



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTONOMA  
METROPOLITANA**

---

**UNIDAD IZTAPALAPA**

**DIVISION CIENCIAS BIOLOGICAS Y DE LA SALUD**

**SELECCION DE TECNOLOGIAS PARA  
LA REMEDIACION DE SUELOS  
CONTAMINADOS CON BIFENILOS  
POLICLORADOS (BPC'S)**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
ESPECIALIZACION EN BIOTECNOLOGIA**

**P R E S E N T A:**

**JUAN JOSE MENDOZA SALGADO**

**México, D. F.**

**1997**

U. A. M. IZTAPALAPA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
UNIDAD IZTAPALAPA

---

DIVISIÓN CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

**TITULO DE TESIS.**

**SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS  
CONTAMINADOS CON BIFENILOS POLICLORADOS (BPC'S)**

**SINODALES.**

**DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ  
DR. GERARDO SAUCEDO CASTAÑEDA  
DR. MARIANO GUTIERREZ ROJAS**

**SUSTENTANTE.**

**ING. JUAN JOSE MENDOZA SALGADO**

**México, D.F. Noviembre 1997**

# U. A. M. IZTAPALAPA BIBLIOTECA

## SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA REMEDIACION DE SUELOS CONTAMINADOS CON BIFENILOS POLICLORADOS (BPC's)

CONTENIDO	Pag
RESUMEN	II
COLABORACIÓN	III
1 PRESENTACIÓN	1
2 INTRODUCCIÓN	2
3 DISTRIBUCIÓN Y PROPIEDADES DE LOS BPC's	3
3.1 Distribución de los BPC's	7
3.2 Toxicidad de los BPC's	9
4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	12
5 OBJETIVOS	12
5.1 Objetivo general	12
5.2 Objetivos particulares	12
6 METODOLOGÍA	13
6.1 Fuentes de información	13
6.2 Recopilación de tecnologías	13
6.3 Sistematización de la información de tecnologías	13
7 BASES MATEMÁTICAS DE LA METODOLOGIA DE EVALUACIÓN Y CALIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS	16
7.1 Aplicación del modelo multicriterio	18
8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
8.1 Definición de los factores de evaluación	21
8.2 Matrices de calificación de tecnologías	24
8.2.1 Matriz de ponderación de factores	24
8.2.2 Matriz de atributos de tecnologías	25
8.2.3 Matriz de ponderación y calificación de tecnologías	28
8.2.4 Matriz de simplificación e importancia	30
8.2.5 Matriz de simplificación de tecnologías	31
8.3 Aplicación de criterios y discusión	32
9 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	35
10 REFERENCIAS	36
11 ANEXOS	40

## RESUMEN

Entre los problemas ambientales que existen en nuestro país así como en países industrializados, es el problema de la contaminación en suelos ocasionado por la actividad industrial, originando residuos tóxicos y peligrosos, siendo los más comunes: arsénico, cianuro, benceno, tolueno, xileno (BTX), hidrocarburos (HC), bifenilos policlorados (BPC's); los cuales presentan riesgos a la salud y al medio ambiente, deteriorando la calidad de vida que requiere todo ser vivo.

A partir del problema de contaminación presente en suelo principalmente por BPC's, se desarrolló la presente investigación, contando con dos etapas. La primera consistió en recopilar información en congresos, revistas científicas y tecnológicas, foros, seminarios y patentes, a nivel internacional, con el objeto de obtener información apropiada sobre tecnologías que hayan sido desarrolladas para eliminar BPC's en suelo, sedimentos lacustres, concreto o materiales semejantes; una vez recopiladas las tecnologías, se procedió a sistematizarlas, clasificándolas con base en los diferentes tipos de proceso existente, resultando cuatro grupos representativos: físicos, químicos, biológicos y mixtos, estos últimos son la combinación de los tres primeros.

La segunda etapa, consistió en seleccionar entre todas las tecnologías conocidas, cual es la más apropiada para la eliminación de BPC's presentes en suelo, para ello se tomó en cuenta aspectos técnicos, económicos y de seguridad. Estos aspectos fueron divididos en factores de evaluación, que permitieron sistematizar y conocer diversas características de cada una de las tecnologías. Sin embargo, para realizar una adecuada selección, se aplicó y adecuó un método a las necesidades de la presente investigación, este método auxilió en la toma de decisiones, considerando la participación de cuatro evaluadores, estos últimos expresaron su opinión en algunas etapas del desarrollo y aplicación del método.

La necesidad por remediar suelos contaminados por HC, BTX, a nivel mundial y principalmente BPC's, ha originado el desarrollo de diversas tecnologías cuyo objetivo principal de ellas es eliminar BPC's existentes en aceite de transformadores, acero, suelos, sedimentos y concreto, siendo los tres últimos medios los de mayor interés de la presente investigación.

Por medio de la aplicación del método y la participación de los 4 evaluadores, se obtuvo como un primer resultado, 3 matrices de evaluación, las cuales relacionan a todas las tecnologías obtenidas con los factores de evaluación empleados. Posteriormente se procedió a unificar los criterios de cada uno de los evaluadores, obteniendo como segundo resultado, la selección de 4 tecnologías de un total de 24 conocidas, las 4 tecnologías pre-seleccionadas realizan la degradación de BPC's por diferentes procesos, 2 por medio de un proceso mixto (físico-químico), 1 por proceso químico y 1 por proceso biológico.

Estas 4 tecnologías son consideradas como un resultado intermedio, debido a que se requiere de simplificar y definir cual de las 4 tecnologías es la más factible de aplicar, considerando factores técnicos y económicos que resulten ser los principales. Para ello, se procedió a realizar una última evaluación solamente de las 4 tecnologías y al mismo tiempo simplificando los factores de evaluación que resultaron ser los más importantes. Finalmente, se determinó que la tecnología con proceso químico fue la más adecuada.

Sin embargo, éste resultado no se puede considerar como un resultado definitivo, debido a que está en función del punto de vista de cada grupo de evaluadores al momento de aplicar este método.

## **COLABORACIÓN**

Deseo manifestar mis agradecimientos a las personas que colaboraron, en diferentes formas para la realización de este trabajo.

A mis padres Carlos Mendoza y Gudelia Salgado por su apoyo y atención

A los Doctores Mariano Gutiérrez Rojas y Gerardo Saucedo Castañeda quienes desde un principio se comprometieron y colaboraron en este trabajo, aportando ideas, tiempo y paciencia para la dirección de este proyecto.

Al Departamento de Reducción de Emisiones de la Subgerencia de Evaluación de Emisiones, GPA por las facilidades otorgadas para la impresión de este proyecto, así como al Biólogo Felipe Rodrigo Cervantes, por su participación y comentarios.

A todos aquellos que dedican su tiempo a la investigación, con el fin de encontrar soluciones a los problemas ambientales existentes a nivel mundial, así como aquellos que están comprometidos en proponer alternativas para la creación de nuevas tecnologías y de quienes aproveche su obra, para realizar este trabajo.

