Institute, entre otros. De estas compañías Geokinetics Internacional reporta (USEPA 1997) que ha efectuado proyectos de remediación de sitios contaminados utilizando la electroremediación como base tecnológica, la totalidad de los proyectos está orientada a la remediación de sitios contaminados con metales. En los siguientes ejemplos se muestra el potencial de la tecnología de electroremediación para remover diversos tipos de contaminantes:

- En 1995 Geokinetics International Inc. Reportó la remediación de un sitio de 213 m² y 1 m de profundidad, contaminado con Cd, Cu, Ni, Pb, y Zn, en 18 meses de electroremediación, obteniendo eficiencias diferenciadas para cada elemento (desde 75 % para el cobre hasta 99 % para el plomo) con un costo desde 300 hasta 500 dólares por yarda cúbica (USEPA 1995).
- En 1996 se realizó una demostración de extracción de plomo de un campo de pruebas balísticas de la armada norteamericana. Los resultados mostraron una disminución del nivel de contaminación de 4500 mg/Kg a menos de 300 mg/Kg de plomo en 30 semanas de operación (USAEC 1997).
- En 1997 la empresa Environmental & Technology Services reportó la remediación de un sitio de 3700 m² y 21 m de profundidad, contaminado con compuestos orgánicos volátiles, BTEX e

hidrocarburos totales derivados del petróleo, en 12 meses. Se obtuvieron eficiencias mayores al 90 % con un costo entre 17 y 50 dólares por tonelada de suelo (Loo y Chilingar 1997).³

Uno caso real de la implementación de biobarreras se presentó en Nueva Jersey en donde se instalaron dos paredes, las cuales contenían hierro granular de tratamiento 5 a 15 m por debajo de la subfase del suelo. La primera pared era de 46 m de longitud y una segunda pared colocada aguas abajo de los primeros fue 27 m de longitud. El segundo muro tenía por objeto permitir una mayor concentración de COV en el medio de la pluma para degradar y para proporcionar un tiempo de residencia adicional. Los resultados preliminares de este proyecto indican que el método tuvo éxito.

Las BRP (Barreras reactivas permeables) han sido instaladas en más de 130 sitios en EE.UU., Canadá, Europa, Japón y Australia. Estas BRP han sido instaladas en antiguas bases militares, como parte de la reconstrucción en sitios sin actividad productiva; en varias industrias en funcionamiento; en antiguos lugares de tintorería, y rellenos sanitarios.

Por último la técnica de la aplicación de las BRP han sido aplicada en Colombia en dos estaciones de servicio a las cuales se les fueron instaladas un sistema de tratamiento pasivo de paredes a las cuales se le aplicaron microorganismo existentes en el suelo agrícola, dando como resultado una disminución de las concentraciones del diesel en el agua subterránea.

³ David A. (2007). Electroremedición de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo, 135,136.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. BIORREMEDIACION

El término biorremediación fue acuñado a principios de la década de los '80. Los científicos observaron que era posible aplicar estrategias de remediación que fuesen biológicas, basadas en la capacidad de los microorganismos de realizar procesos degradativos, así mismo la biorremediación tiene como propósito reducir o controlar los riesgos al medio ambiente en los sitios que han sido contaminados, mediante procesos de degradación químicos, físicos o biológicos. Las primeras observaciones de biorremediación fueron con el petróleo, después de algunos organoclorados y organofosforados; “se advirtió que los microorganismos no sólo eran patógenos, sino que además eran capaces de absorber compuestos orgánicos, algunos naturales, otros sintéticos, y degradarlos, lo que constituye el objetivo de la biorremediación”. De ahí surge una de las alternativa de promover la eliminación de contaminación orgánicos a través de las biobarreras o barreras biológicas *in situ*, las cuales constituyen una de las tecnologías de descontaminación del agua subterránea y suelo, agrupadas bajo la denominación de *muros o barreras de tratamiento/permeables/ reactivas o BRP*, según sus siglas en inglés, orientada al aislamiento y a la recuperación de emplazamientos contaminados.

4.2. BARRERAS REACTIVAS PERMEABLES

Una barrera biológica activada *in situ* es una zona local en un medio poroso natural que presenta una mayor actividad para la biodegradación de compuestos orgánicos peligrosos al tiempo que una alta capacidad de inmovilización y retención de los contaminantes. Por tanto, los contaminantes son eliminados del agua subterránea a medida que ésta fluye a través de la pantalla (remediación), bajo la influencia del gradiente hidráulico natural. De esta forma, los suelos, acuíferos y otros posibles receptores a favor de gradiente están protegidos de los contaminantes. Las barreras biológicas se basan en procesos completamente biológicos o en una combinación de procesos biológicos y físico-químicos. En el proceso de formación de una barrera biológica se inyectan en el

material portador células y una solución nutritiva gracias a la cual crecen, se reproducen y forman un *biofilm* que es el responsable de los procesos biológicos y físico-químicos producidos en la biobarrera. Las biobarreras pueden ser utilizadas simplemente como sistemas de contención en acuíferos porosos para reducir el flujo de agua contaminada a través de dichos materiales, o para inmovilizar compuestos tóxicos y peligrosos (metales, compuestos orgánicos) al interaccionar éstos con el *biofilm*.

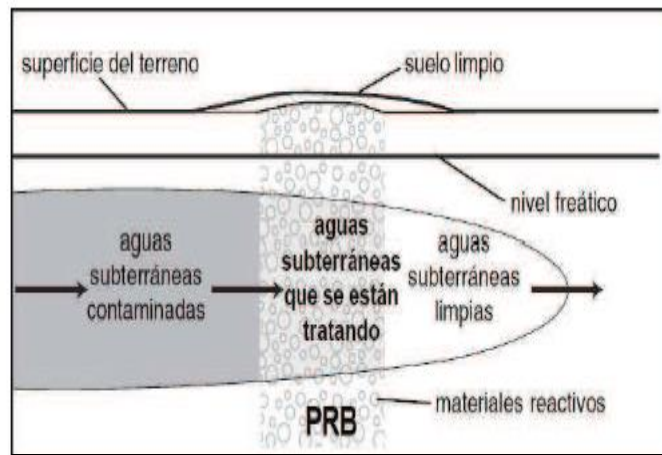


Figura 2: Perfil de una biobarrera reactiva impermeable. Fuente EPA (1996)

4.2.1. Determinación del tiempo de residencia en las BRP

Los tiempos de residencia requeridos para conseguir los niveles de contaminación deseados pueden ser determinados a partir del tiempo de vida media de la degradación, y la concentración inicial de contaminante.

4.3. TIPOS DE BARRERAS Y MATERIAL

La tecnología de las biobarreras es un método de remediación que emplea tratamientos físicos, químicos o biológicos in-situ usando medios reactivos o adsorbentes como se observa en la figura 3. La selección del medio reactivo se basa en el tipo y concentración de los contaminantes de las

aguas subterráneas, las velocidades de las aguas, la calidad de los parámetros del agua y los mecanismos de reacción para eliminar los contaminantes.

4.3.1. Materiales Reactivos en la Utilización de las BRP

a. Carbón Activado

El carbón activado es un material químicamente estable y ampliamente considerada como adsorbente adecuado para in situ o fuera del sitio tratamiento de aguas subterráneas contaminadas, este material presenta una alta capacidad de adsorción para muchos orgánicos e inorgánicos contaminantes en gran parte debido a su alta área superficial (sobre 1000 m² / g) y la presencia de diferentes tipos de superficie grupos funcionales (hidroxilo, carbonilo, lactona, carboxílico ácidos, etc), en forma granular, el carbón activado parece ser altamente adecuado para su uso en barreras permeables⁴, gracias a la absorción del contaminante por este material ha permitido de que este material repetidamente en la técnica de las BRP.

b. Zeolita

Las zeolitas son aluminosilicatos con tectosilicatos tridimensionales estructura que contiene moléculas de agua, alcalinos y metales de tierras alcalinas en su marco estructural, estos minerales tienen intercambio iónico muy alto, adsorción, catalítico, capacidades de tamizado molecular y los hacen potencialmente útiles como mineral de tratamiento para su uso en los BRP, una zeolita natural, es un material potencial para remediación de soluciones acuosas, ya que demuestra el fuerte afinidad por varios metales pesados tóxicos y puede selectivamente adsorber, un gente tensoactivo con zeolita ha sido probado para eliminar simultáneamente agente orgánica y especies inorgánicas⁵.

⁴ R. Thiruvengkatacharin. (2007) Permeable reactive barrier form groundwater remediation, 150.

⁵ R. Thiruvengkatacharin. (2007) Permeable reactive barrier form groundwater remediation, 150

Medio Reactivo	% de aplicación
Hierro cero valente	45
Sulfuro de hidrógeno	2
Oxihidróxido férrico	4
Fijación geoquímica	5
Silicatos de surfactantes modificados	2
Fe cero valente y materiales sulfurosos	2
Cal	5
Aserrín	2
Zeolitas	6
Microorganismos	2
Turba	6
Molusco Fossilizados	2
Otros	17

Figura 3 Tipos de material reactivo utilizados en las técnicas de las biobarreras. Fuente: tesis Sistemas de tratamiento pasivo de paredes para tratar aguas subterráneas contaminadas.

Los diferentes materiales eliminan la contaminación empleando los siguientes métodos: reacciones redox, precipitación, adsorción y biodegradación (figura 4), estos métodos permiten que la pluma de contaminación se mueva pasivamente debido a que se da una precipitación, adsorción o bien una degradación de los contaminantes, a continuación se describe cada uno de los métodos:

4.3.2. Métodos Utilizados en las BRP

a. Adsorción o retención:

Atrapa las sustancias químicas en las paredes de la barrera permeable. Por ejemplo, el carbono el cual tiene una superficie a la que se sorben las sustancias químicas cuando las aguas subterráneas lo atraviesan.