## 1. PRESENTACIÓN

Con base en la necesidad por eliminar del medio ambiente, residuos y sustancias tóxicas peligrosas principalmente BPC's, es necesario conocer las diferentes tecnologías que han sido desarrolladas para la eliminación de estos compuestos químicos presentes en: suelo, sedimentos lacustres, concreto, ladrillo, aceite de transformadores y acero, para ello se requiere considerar los diferentes caminos existentes; uno de los más viables es el clasificar tecnologías en tres grandes grupos claramente diferenciables entre sí: procesos físicos, químicos, biológicos y mixtos. En función de esta clasificación de tecnologías, se puede mencionar lo siguiente:

Las tecnologías basadas con procesos físicos resultan ser las más estudiadas actualmente, siendo prácticamente el único proceso que se puede aplicar para la destrucción de BPC's a altas concentraciones; sin embargo, el principal inconveniente que se presenta, es la escasez de instalaciones especializadas para este tratamiento, adicionalmente los costos y la infraestructura necesaria para implementar esta tecnología resultan ser muy elevados.

Las tecnologías con procesos químicos, contemplan en algunos casos un procedimiento mixto, considerado la destrucción de BPC's en forma parcial, no obstante se extiende su campo de aplicación a la depuración de aceite en transformadores y suelo; con concentraciones bajas o intermedias. La mayoría de estas tecnologías basa su principio en la reacción química sobre el residuo contaminante tratado con un reactivo, surfactante, solvente o una base sódica. Sin embargo, se estima que para concentraciones superiores a 10,000 ppm, esta tecnología comienza a ser más cara ó igual que una tecnología por proceso físico, por otra parte, al aplicar tecnologías por proceso químico, estas generan subproductos y contaminantes y con ello el problema de contaminación solo es trasladado de un medio a otro.

La tecnología basadas con procesos biológicos, consisten en abrir el ciclo bencénico por medio de organismos unicelulares, fundamentalmente hongos o bacterias. Estas últimas han sido identificadas como altas degradadoras de algunos BPC's, estas bacterias pueden ser tipo anaerobias (decoloración reductiva) y aerobias (ruptura del anillo bifenílico por oxidación); sin embargo, la degradación también puede llevarse a cabo por hongos. No obstante, las fuentes consultadas indican que la degradación de BPC's, es función directa del número y disposición de los cloros en el anillo bifenílico. La limitante de este proceso es que se no se tienen resultados en un corto plazo, y se aplica a concentraciones medias o bajas de BPC's; y en la mayoría de los casos los BPC's con cloros en posición orto y meta son poco biodegradables. Sin embargo, los costos de este proceso son los más bajos respecto a los dos procesos mencionados anteriormente.

Considerando lo anterior, y con el objeto de proporcionar alternativas para resolver el problema de contaminación por BPC's, se describen tecnologías a nivel de ingeniería básica desarrolladas para tal fin, en función de la información obtenida, la cual fue analizada y sistematizada, obteniendo 24 tecnologías diferentes entre sí, y a su vez éstas fueron clasificadas en 4 grupos; tecnologías con procesos físicos, químicos, biológicos y mixtos.

El objetivo de esta investigación fue la selección de la tecnología más adecuada para la eliminación de BPC's. Para este propósito se consideran factores técnicos, económicos y de seguridad a la vez que se aplicó un método multicriterio, el cual nos permitió establecer de manera objetiva la selección de la tecnología más conveniente, siendo el principal resultado de la presente investigación.

## 2 INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que existen en nuestro país y en los países industrializados, es el problema de la contaminación en suelos ocasionado por residuos tóxicos e industriales, generados por las diferentes actividades industriales (Gidi, 1995), encontrándose residuos en estado líquido o sólido, entre los que destacan: Arsénico, Cianuro, Cloruros, Benceno Tolueno Xileno (BTX), Hidrocarburos (HC) y Bifenilos Policlorados (BPC's), los cuales presentan riesgos a la salud y al medio ambiente.

Los BPC's son hidrocarburos aromáticos clorados producidos comercialmente mediante la cloración directa de bifenilos, en presencia de cloro férrico o yodo como catalizador (Zbozinek, 1985). Los bifenilos están formados por la liga de dos anillos de seis carbonos cada uno, los átomos de cloro se entrelazan al núcleo bifenílico, estos pueden colocarse en uno de los diez sitios disponibles del bifenilo. Así pueden llegar a formar hasta 209 posibles combinaciones diferentes de BPC's (Crine, 1987).

Según cifras oficiales, en México están almacenados más de 10 mil toneladas de desechos líquidos de BPC's y están en uso aproximadamente más de 10 mil transformadores, que en conjunto sumarían alrededor de 35,400 toneladas (Villegas, 1994).

Otras estimaciones indican que las cantidades de BPC's en México pueden oscilar en 40 mil toneladas, pero estos valores son producto de inventarios parciales llevados a cabo por organizaciones no gubernamentales (Greenpeace, 1996).

Es importante destacar que los mayores volúmenes de estos compuestos, ya sea en forma parcial o total se localizan en primera instancia en sitios para confinamiento temporal, de manera controlada o sin control. En ambos casos el primer ecosistema que contaminan es el suelo, posteriormente acuíferos, sedimentos lacustres y finalmente sedimentos marinos; así al transportarse, se acumulan y paulatinamente intoxican al hombre. Los BPC's son altamente tóxicos y bioacumulables, debido a que su comportamiento es similar al del DDT; por lo que no pueden ser degradados por bacterias, enzimas o por medios bioquímicos; se han encontrado evidencias de su presencia en la atmósfera, agua y suelo principalmente.

Los BPC's tienen tendencia a acumularse en los depósitos de grasa tanto de animales como de humanos, incrementando el riesgo de cáncer, la existencia de quistes o lesiones en el sistema reproductor femenino principalmente. Los BPC's más tóxicos son los que contienen dos cloros en posición meta y para y al menos dos cloros en la posición meta (McConell, 1980).

Considerando las características químicas y toxicológicas que presentan estos compuestos, surge la necesidad de remediar suelos o sitios contaminados por BPC's. Para esto, se han desarrollado principalmente en países industrializados tecnologías, cuyo fin es la destoxificación y destrucción de contaminantes presentes en el suelo; estas representan una alternativa viable capaz de cubrir la necesidad de remediar suelos contaminados.

Las diferentes tecnologías que se conocen, son con el fin de eliminarlos del medio ambiente natural (suelo). Sin embargo, su selección depende del tipo de material contaminado (suelo, sedimentos lacustres, concreto, ladrillos, madera o acero.) y de factores ambientales y fisicoquímicos (pH, temperatura, contenido de humedad, microflora, condiciones climatológicas.). El tomar en cuenta estas consideraciones por sí solas no se garantiza la selección correcta de alguna tecnología. Para este propósito se requiere de establecer un método cuyo objetivo sea el seleccionar la tecnología más apropiada para la eliminación de BPC's considerando factores, técnicos, económicos y de seguridad, simultáneamente.