La adsorción eliminan los contaminantes a partir de una columna de agua subterránea a través de la fase disuelta a un medio sólido, absorción se define como la acumulación en el de

sólidos en el agua interfaz sin la formación de una estructura tridimensional. Absorción implica que el contaminante se ha difundido o particiones dentro de la masa del sólido.

La adsorción ha recibido la mayor atención como un mecanismo viable para la eliminación de contaminantes en las BRP. La adsorción es un combinación de tres mecanismos posibles: (1) la expulsión hidrófobo (de aversión agua), (2) la atracción electrostática (cargas opuestas se atraen), y/o (3) la superficie reacciones de coordinación (hidrólisis, formación de complejos de metal, intercambio de ligandos, o hidrógeno unión)

b. Precipitando:

Las sustancias químicas disueltas en el agua reaccionan con los contaminantes para formar productos insolubles. Por ejemplo, agentes precipitantes como la caliza, provocan la precipitación de los compuestos nocivos en forma de sólidos que quedan retenidos en las paredes de la barrera. Ej, el plomo es un contaminante común en los emplazamientos industriales donde se reciclan las baterías de automóviles. Una BRP de piedra caliza situada en el camino de las aguas subterráneas ácidas contaminadas con plomo neutraliza el ácido y hace que el plomo cambie a una forma sólida que queda retenida en la barrera.

c. Degradación:

Transformando las sustancias dañinas mediante reacción química en compuestos inocuos o inofensivos. Por ejemplo, el hierro granulado puede transformar algunos tipos de disolventes que presenten compuestos clorados en sustancias químicas inofensivas. También se puede conseguir la degradación de los contaminantes estimulando el crecimiento de microorganismos que transforman en su metabolismo las sustancias perjudiciales en CO₂ y agua. Para ello las paredes de las barreras estarán rellenas de nutrientes y oxígeno.

Estas barreras son simples mecánicamente, pueden contener un catalizador metálico para degradar los contaminantes orgánicos para inmovilizar metales, nutrientes y oxígeno para microorganismos para favorecer la biorremediación.

Las reacciones que tienen lugar en las barreras dependen de ciertos parámetros como son: el pH, el potencial de oxidación/reducción, concentración de los contaminantes, cinética, una buena aplicación de la tecnología requiere la caracterización del contaminante, el flujo del agua subterránea y la geología del terreno subterráneo.

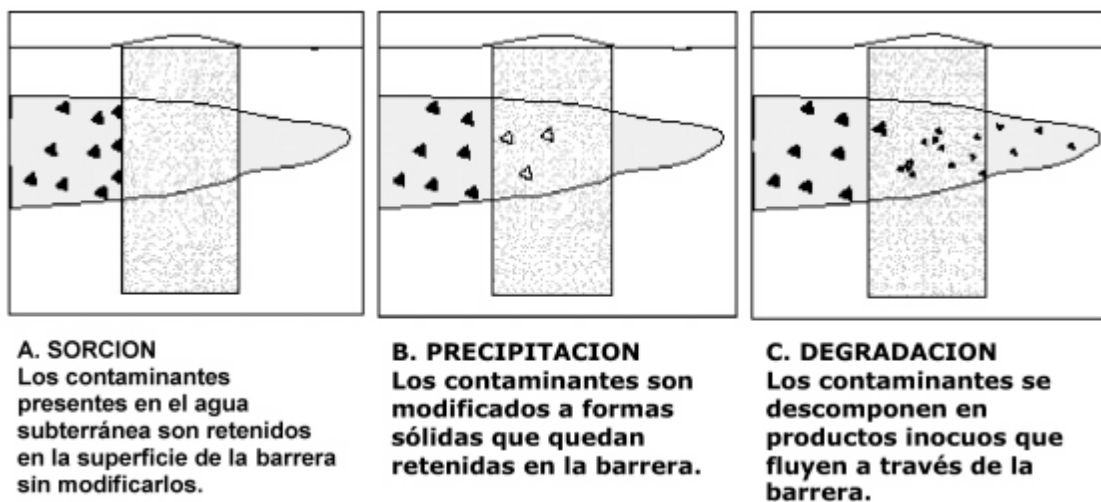


Figura 4 Métodos utilizados en la BRP, Fuente: Artículo Recuperación de Suelos contaminados mediante biobarreras, junio 99.

Otros medios que se están estudiando son las barreras electroquímicas que generan reacciones oxidación-reducción, esta técnica ha demostrado su capacidad de remover algunos contaminantes orgánicos como tricloroetileno e hidrocarburos, esta es una tecnología para restaurar suelos contaminados que se basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa. Para la aplicación de una diferencia de potencial, o una corriente directa, se requiere el empleo de electrodos (ánodo y cátodo), los cuales son colocados en pozos excavados en el suelo, usualmente estos se humectan con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico. La acción del electrolito permite transportar el contaminante hacia los pozos en donde será extraído. Al contrario del arrastre de fluidos, esta técnica permite establecer una migración dirigida, la cual evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento.

Los mecanismos principales por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electromigración, electroósmosis y electroforesis. Siendo los dos primeros los que ejercen la mayor influencia en el transporte del contaminante.

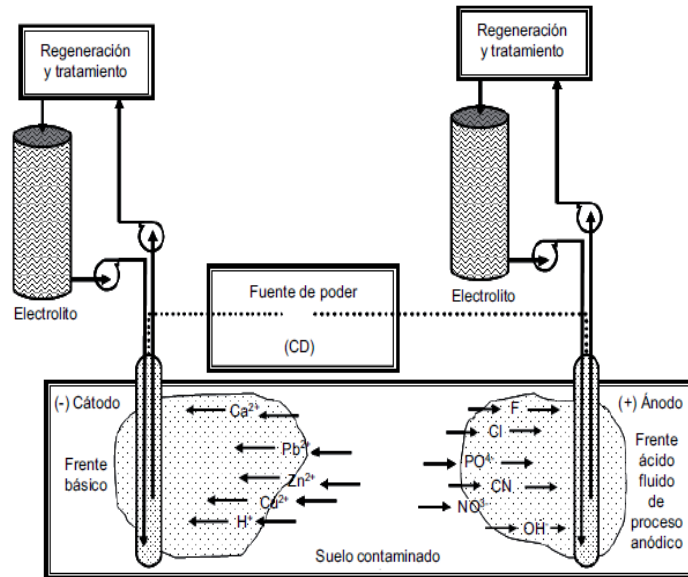


Figura 5. Esquema básico del proceso de electroremediación, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico. El frente ácido se forma en el ánodo y migra hacia el cátodo. Fuente: Electrorremediación de suelos contaminados, artículo científico.

4.4. CONSTRUCCIÓN DE BARRERAS REACTIVAS

En primer lugar es necesaria una completa caracterización del lugar para el correcto diseño e instalación de una barrera reactiva, que incluya una evaluación del comportamiento del suelo, así como determinación de la viabilidad del suelo para la instalación de la BRP. La modelización hidrológica y el monitoreo de la instalación permiten definir las dimensiones básicas de la pluma de contaminante, la dirección del movimiento de la pluma, y la localización más apropiada de la barrera, así mismo se tendrán que conocer la localización y extensión de la pluma de contaminación, la dirección del flujo de agua subterránea y su velocidad y la concentración de los diferentes contaminantes. Además, para el diseño de la BRP, es útil conocer las posibles informaciones relativas a las variaciones de permeabilidad de los diferentes estratos y la geoquímica del agua, otro de los aspectos a tener en cuenta es la estratigrafía y la litología del lugar los cuales suelen indicar qué tipo de diseño para la BRP es el adecuado. Por ejemplo, es deseable que la parte más baja de la barrera se asiente sobre un terreno de baja permeabilidad para así prevenir la filtración del agua

contaminada. Si esta situación no se da, será necesario un sistema artificial que evite estas filtraciones⁶.

En los sistemas tradicionales las barreras no se construyen para profundidades superiores a 20 metros ya que los métodos de construcción tradicionales permiten la instalación de barreras reactivas, siempre que el límite de la capa freática no se encuentre a una profundidad superior a 20 metros.

Aunque una variedad de medios de tratamiento y estrategias están disponibles, la técnica más común es la de enterrar hierro granular en una zanja de modo que el agua subterránea contaminada pasa a través de los materiales reactivos, los contaminantes se eliminan y el agua se convierte en "limpia". Las principales ventajas de esta técnica son la eliminación de bombeo, excavación masiva, la eliminación fuera del sitio, y una reducción muy significativa de los costos. El uso de esta tecnología se está convirtiendo en la más conocida y aplicada.

Las consideraciones especiales de construcción deben hacerse cuando se planifica la instalación de barreras reactivas "BRP" para asegurar la vida útil de la instalación y para ser rentable. Técnicas geotécnicas tales como zanjas de suspensión, mezclar el suelo profundo, y la inyección puede ser usado para simplificar y mejorar la instalación de materiales reactivos relativos a zanja y rellenos convencionales. Estas técnicas permiten reducir los riesgos a los trabajadores durante la instalación, reducir los residuos y reducir los costos para la mayoría de instalaciones.

Hasta la fecha, la mayoría de las barreras impermeables se han instalado a poca profundidad utilizando métodos de construcción, tales como zanjas abiertas y / o excavaciones apuntalado, aunque estos métodos son utilizables, son limitados a profundidades someras y más perturbadores para el uso normal del sitio. Técnicas geotécnicas son más rápidamente instalado y menos perjudicial para las actividades del sitio y por lo tanto más eficaz. Recientemente, los estudios de laboratorio y los proyectos piloto han demostrado que las técnicas geotécnicas pueden ser utilizadas con éxito para instalar barreras reactivas.

⁶ Evaluación a escala laboratorio de procesos de eliminación de hidrocarburos aromáticos Policíclicos (PAHs) en suelos y aguas subterráneas: Integración de procesos de adsorción, 23

Por otra parte existen requerimientos básicos que deben cumplir una estructura de barrera como es el remplazo de los materiales reactivos o adsorbentes, la permeabilidad tiene que ser más elevada que la de los depósitos de agua de sus alrededores y el material debe tener una larga vida.