### 3 DISTRIBUCIÓN Y PROPIEDADES DE LOS BPC's

Los BPC's, fueron desarrollados para ser químicamente inertes, tener características dielécticas excepcionales, ser resistentes a la oxidación y a la degradación al ser sometidos a altas temperaturas por periodos largos. Se comenzaron a utilizar a partir de 1929 como fluidos de transferencia de calor en transformadores y capacitores eléctricos (Granero, 1991). Los BPC's fueron creados a partir de mezclas complejas diferenciadas por el nivel de cloración, estas mezclas son a su vez fraccionadas por destilación, con el fin de producirlas comerciales, siendo las más comunes (Villegas, 1994):

Ligeras (fluidos aceitosos) bi, tri, tetra-cloro bifenilo  
Mieles (fluidos tipo aceite) penta-cloro bifenilo  
Pesadas (grasas y ceras) más de seis-cloro bifenilo

Esta clasificación sólo se considera de forma comercial. Otra clasificación que se basa en la fórmula general de BPC's y la estructura molecular de los anillos bifenílicos incluyendo su sistema de carbonos se muestra en la figura 3.1 (Erickson, 1986):

$C_{12}H_{12-2n}Cl_n$ ,  $n = 1$  a  $10$

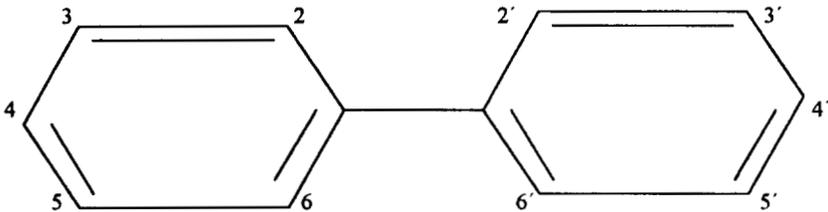


Fig. 3.1 Estructura Molecular del anillo bifenilico

A partir de la formula general, se pueden obtener 209 combinaciones diferentes de BPC's, clasificándolos por el grado de cloración que presentan. Por ejemplo, los 24 compuestos de BPC's con tres átomos de cloro son llamados triclorobifenilos, estos presentan de 1 a 3 átomos de cloro. Si estos mismos compuestos de BPC's presentan átomos de cloro en diferentes posiciones del anillo bifenilico, se utiliza el término de grupo de isómeros, el cual pertenece a una categoría de BPC's, este grupo comprende 10 compuestos individuales, asimismo al tener posiciones diferentes de cloro en este mismo grupo, se tendrán de 1 a 46 compuestos individuales por isómero y grupo respectivamente, por lo tanto si se tienen compuestos como: 2,4,4'- triclorobifenil y 2',3,4-triclorobifenil éstos pertenecen al grupo de los 24 isómeros del triclorobifenilos (Crine, 1987). Con base en lo anterior, la Tabla 3.1 muestra las categorías de BPC's y el numero de compuestos de cada categoría.

Tabla 3.1 Categoría y número de compuestos individuales de BPC's

Categoría	Numero de Compuestos individuales
Genero	209
Grupo de Isómeros	10
Grupo de Isómeros	1-46

Fuente: Crine, 1987.

Debido a la gran variedad de fluidos y sólidos que contienen BPC's, fue necesario hacer una clasificación para la distinción y selección de estos últimos, tomando en cuenta características fisico-químicas de los mismos. Esta clasificación dependió en gran medida de su uso, así como del fabricante; así la compañía Monsanto Chemical fue la primera en producir BPC's en América del Norte, posteriormente dadas las características dieléctricas que poseen los BPC's se comenzaron a exportar a Canadá, siendo en ese país donde los BPC's se asocian de manera directa a la industria eléctrica, principalmente en capacitores y transformadores, recibiendo el nombre comercial de Aroclor (Canviro Consultants, 1987)

Los BPC's recibieron diferentes nombres comerciales, dependiendo del país de origen o bien de la cantidad de cloro en su composición, los nombres comerciales más comunes son: Aroclor, Askarel, Phenoclor, Pryalenn Clophen, Pyranol, Solvol. (CFE, 1989; Crine, 1987). Esta clasificación causó confusión por lo que, se acordó que los fabricantes asignaran una nomenclatura indicando en los primeros dos números, la naturaleza del anillo bifenilico, los segundos dos números el peso promedio de cloro en porcentaje, por ejemplo, el Arocloro 1221 contiene 21% de Cl promedio. (Hutzinger *et al*, 1974), según se observa en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Estructura molecular de BPC's, indicando los anillos que lo conforman, así como el porcentaje de átomos de Cl

BPC'S	%C	%H	%Cl
Arocloro 1221	72.94	4.45	22.74
Arocloro 1232	64.44	3.36	31.96
Arocloro 1242	54.64	2.70	42.85
Arocloro 1248	49.50	2.17	48.54
Arocloro 1254	44.10	1.61	54.33
Arocloro 1260	38.18	0.94	60.97

Fuente: Monsanto Company; 1973

Los BPC's que se mencionan en la Tabla 3.2 indican el porcentaje de C, H, y Cl que contienen respectivamente, observando que al incrementarse el porcentaje de Cl disminuye el contenido de H, asimismo, al existir un alto contenido de C, éste disminuye al incrementarse el contenido de Cl, lo que demuestra que la estructura molecular de BPC's tendrá como mínimo 22% de Cl, esto da como resultado que los BPC's sean químicamente inertes y estables a la oxidación.

Por las características antes mencionadas, el uso industrial de los BPC's está en función de las propiedades fisico-químicas de los mismos, estas se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Propiedades físicas y químicas de algunos BPC's

Propiedades Físicas	Propiedades Químicas
Líquidos a baja presión de vapor (10-4 Kk/cm <sup>2</sup> ) Baja solubilidad en agua Semivolátiles No corrosivos Solubles en grasas Incoloros	Son relativamente inertes Poseen excelente constante dieléctrica Estables a la oxidación Alta estabilidad térmica Alta resistencia biológica No se hidrolizan

Fuente: Monsanto Industrial Chemical, Co., 1986

Las propiedades físicas y químicas que presentan los BPC's mostradas en la Tabla 3.3, indican que la principal aplicación fue como dieléctricos en transformadores y condensadores eléctricos, asimismo se utilizan como aislamiento y refrigeración para dichos equipos; estas propiedades incrementaron su uso a nivel mundial.

Con el objeto de indicar fórmula, porcentaje de átomos de cloro y número de isómeros de algunos BPC's se presenta la Tabla 3.4

Tabla 3.4 Composición de BPC's por grupo de isómeros

Grupos de BPC's	Fórmula	Porcentaje de átomos de cloro	No. de Isómeros
Bifenilo	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	0	1
Monoclorobifenilo	C <sub>12</sub> H <sub>9</sub> Cl	19	3
Diclorobifenilo	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> Cl <sub>2</sub>	32	12
Triclorobifenilo	C <sub>12</sub> H <sub>7</sub> Cl <sub>3</sub>	41	24
Tetraclorobifenilo	C <sub>12</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>4</sub>	49	42
Pentaclorobifenilo	C <sub>12</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>5</sub>	54	46
Hexaclorobifenilo	C <sub>12</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>6</sub>	59	42
Heptaclorobifenilo	C <sub>12</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>7</sub>	63	24
Octaclorobifenilo	C <sub>12</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>8</sub>	66	12
Nonaclorobifenilo	C <sub>12</sub> HCl <sub>9</sub>	69	3
Decaclorobifenilo	C <sub>12</sub> Cl <sub>10</sub>	71	1

Fuente: Erickson, 1986

Tabla 3.5 Propiedades de estado de BPC's por grupo de isómeros

Grupos de BPC's	Estado Físico (1)	Punto de Fusión (°C) (2)	Punto de Ebullición (°C) (2)	Presión de Vapor (Pa) (25°C)
Bifenilo	S	71	256	4.9
Monoclorobifenilo	S/L	25-77	285	1.1
Diclorobifenilo	S/L	24.4-149.5	312	0.24
Triclorobifenilo	S/L	28-87	337	0.054
Tetraclorobifenilo	S/L	47-100	360	0.012
Pentaclorobifenilo	S/L	76.5-124.5	381	$2.6 \times 10^{-3}$
Hexaclorobifenilo	S/L	77-150	400	$5.8 \times 10^{-4}$
Heptaclorobifenilo	S/L	122-149	417	$1.3 \times 10^{-4}$
Octaclorobifenilo	S/L	159-162	432	$2.8 \times 10^{-5}$
Nonaclorobifenilo	S/L	182.8-206.5	445	$6.3 \times 10^{-6}$
Decaclorobifenilo	S	305.9	456	$1.4 \times 10^{-6}$

Notas: (1) Varía conforme al tipo de isómero, S sólido, L líquido  
 (2) Shiu and Mackay, 1986

Tabla 3.6 Propiedades relevantes de BPC's por grupo de isómeros

Grupos de BPC's	Peso Molecular (g/mol)	Gravedad Específica Aproximada	Solubilidad en Agua a (25°C) (g/m <sup>3</sup> )	Tasa de Evaporación a (25°C) (g/m <sup>2</sup> -h)
Bifenilo	154.2	1.0	9.3	0.92
Monoclorobifenilo	188.7	1.1	4.0	0.25
Diclorobifenilo	223.1	1.3	1.6	0.065
Triclorobifenilo	257.5	1.4	0.65	0.017
Tetraclorobifenilo	292.0	1.5	0.26	$4.2 \times 10^{-3}$
Pentaclorobifenilo	326.4	1.5	0.099	$1.0 \times 10^{-3}$
Hexaclorobifenilo	360.9	1.6	0.038	$2.5 \times 10^{-4}$
Heptaclorobifenilo	395.3	1.7	0.014	$6.2 \times 10^{-5}$
Octaclorobifenilo	429.8	1.7	$5.5 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-5}$
Nonaclorobifenilo	464.2	1.8	$2.0 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-6}$
Decaclorobifenilo	498.7	1.8	$7.6 \times 10^{-4}$	$8.5 \times 10^{-7}$

Fuente: Shiu and Mackay, 1986

De las Tablas 3.4, 3.5, y 3.6 se pueden mencionar los siguientes comentarios, a medida que aumenta el % de átomos de cloro el punto de ebullición se incrementa prevaleciendo el estado físico de los BPC's en estado sólido, con ello el aumento del peso molecular es proporcional al % de átomos de cloro, sin embargo, la solubilidad en el agua y la presión de vapor presentan un decremento inversamente proporcional con respecto al % átomos de cloro y al peso molecular.

No obstante, debido al desarrollo de la industria, los BPC's se utilizaron en diversos usos industriales, aparte de los que ya se conocían, según se observa en la Tabla 3.7 (Villegas, 1994; Monsanto, 1986)

Tabla 3.7 Usos principales de los BPC's

USOS PRINCIPALES DE LOS BPC's
Líquidos aislantes en capacitores y transformadores
En tintas de impresión
En la fabricación de pesticidas
Fluidos hidráulicas en bombas de difusión de aceite
Aplicaciones de forros de frenos
Laminación de cerámicas y metales
Capas de duplicados termográficos
Aditivos en pinturas epóxicas
Para la saturación de papeles
Retardantes de flama

Los usos actuales que se les da a los BPC's son en sistemas cerrados, con ello se minimiza el riesgo por contaminación ambiental, sin embargo, esta medida no garantiza que no haya contaminación al medio ambiente.

### 3.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS BPC's

Actualmente se conoce que los residuos de BPC's se encuentran en muchas áreas asociadas a zonas industriales y/o urbanas y que las cadenas alimenticias relacionadas con el medio ambiente que interactúa en esas zonas, presentan altos niveles de BPC's. No obstante, los patrones de incorporación de los BPC's al medio ambiente, se pueden advertir por dos medios y por los cuales se difunde en forma notable, como son el suelo y aire principalmente (Phillips, 1986); debido a que los BPC's pueden incorporarse al aire, ya sea por la evaporación de estos compuestos al usar sistemas abiertos, o por incineración de los materiales que los contienen; también pueden pasar, por derrames, a los sistemas de alcantarillado y de ahí, a las corrientes de agua, o bien a los sistemas terrestres, en donde se incorporan al resto del medio ambiente por evaporación. Una vez en la atmósfera, los BPC's se precipitan y pasan a los estuarios, océanos, ríos, lagos, y de ahí, a la cadena alimenticia en cuyo extremo superior se encuentra el hombre, lo anterior se ilustra en la figura 3.1 indicando el transporte dinámico de los BPC's en el medio ambiente.

En relación a la cantidad de BPC's que se encuentran en México, se estima que están almacenados más de 10 mil toneladas de desechos líquidos de BPC's y en uso aproximadamente más de 10 mil transformadores, que en conjunto sumarían alrededor de 35,400 toneladas aproximadamente (Villegas, 1994).