4.5. INSTALACIONES DE LAS BARRERAS REACTIVAS

Los dos tipos más comunes de instalación para BRP son:

- paredes continuas
- embudo y puertas.

Una pared continua permeable es generalmente el más simple de instalar y típicamente se extiende a través de la anchura y la profundidad de la columna, y tiene el menor impacto en los actuales patrones de flujo de agua subterránea. El embudo y configuración de la puerta, como se muestra en la figura. 6, permite que el agua subterránea contaminada para ser canalizado o guiado por impermeable secciones o embudos permeable a puertas, que contienen los materiales reactivos. Lodo líquido en paredes de corte o estacas típicamente se han utilizado para crear el embudo.

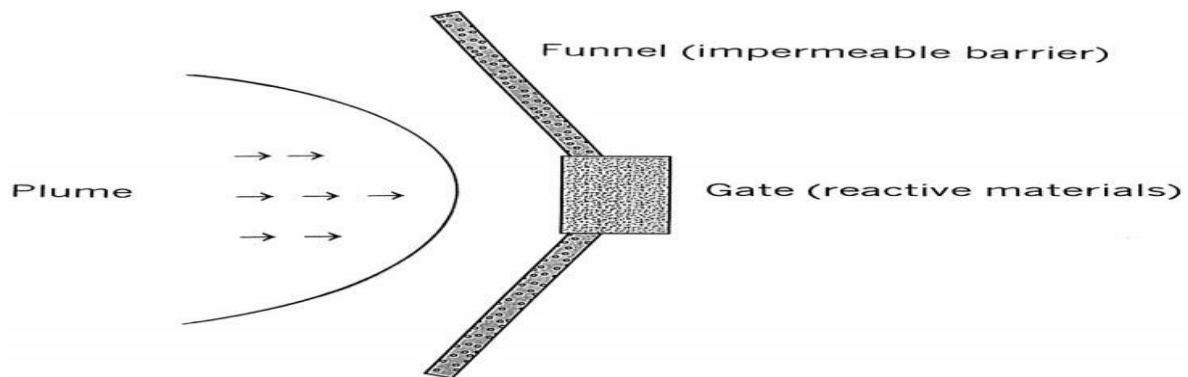


Figura 6. Ilustración del concepto de embudo y puerta. Fuente: Geotechnical techniques for the construction of reactive barriers, Journal of hazardous materials, Artículo científico.

Las puertas permeables mantienen el material de tratamiento y se puede colocar dentro de cualquier ranura en la tierra o enterrado embarcación que contiene reactivos, la longitud de estos sistemas deben ser significativamente más largo que el ancho de la pluma para asegurar la captura

completa de los contaminantes. Típicamente, la relación de la longitud del conducto a la longitud de la puerta es menos de seis.

El agua subterránea debe estar en contacto con una zona inferior impermeable a fin de asegurar que el flujo de agua subterránea no pasare a través de o debajo del material de tratamiento. Si la pared de barrera reactiva no está cubierta, entonces debe ser construido mucho más profundo que la pluma de contaminantes para permitir captura. Al canalizar el agua, la velocidad del agua subterránea se incrementa de 2 a 5 veces la velocidad natural, dependiendo el embudo a la relación de puerta. Sin embargo, ya sea en una pared continua o de un embudo, el volumen requerido de material reactivo requerido es similar debido al flujo de masa similar de contaminación a través del sistema. El espesor requerido de la zona de tratamiento en la dirección de flujo puede variar desde unas pocas decenas de centímetros a varios metros, dependiendo de la carga contaminada y tiempo de residencia.

Un tipo especial de embudo y compuerta empleada es un recipiente enterrado para contener el material reactivo extraíble denominado "casete". El objetivo de los sistemas de casete es permitir la remoción y reemplazo regular de mantenimiento reactivo del sistema sin excavar y retirar el recipiente. La mayoría de estos sistemas proporcionan un mayor control sobre el flujo de las aguas subterráneas por medio de válvulas, tuberías y cañerías. Dado que la entrada de energía de las bombas es contrarias a los objetivos del sistema pasivo, toda la tubería debe funcionar por gravedad y por lo tanto está enterrado cerca de la parte inferior de la creación de un sistema más difícil y costoso. Por lo tanto, los sistemas que se basan en tuberías enterradas deben ser evitados. Actualmente, el coste de la mayoría de los sistemas de casete es muchas veces el coste de una pared de barrera simple. Los sistemas complejos de casete también pueden implicar el mantenimiento continuo y la reparación, haciendo que los costos cada vez sean mayores. Sin embargo, la idea de los sistemas de casete parece son prometedoros. Uno de los sistemas de casetes que pueden resultar rentables es la combinación de contención con el tratamiento BRP en el cual se rodea el área contaminada con una pared de lechada, proporcionando de ese modo la contención del contaminante. Este tipo de sistema podría ser utilizado para equipar a muchos sitios Por ejemplo, vertederos, los cierres de instalaciones, etc. que actualmente dependen de bombeo y

tratamiento para manejar los volúmenes pequeños de infiltración y aguas subterráneas que se acumula en el interior del muro de contención.