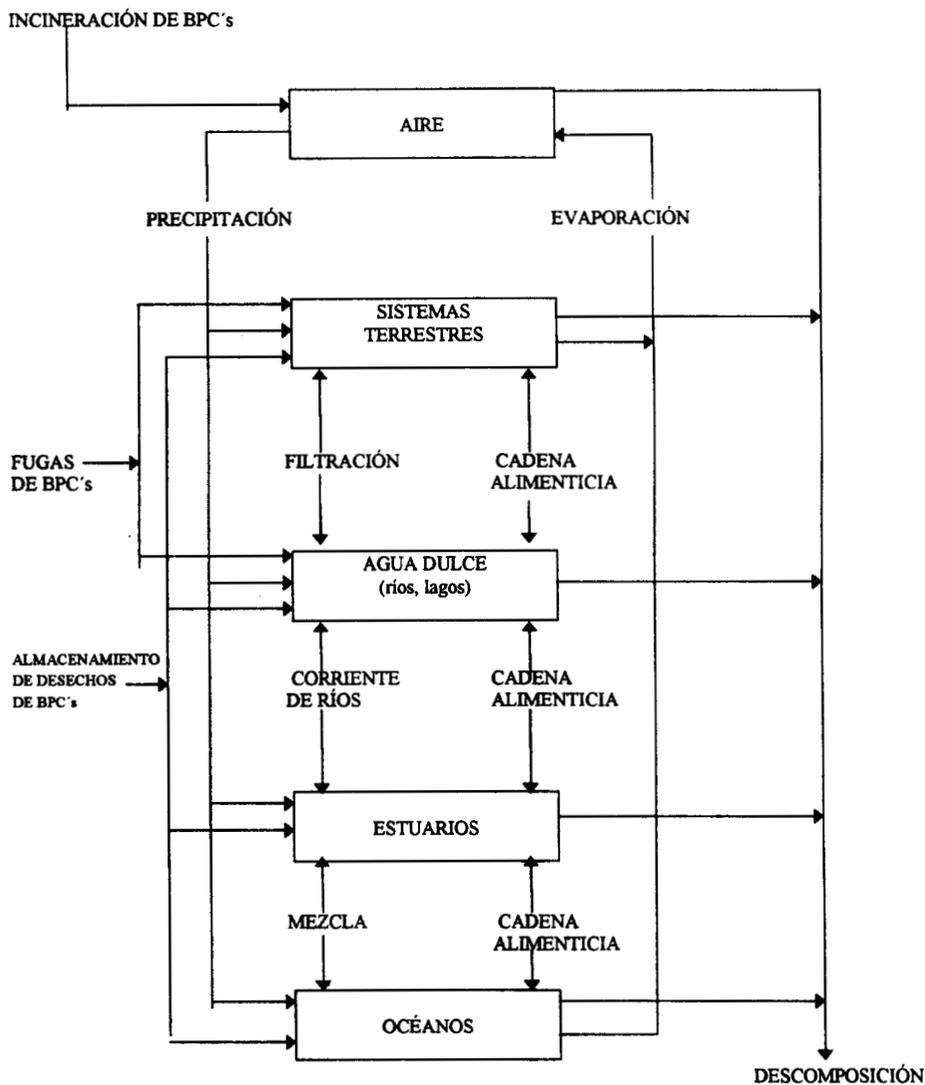


Fig. 3.1 Transporte dinámico de los BPC's en el medio ambiente  
Fuente: Villegas, 1994

Otras estimaciones en cuanto a cifras de distribución en el país (SEDESOL 1988), se presenta en forma general en la Tabla 3.8

Tabla 3.8 Distribución aproximada de BPC's en la República Mexicana

Zonas del País	En Uso (Kg)	Desechados (Kg)	Total (Kg)
Zona norte	222,374	59,069	281,443
Zona centro	1,061,724	206,866	1,268,608
Zona sur	192,112	54,998	247,110

Fuente: SEDESOL, 1988

Según se observa en la Tabla 3.8, el número total de BPC's distribuidos en México es de 1,797,161 Kg de los cuales el 70.58% de estos se encuentran en la zona centro y el 29.41% están distribuidos en la zona norte y sur del país, esta distribución es debida a la alta concentración industrial en la zona centro, originando una mayor aportación y concentración de BPC's en una región determinada.

Sin importar el volumen de BPC's existentes en México, ya sea en grandes o pequeñas cantidades, se puede identificar los procesos que contribuyen en forma directa o indirecta al transporte de BPC's al medio ambiente, estableciendo una relación industria-medio ambiente a partir de un modelo de transporte simplificado, según se ilustra en la figura 3.2

### 3.2 TOXICIDAD DE LOS BPC's

Los BPC's, son altamente tóxicos y bioacumulables, su comportamiento es similar al del DDT (Beurand and Harbel, 1990; Frank *et al*, 1993). Se han encontrado evidencias de su presencia en la atmósfera, suelo y agua; si bien no son volátiles, se introducen a la atmósfera por medio de los procesos de incineración, liberando pequeñas partículas las cuales se encuentran suspendidas (Phillips, 1986), y con el tiempo, algunas se precipitan, introduciéndose a los ecosistemas.

Sin embargo, el grado de toxicidad varía entre las especies, debido a dos factores; el primero de ellos se relaciona con el metabolismo y los mecanismos fisiológicos de cada especie; el segundo depende del grado de cloración de la molécula; siendo esta última una razón del porque el tiempo de vida de los BPC's no es determinado de manera exacta. (Villegas, 1994; Shaw and Connell, 1986)

Los BPC's tienen la tendencia de acumularse en los depósitos de grasa tanto de animales como en humanos, incrementando el riesgo de cáncer y la existencia de quistes o lesiones en el sistema reproductor femenino principalmente (Shaw and Connell, 1986).

Estudios sobre la toxicidad de los BPC's indican que su potencialidad dañina esta en función del grado de cloración del compuesto, entre los más tóxicos son los que contienen dos átomos de cloros en posición para y al menos dos átomos de cloros en la posición meta (Safe, 1987).

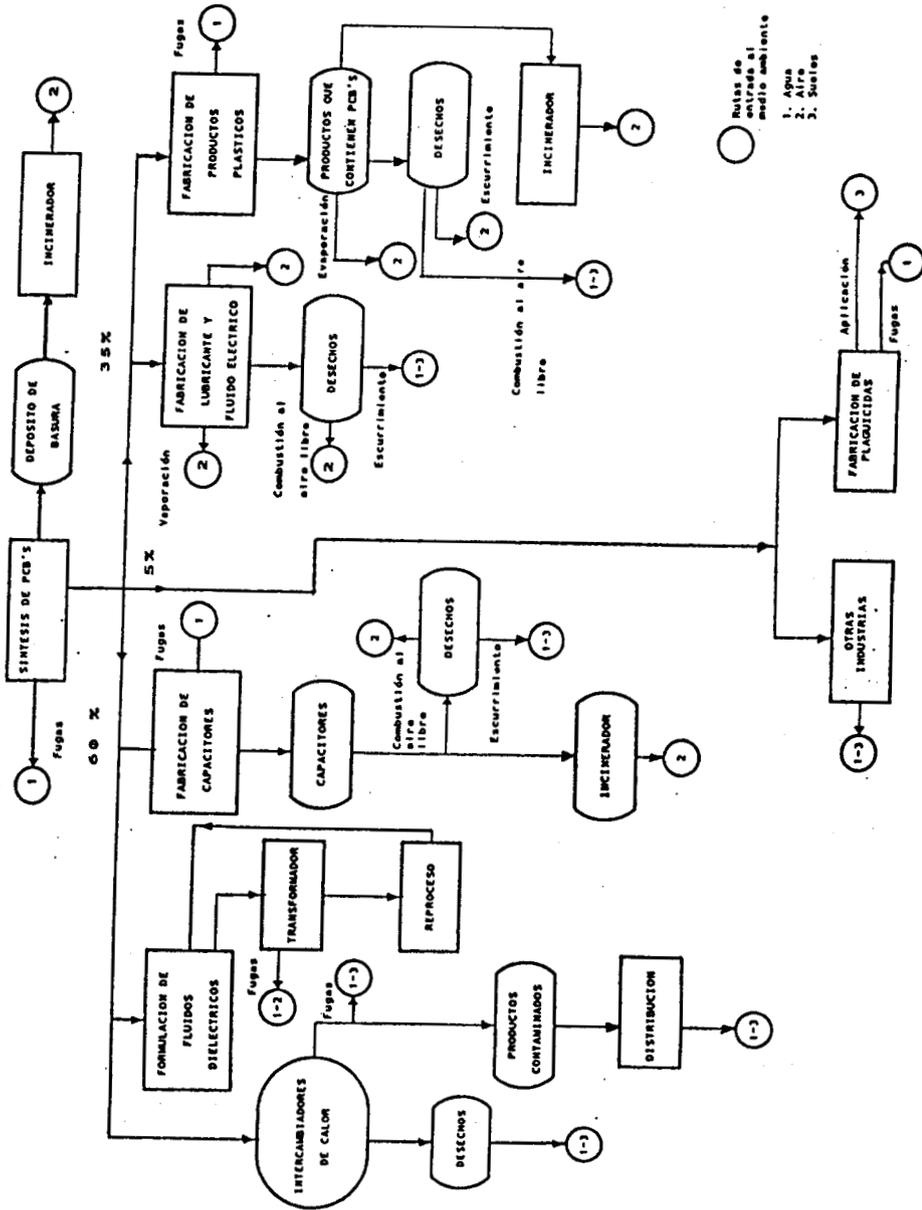


Fig. 3.2 Transporte dinámico de BPC's Industria-Medio Ambiente  
Fuente: Villegas, 1994