4.6. CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN

Una variedad de métodos se puede utilizar para instalar BRP en el subsuelo. La elección de los métodos depende de la profundidad y el espesor de la zona de tratamiento, consideraciones de seguridad, las condiciones geológicas del sitio y los costos de construcción. Con el fin de controlar los costos, el método de construcción debe en primer lugar mantener las dimensiones de la instalación para evitar desperdicio de materiales reactivos costosos, en segundo lugar evitar la deshidratación y el tratamiento posterior de las aguas subterráneas contaminadas durante la construcción, y por último asegurar una construcción más rápida y sencilla, posteriormente se debe determinar el material de barrera, la profundidad grosor y longitud del contaminante, el costo más importante y los factores de construcción son las condiciones del suelo y la seguridad. Para instalaciones superficiales menos de 4 metros con un suelo estable casi cualquier método puede ser útil, pero para unas mayores instalaciones, o en suelos con problemas, el costo de construcción puede variar ampliamente dependiendo el método, tipo de suelo, las condiciones de las aguas subterráneas.

Por otra parte y otra de las técnicas es la excavación de una parte del suelo y su reemplazo con material granulado revestido de microorganismos es un método efectivo de construir una barrera biológica en casos en los que la contaminación no ha penetrado la superficie a gran profundidad, es decir, menos de 5 m. Los medios adecuados para construir una barrera biológica in situ son los medios porosos, con grano grueso, con alta capacidad de adsorción del contaminante y la agregación microbiana, como el carbón activado y la arena mezclada con compost. Estos materiales bioportadores deben ser preenvueltos o envueltos en condiciones in situ con microorganismos apropiados para obtener la actividad biodegradadora requerida.

Las condiciones idóneas para la correcta aplicación de las barreras biológicas in situ son similares a las descritas para otras tecnologías de contención mediante muros de tratamiento:

- Suelo arenoso poroso, que facilite la movilidad del oxígeno y/o nutrientes.
- Contaminado hasta una profundidad de 15 metros como máximo.
- Con una corriente de agua subterránea abundante y constante.
- Con una contaminación no muy antigua, puesto que en suelos envejecidos la adsorción de los contaminantes a la matriz es muy alta y, por tanto, no se encuentran disponibles para los microorganismos.
- Nivel freático no muy profundo.

4.7. VENTAJAS E INCONVENIENTES⁷

Las ventajas de las BRPs son que inmovilizan o transforman los contaminantes in-situ. También tratan componentes recalcitrantes como solventes clorados, metales pesados, componentes radionucleares. Las BRPs son diseñadas, en general, para operar pasivamente durante décadas.

Una de las ventajas más importante, es la forma de operar, porque pueden operar durante largos períodos, los costes de mantenimiento son mínimos y no hay oportunidad de fracasos mecánicos que causen el cierre del sistema.

Otras ventajas de las BRP respecto a otros sistemas tradicionales son:

- Las paredes reactivas pueden degradar o inmovilizar los contaminantes in-situ sin necesidad de llevarlos a la superficie.
- No requieren de energía continua, porque un gradiente natural del flujo de las aguas subterráneas arrastra los contaminantes hacia la zona reactiva.
- Sólo requieren un emplazamiento o sustitución de microorganismos o precipitantes periódicamente.
- No necesita estructuras sobre tierra.

⁷ Evaluación a escala laboratorio de procesos de eliminación de hidrocarburos aromáticos Policíclicos (PAHs) en suelos y aguas subterráneas: Integración de procesos de adsorción.
- Informe sobre el seguimiento de aplicación y rendimiento de barreras reactivas permeables para la remediación de aguas. EPA

Para plumas que contienen una mezcla de contaminantes, las BRPs pueden ser construidas en series. Estos contaminantes pueden ser eliminados simultáneamente del agua.

Los inconvenientes de las BRPs provienen de su limitación de diseño y monitoreo. El diseño corriente usa un método tipo flujo-pistón para estimar el tiempo de residencia de las aguas residuales en la BRP y una ecuación de primer orden para predecir el nivel de reducción del contaminante.

Otro inconveniente es que los métodos de construcción para profundidades más grandes de 30 metros no son eficaces económicamente

Por ultimo otro inconveniente son los materiales reactivos usados los cuales van perdiendo propiedades con el tiempo, de forma tal que van a requerir el reemplazo del medio reactivo, igualmente la permeabilidad puede disminuirse debido a la precipitación de sales metálicas y la actividad biológica o la precipitación química pueden limitar la permeabilidad de la pared de tratamiento pasivo.

5. EVALUACION DE LOS COSTOS

Hasta la fecha, más de 40 barreras reactivas permeables (BRP) se han instalado en el campo para restaurar la calidad del agua subterránea, por esta razón las BRP estén dentro de la lista de las tecnologías para la remediación. Con esta decisión se produce la necesidad de desarrollar medios efectivos para medir el costo de comparación del rendimiento de la técnica de las barreras reactivas permeables con respecto a las otras tecnologías como es el caso de la técnica de bombeo y tratamiento la cual es la más utilizada. Para calcular los costos de las BRP estos se divide en cuatro categorías generales: (1) la caracterización del sitio, (2) el diseño, (3) la construcción, y (4) operación y mantenimiento. En relación a los costos de la tecnología de bombeo y tratamiento no se dividen en categorías más allá de costo total y el costo anual de operación y mantenimiento.

La información de los costos que se menciona a continuación fueron tomados del informe realizado por la EPA "Análisis Económico de aplicación de barreras Permeables reactivas para rehabilitación de los contaminados Agua Subterránea" en la cual cita "*se han publicado informes que parecen indicar que los sistemas BRP no son más eficaces para reducir los costos de operación y mantenimiento, en una base por unidad de tratamiento, que los sistemas de bombeo y tratamiento. La comparación de las tecnologías fue basada en el volumen de agua tratada por unidad de tiempo.*

Se informa que un sistema de bombeo y operación cuesta aproximadamente \$ 500.000 dólares en relación a la operación y mantenimiento por año. Compararlo con un BRP que cuesta \$ 100.000 dólares en relación a la operación y mantenimiento por año. El sistema de bombeo y operación trata un 1 millón de galones por año (GPY), mientras que el BRP trata sólo 100.000 GPY. En base a lo anterior, el sistema de bombeo y operación sólo costaría \$ 500/1000 litros, mientras que el BRP está costaría \$ 1000/1000 galones, o el doble del costo. Sin embargo, el BRP captura toda el agua que necesita ser tratar, mientras que el exceso de agua tratada por el sistema de bombeo y operación no es tratada totalmente. Por lo tanto, el valor del sistema de bombeo y operación debe calcularse utilizando el mismo volumen de agua que es tratada por el BRP, es decir, 100.000 galones por año. Esto resulta que los galones tratados por el sistema de bombeo y operación tiene un coste de 5.000 dólares de operación y mantenimiento por 1000 galones

contaminados de agua, un factor de cinco veces más caro que el BRP⁸, lo anterior es representado en la gráfica 7 que se presenta a continuación.

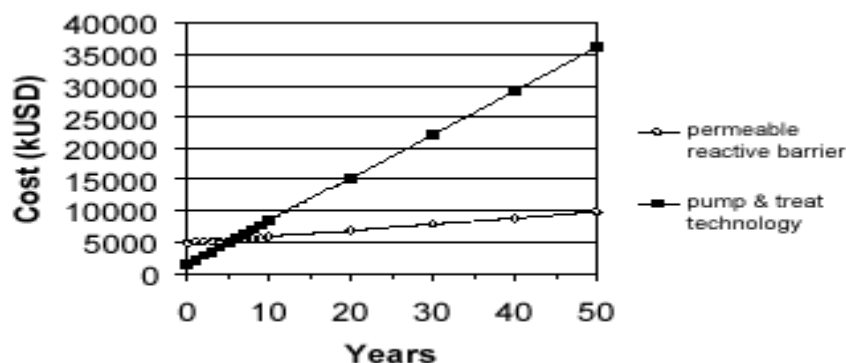


Figura 7 Gráfica comparativa de costos BRP versus bombeo y tratamiento, fuente (evaluación a escala laboratorio de proceso de eliminación de hidrocarburos aromáticos)

El costo de instalación de las BRP depende de los factores de características y propiedades de los contaminantes, diseño del sistema y factores de operación, control de la fuente de contaminación, factores hidrogeológicos y extensión de la contaminación. A continuación se describe cada uno de estos factores⁸:

a. Características y propiedades de los contaminantes

Las propiedades de los contaminantes definen la facilidad de eliminación de éstos del agua subterránea, y los pasos requeridos para tratar el agua. El tipo de contaminante determina tanto el costo de capital como el coste anual de operación.

b. Diseño del sistema y factores de operación

Teniendo en cuenta el tipo de tecnología de tratamiento y la adecuación del sistema diseñado para remediar el lugar, así como esfuerzos de optimización del sistema, y la cantidad y tipo de monitoreo.

⁸ Evaluación a escala laboratorio de procesos de eliminación de hidrocarburos aromáticos Policíclicos (PAHs) en suelos y aguas subterráneas: Integración de procesos de adsorción, pag 43-46.

c. Extensión de la contaminación

El área y la profundidad de la pluma y la concentración de los contaminantes en ésta afectan al coste de remediación. Una contaminación limitada en área y profundidad resulta más barata de remediar que una con la misma masa de contaminante pero esparcida en un área mayor. Esta extensión afecta al tamaño del sistema de extracción y tratamiento y la complejidad del sistema.

El siguiente cuadro representa los costos estimados (por unidad común de medida) para aplicar la tecnología de BRP o pared de tratamiento pasivo, en sitios de diferentes tamaños y complejidad.