El grado de toxicidad de los BPC's varia entre las diferentes especies marinas, debido a la capacidad metabólica y los mecanismos fisiológicos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA), estima que el nivel máximo de BPC's en peces es de 0.5 ppb, si se destinan para fin alimenticio dependiendo de la especie que se trate (Food, Drug Administration, 1994 ; Quemerai y Lemieux, 1994). Los límites de concentración de los BPC's para el ambiente acuático van de 0.014 mg/l a 0.30 mg/l para agua dulce y agua salada respectivamente, en un periodo de 24 hrs. Para ambos casos se obtiene un daño agudo hacia las especies marinas, por ejemplo, los ostiones, frenan su crecimiento después de exposiciones de 96 hrs a cantidades tan pequeñas como 100 ppb y pueden acumular hasta 33 ppm en sus tejidos; (Villegas, 1994) en otro aspecto, los BPC's provocan inhibición de la fotosíntesis y crecimiento de algas, disminución en la reproducción de ostras y camarones.

En los mamíferos, especialmente los roedores y aves como son patos silvestres y pollos, se ha encontrado que a mayor contenido de cloro, mayor es la toxicidad (Erickson, 1986). En 1962 se demostró que el Arocloro 1242 era el responsable por la mortandad de pollos de corral, el cual había sido cubierto con pintura en cuyos componentes estaba presente Arocloro, muriendo los pollos por el agrandamiento del hígado (ATSCA, 1996). Para el caso de los roedores, se demostró que la ingestión de BPC's produce carcinoma hepático, siendo el potencial de toxicidad promedio en roedores de 1.9 mg/Kg (Villegas, 1994)

Según investigaciones sobre la toxicidad de BPC's en los seres humanos, indican, que causan atrofia amarilla del hígado, mientras que las exposiciones crónicas ocasionan dermatitis. Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) indica que los BPC's incrementan la probabilidad de desarrollar cáncer de piel, así como en el tracto digestivo y alteraciones en el sistema endocrino (Safe, 1987).

La información epidemiológica más importante sobre los efectos en los seres humanos, se obtuvo en Japón, en 1968, durante un caso de intoxicación masiva de más de 350 personas que ingirieron aceite de salvado de arroz contaminado con BPC's. Se observó que los síntomas de envenenamiento se presentaron a dosis de 500 mg de BPC's (Erickson, 1986), dichos síntomas fueron erupciones y alteraciones en la pigmentación de la piel, derrames en los ojos, palidez, fatiga, vómitos y cáncer en estomago y piel.

#### **4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Considerando los antecedentes sobre BPC's, es importante llevar a cabo acciones enfocadas para la eliminación de los mismos, por medio del desarrollo de tecnologías capaces de cubrir esta prioridad y al mismo tiempo considerar la relación costo beneficio de una manera equilibrada; por lo tanto la justificación de esta investigación plantea los siguientes argumentos:

Establecer un procedimiento que permita realizar una evaluación técnico económica de procesos o tecnologías desarrolladas para la degradación de BPC's en suelo. Este procedimiento se podría aplicar a cualquier tipo de proceso o tecnología sin importar cual sea su finalidad o sin considerar el contaminante presente en suelo, o sedimentos lacustres.

Es necesario describir tecnologías para seleccionar en forma objetiva la más conveniente considerando aspectos técnico - económicos a partir de la eliminación de BPC's presentes en suelo principalmente. Con base en esto, se propone un procedimiento, que involucre una toma de decisiones, sobre una tecnología desarrollada para eliminar BPC's

#### **5 OBJETIVOS**

##### **5.1 Objetivo general**

Aplicar un método cuya finalidad sea ayudar en la toma de decisiones por medio de un procedimiento que considere diferentes criterios (multicriterio) sobre un conjunto de alternativas definidas en un universo conocido, que permita evaluar diferentes tecnologías y determinar cual es la más adecuada.

##### **5.2 Objetivos particulares**

Realizar una búsqueda bibliográfica a nivel internacional considerando cualquier medio posible con el fin de obtener tecnologías diferentes entre sí y que hayan sido desarrolladas para la eliminación de BPC's

Adquirir, sistematizar evaluar y seleccionar tecnologías que hayan sido desarrolladas para remediar suelos o sedimentos contaminados con BPC's por medio de procesos biológicos, físicos, químicos o cualquier combinación de los tres.

Evaluar, seleccionar y sistematizar la información sobre tecnologías obtenidas, para determinar en cada una de ellas, el tipo de proceso, eficiencia, campos de aplicación, status, infraestructura y costos; por medio de una metodología previamente establecida.

## **6. METODOLOGÍA**

Para cubrir los objetivos antes indicados, se utilizó la siguiente metodología la cual se describe a continuación.

### **6.1 Fuentes de Información**

1. Se realizó una búsqueda bibliográfica en instituciones académicas a nivel superior, como son: UNAM, UAM, IPN, CINVESTAV, e instituciones afines dentro del campo de la investigación relacionadas con el tema de remediación de suelo contaminados con BPC's.
2. Se consultó a las instituciones gubernamentales que estuvieran relacionadas con la problemática ambiental en materia de contaminación en suelos, estas instituciones fueron: SEMARNAP, PROFEPA, INE, PEMEX y CFE, con el objeto de encontrar planes o programas de saneamiento en sitios identificados por contaminación de BPC's, así como las posibles tecnologías que se aplican para remediar un lugar de interés.
3. Se consultó en los consulados de diferentes países que cuentan con tecnologías desarrolladas en la remediación de suelos contaminados con BPC's, con el fin de obtener tecnologías dedicadas a esta problemática, así como instituciones que concertan o avalan estas tecnologías, los consulados a los que se recurrió fueron: Alemania, Austria, Australia, Canadá, EE.UU., España, Italia y Reino Unido.
4. Se realizó la búsqueda en internet, bancos de datos y organizaciones no gubernamentales relacionadas directa o indirectamente con el tema de los BPC's como contaminante.
5. Se llevo a cabo una búsqueda en congresos o seminarios dedicadas al tema de BPC's, y en bancos de datos a nivel internacional consultando al Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) perteneciente a la SECOFI.

### **6.2 Recopilación de tecnologías**

Se obtuvieron tecnologías distintas entre sí, y de manera general se identificaron conceptos que se consideran para un proceso de remediación dado, tales como: eficiencia del proceso, campos de aplicación, costos del proceso, status de la tecnología y lugar y fecha de aplicación de cada tecnología, identificando de manera preliminar los conceptos que distinguen entre una tecnología y otra, así como la clasificación de las mismas de acuerdo al tipo de proceso que presentan, ya sea un proceso químico, biológico, físico o mixto.

### **6.3 Sistematización de la información de tecnologías**

La sistematización de la información de tecnologías se realizó al mismo tiempo en que se obtenían las diferentes tecnologías, clasificándolas de acuerdo a su descripción y contenido de cada una de ellas.

Para realizar una sistematización de la información de cada tecnología, de manera objetiva y poder analizar cada una de ellas desde el punto de vista técnico, económico y de seguridad, se establecieron previamente 11 factores o criterios de evaluación. Estos factores se determinaron de tal manera que fueran independientes entre si y al mismo tiempo poder clasificarlos en tres grandes grupos: factores técnicos, factores económicos y factores complementarios, estos factores se enlistan en la Tabla 6.1 y son el primer resultado que se obtuvo, por lo que la explicación y definición de cada uno de ellos se presenta en el capítulo correspondiente de resultados y discusión.

Tabla 6.1 Listado de los factores de evaluación

No.	FACTORES DE EVALUACION	OBSERVACIONES
1	Tipo de tecnología aplicada	Diferentes tecnologías que se conocen, aerobia, anaerobia, química, física.
2	Técnicas auxiliares utilizadas	Consideraciones previas antes de aplicar una tecnología en particular.
3	Descripción del proceso	Conocer condiciones específicas y etapas del proceso.
4	Eficiencia del proceso	Determinar condiciones iniciales y finales a partir de un porcentaje de eliminación.
5	Campos de aplicación	Suelo, concreto, sedimento, ladrillo, acero, madera, o cualquier otro material.
6	Bioseguridad	Determinar si la concentración remanente es adecuada y garantiza su saneamiento
7	Costos del proceso	Establecer una relación de costos contra volumen de contaminante eliminado
8	Infraestructura requerida para su aplicación	Tipo de equipo así como material utilizado para la aplicación de cada tecnología.
9	Status de la tecnología	La disponibilidad y desarrollo de cada tecnología, experimental, en campo.
10	Institución que desarrolla o aplica esta tecnología	Centro de investigación o compañía privada que ha desarrollado su propia tecnología.
11	Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente	Lugares de aplicación para corroborar las condiciones actuales del lugar.

Es conveniente indicar que el 90% de la descripción de 24 tecnologías fue obtenida de manera directa a partir de los reportes que cada compañía elabora y presenta en congresos, conferencias o foros ante instituciones privadas o gubernamentales, para su evaluación o aprobación de la misma, y en algunos casos a través de bancos de datos dedicados a la búsqueda de patentes a nivel internacional; para ello se enlista los nombres de las compañías así como su respectiva tecnología por procesos.

Las características de los diferentes procesos de tecnologías recopiladas se cuenta con las siguientes:

- ⇒ Proceso biológico 6 tecnologías.
- ⇒ Proceso químico 9 tecnologías.
- ⇒ Proceso físico 4 tecnologías.
- ⇒ Combinación de procesos 5 tecnologías
  - combinación de procesos químico-físico 4
  - combinación de proceso químico-biológico 1

Resultando un total de 24 tecnologías; mismas que a continuación se enlistan por procesos biológicos, químicos, físicos y mixtos. La descripción de cada tecnología recopilada se presenta en la parte correspondiente al anexo 1 de esta investigación.

### **Procesos biológicos**

1. Proceso biotecnológico de biodegradación eliminación de PCB'S o productos que los contengan  
Legorreta López Edgar, Mexico, D.F. [Tec. O] (IMPI, Mar. 1994)
2. Biodegradación de sedimentos contaminados con PCB'S y PAH  
Aluminum Company of America, Alcoa Center, Pennsylvania [Tec. P] (PCB Seminario, 1995)
3. Limpieza de desechos por bacterias.  
Exxon Valdez Oil, Inc. [Tec. Q.] (Tom Pope, 1990)
4. Desarrollo de un cultivo microbiológico en condiciones anaerobias para la biodegradación con PCB'S  
Michigan Biotechnology Institute [Tec.R.] (PCB Seminario, 1995)
5. Tratamiento de biodegradación In-Situ  
General Electric, Inc. [Tec. S.] (Harry M Freman, 1995)
6. Biotransformación de suelos con PCB'S  
Tennessee Vally Authority's Enviromental Research Center [Tec. T] (PCB Seminario, 1995)

### **Procesos químicos**

1. Descontaminación de sólidos y partículas.  
General Electric Company, New York, U.S.A. [Tec. F] (U.S. Patent, Jun 1995)
2. Proceso de extracción y equipo para remover PCB'S en suelos y sedimentos.  
ENSR Corporation, Houston, U.S.A. [Tec. G] (Patent Cooperation Treaty, Dic. 1988)
3. Tratamiento de suelo contaminado con PCB'S por medio de la extracción de solventes.  
Terra-Kleen Response Group, Inc. [Tec. H] (PCB Seminario, 1995)
4. Extracción por medio de surfactantes no ionicos de contaminación orgánica.  
Trustees of Princeton University, New York, U.S.A. [Tec. I] (U.S. Patent, Oct. 1995)
5. Descontaminación de suelo y agua por extracción con surfactantes.  
GHEA Associates [Tec.J] (Itzhak Gotlieb, 1993)
6. Selección de solventes y surfactantes para la eliminación de PCB'S  
Roy F. Weston, Inc. (WESTON), Concord, California [Tec K] (PCB Seminario, 1995)
7. Descontaminación de PCB'S por aceite en transformadores.  
TechXtract Technology, Texas, U.S.A. [Tec. L] (PCB Seminario, 1995)
8. Remediación de residuos.  
Radian Corporation [Tec. M] (Conference Env. Engineering, 1989)
9. Proceso de descontaminación.  
Chemical Waste Management, Inc. IL, U.S.A. [Tec. N] (European Patent A., Jun. 1993)

### **Procesos Físicos**

1. Proceso para remover compuestos volátiles del suelo y lodos contaminados con PCB y materiales peligrosos  
Chemical Waste Management, IL, U.S.A. [Tec. U] (U.S. Patent Document, Sep. 1995)
2. Método y aparato para tratar sedimentos contaminados con Bifenilos Policlorados  
William C. Meenam, IL, U.S.A. [Tec. V] (IMPI, May. 1991)
3. Tratamiento de agua, aire y suelo con lampara de UV  
Ultraviolet Energy Generator, Inc. (UVERG) [Tec. W] (Alex Wekhof, 1991)
4. Destrucción de askareles por un proceso de gasificación  
Universidad de Columbia, Ohi, U.S.A [Tec. X] (PCB Seminario, 1995)

### **Combinación de procesos**

1. Incremento de la evaporación de compuestos orgánicos y PCB's  
General Electric Company, New York, U.S.A. [Tec. A] (U.S. Patent, Jul. 1995)
2. Degradación de Bifenilos Policlorados  
Wilwerding Michael, U.S.A. [Tec. B] (Patent Cooperation Treaty, Abr. 1990)
3. Proceso de reducción química en etapa gaseosa y unidad de desorción térmica  
Eco. Logic International, Inc. (ECO LOGIC) [Tec. C] (SITE-EPA/522, 1994)
4. Tratamiento químico-biológico  
The Institute of Gas Technology, IL, Chicago, U.S.A. [Tec. D] (SITE-EPA/526, 1994)
5. Estabilización de desechos por medio de solidificación tecnológica  
The Soliditech, Inc. Houston, Tx, U.S.A. [Tec. E] (Walter E. Grube, 1990)

Al obtener la sistematización de cada tecnología así como la determinación de cada factor de evaluación, se procede a aplicar un método el cual permita determinar que tecnología es la más apropiada para la eliminación de suelos contaminados con BPC's.