GW TECHNOLOGY	PASSIVE-REACTIVE TREATMENT WALLS			
	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D
	Small Site		Large Site	
	Easy	Difficult	Easy	Difficult
Cost per Cubic Foot (of treatment Wall)	\$ 36	\$ 48	\$ 43	\$ 73
Cost per Cubic Meter (of treatment Wall)	\$ 1,267	\$ 1,681	\$ 1,503	\$ 2,580
Cost per Cubic Yard (of treatment Wall)	\$ 963	\$ 1,277	\$ 1,142	\$ 1,961
GW Treated (CY)	680,25	680,25	17,006,250	17,006,250
Cost per Cubic Yard (of GW Treated)	\$ 0.16	\$ 0.21	\$ 0.08	\$ 0,13

Figura 8. Costos por unidad de las BRP, Fuente: Guía del ciudadano para las Barreras Reactivas Permeables

CONCLUSIONES

- ✓ De acuerdo a la investigación la mayoría de las instalaciones de barreras reactivas permeables han sido diseñadas e implementadas basándose en los resultados de estudios arrojados en laboratorio con el fin de determinar el material reactivo y la cinética de eliminación del contaminante.
- ✓ Para llevar a cabo una adecuada selección del tipo de reactivo a utilizar en las BRP, es necesario en primer lugar efectuar un diagnóstico del tipo de contaminante, dimensiones de la contaminación y el uso futuro del lugar que fue contaminado.
- ✓ Si bien es cierto que el costo de las BRP depende de las características y propiedades de los contaminantes, diseño del sistema y factores de operación, control de la fuente de contaminación, factores hidrogeológicos y extensión de la contaminación, esto no afecta a que esta sea la técnica de remediación más económica en relación a las demás técnicas in situ aplicadas para la remediación de suelos contaminados.
- ✓ El medio más utilizado en la implementación de las BRP es el carbón activado, en relación con otros medios como son los microorganismos y la electrorremediación estas técnicas se encuentran todavía en fase probatoria.
- ✓ Actualmente en Colombia la técnica de las BRP se encuentra en proceso de investigación, no obstante esta ha sido aplicada experimentalmente en estaciones de servicio arrojando como resultados una eliminación eficiente del contaminante.
- ✓ A medida que el número de aplicaciones de campo de las BRP ha crecido, también lo ha hecho el número de técnicas de construcción disponibles comercialmente adaptadas a la instalación BRP.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ A Diaz. (1999 ,Junio) Recuperación de Suelos contaminados mediante biobarreras, revista suelos contaminados.
- ✓ Chi-hui yea. (2009 Mayo) A permeable reactive barrier for the bioremediation of BETX-contaminated groundwather: Microbial community distribution and removal efficiencies, articulo científico.
- ✓ Cobas, M. (2013, Febrero) Development of permeable reactive biobarrier for the removal of PAHs by trichoderma lomgibrachiatum, Artículo científico.
- ✓ Cortina, José. Técnicas de tratamiento in- situ de aguas subterráneas, capítulo 7.
- ✓ Day, Steven et al. (1999, Marzo) Geotechnical techniques for the construction of reactive barriers, Journal of hazardous materials, Artículo científico.
- ✓ De la Rosa. (2007 Agosto) Electroremediacion de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo, Artículo científico.130.
- ✓ Documentos técnicos del Foro para el Desarrollo del Sitio Web Remediation Technologies (RTDF) que incluye perfiles de instalación y aplicaciones en el campo de la barrera permeable reactiva paredes.
- ✓ EPA, 1995. In Situ Informe de estado Tecnología de Remediación: Paredes de tratamiento, Oficina de Desechos Sólidos y Respuesta de Emergencia, EPA/540/K-94/004.Reeter, C. Advances in permeable reactive barrier technologies (2002, agosto), Washington DC: Naval Facilities Engineering Service Center, Artículo científico.
- ✓ EPA, 2002. Economic Analysis of the Implementation of Permeable Reactive Barriers for Remediation of Contaminated, EPA/600/R-02/034/June 2002

- ✓ Ha ik chung. (2006 octubre) A new method for remedial treatment of contaminated clayey soils by electrokinetics coupled with permeable reactive barriers, artículo científico.
- ✓ Lozano, A.; Rovira, T. (2003). Evaluación a escala laboratorio de procesos de eliminación de hidrocarburos aromáticos Policíclicos (PAHs) en suelos y aguas subterráneas: Integración de procesos de adsorción.
- ✓ Purswani, Jessica (2011), Desarrollo y estudio biológico de un sistema de bajo costo para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con compuestos oxigenados de gasolina: MTBE, Memoria para obtener el Doctorado Europeo, Universidad de Granada.
- ✓ Richter S. (2010 Junio) Chemistry and microbiology of permeable reactive barriers for in situ groundwater clean up, Artículo científico, 364.
- ✓ Santiago G, (2006), Sistemas de tratamiento pasivo de paredes para tratar aguas subterráneas contaminadas, tesis para obtener el grado de químico ambiental, universidad nacional de Colombia sede Medellín, Colombia.
- ✓ Thiruvengkatcharin. R. (2007, October) Permeable reactive barrier for groundwater remediation Artículo científico, 150.