## **7. BASES MATEMÁTICAS DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN Y CALIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS**

Con el objeto de determinar que tecnología es la más apropiada, es necesario establecer un método el cual nos permita evaluar y determinar que tecnología considera factores técnicos económicos y de seguridad con un orden de igual importancia.

Por lo tanto, se presenta un método de ayuda para la toma de decisiones multicriterio (Trejo A. y Tulio Guillen, 1994) con el fin de ayudar a los evaluadores sobre la ponderación relativa de criterios, por tanto, en primer termino se presentan las ecuaciones y funciones matemáticas que dan origen a este método, mismas que son la base de la integración y formación de matrices, y como segundo término se muestra la aplicación del método.

En la teoría de utilidad multiatributo o multicriterio se supone que para cada criterio "i" existe una función real  $U_i()$  sobre el conjunto "A" de alternativas, denominada función de utilidad del atributo "i", de manera que si respecto al atributo "i" la alternativa "x"  $\in$  "A" es mejor que la alternativa "y"  $\in$  "A", entonces

$$U_i(\mathbf{x}) - U_i(\mathbf{y}) > 0$$

y reciprocamente, si esta desigualdad se cumple respecto al atributo "i", la alternativa "x" es mejor que la alternativa "y". Bajo ciertas condiciones existe un modelo global de utilidad de la forma:

$$\mathbf{x} P \mathbf{y} \text{ si } U(U_i(\mathbf{x}), \dots, U_n(\mathbf{x})) - U(U_i(\mathbf{y}), \dots, U_n(\mathbf{y})) > 0$$

Donde  $\mathbf{x} P \mathbf{y}$  significa que la alternativa  $\mathbf{x}$  es mejor que la alternativa  $\mathbf{y}$ , y  $U(U_i(), \dots, U_n())$  es una función de utilidad que modela las preferencias globales. En particular esta función puede ser aditiva:

$$U(U_i(\mathbf{x}), \dots, U_n(\mathbf{x})) = \sum_i p_i U_i(\mathbf{x})$$

No es un problema trivial el determinar un conjunto de atributos y sus correspondientes escalas para construir un modelo coherente sobre posibles alternativas. En este modelo la alternativa "x" es mejor que la "y", lo que equivale a  $u(x) > u(y)$ , por ello la relación  $\sum_i p_i (x_i - y_i)$  determina el resultado de comparar preferencialmente "x" con "y" según resulte positiva, negativa o cero, debe considerarse que "x" es mejor que "y", entre "x" y "y" hay indiferencias o "y" es mejor que "x", respectivamente, estableciendo un modelo de ponderación por pesos.

Para simplificar la notación, se supone que cada alternativa está definida por un vector  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  y que  $U_i(\mathbf{x}) = x_i$ ; en tales términos una función de utilidad aditiva se representa como

$$U(\mathbf{x}) = \sum_i p_i x_i$$

Para considerar las imprecisiones en la ponderación relativa de los criterios, a cada criterio "y" se le asigna un intervalo de peso específico  $[m_i, M_i]$ , en vez de un peso puntual. Los intervalos se fijan de modo que para cada combinación de pesos  $P_i$ , con  $P_i \in [m_i, M_i]$ , el modelo de ponderaciones puntuales resultante es aceptable. Puede ocurrir un caso extremo de indiferencia entre dos alternativas (x,y), por lo que, al considerar los intervalos de pesos considerados, el modelo distingue preferencialmente dos alternativas porque  $p'(x-y) > 0$  para toda combinación factible de pesos  $p'$ . Esto ocurre si  $x_i = y_i$  para todo criterio "y" en que tanto  $m_i$  como  $M_i = 0$

Según lo anterior, el indicador de credibilidad  $P(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  se encuentra en una escala continua entre cero y uno, donde las preferencias en sentidos opuestos pueden tener simultáneamente credibilidades distintas a cero, pero su suma vale la unidad. Por lo tanto es útil hacer discreta esta escala en 3 niveles progresivos de credibilidad sobre la preferencia: indiferencia (y) significa que la preferencia de una alternativa sobre la otra no es clara; preferencia (q) indica que la preferencia de una alternativa sobre otra es ya perceptible pero podría modificarse si ocurren cambios relativamente pequeños en los intervalos de peso; preferencia (f) señala que la preferencia de una alternativa sobre otra es suficientemente clara como para eliminar cualquier duda al respecto. Por lo tanto los diferentes intervalos no se refieren a la intensidad de las preferencias sino a lo creíble de la afirmación "x" domina a "y" estableciendo una relación sobre la diferencia en las calificaciones.

Por lo tanto, es útil hacer discreta esta escala en tres niveles progresivos de credibilidad, para ello se dan factores de evaluación los cuales se relacionarán entre sí a partir de diferentes matrices establecidas.

Dicha escala discreta está determinada por dos valores 1 y 0, denominados umbrales de indiferencias y preferencias respectivamente. Así, la fidelidad con que el modelo resultante represente las preferencias del decisor, depende de la información disponible y de lo apropiado del método para el problema considerado. Independientemente del procedimiento usado no existen reglas que garanticen que el modelo resultante será tan fiel y confiable como se requiere, teniendo en cuenta que cualquier modelo utilizado depende de la experiencia del evaluador, del grupo interdisciplinario que se forme y del conocimiento que se tenga en manejar estas técnicas en áreas afines. Sin embargo, se proporcionan algunas recomendaciones que pueden ayudar en este sentido.

## 7.1 APLICACIÓN DEL MODELO MULTICRITERIO

El método multicriterio tiene la finalidad de seleccionar las mejores alternativas de un problema en particular o específico, unificando criterios a partir de la colaboración de un grupo multidisciplinario. Asimismo, este método es posible adaptarlo a diferentes problemas de interés. Como ejemplo de ello, este método se utilizó para la selección de sitios en una zona específica para la instalación de una Central Nucleoeléctrica en el estado de Kansas, EE.UU. (Shahid *et al.*, 1979). Con base en lo anterior, se aplica este método con el objeto de realizar una evaluación técnico económica de las 24 tecnologías obtenidas, por lo tanto se mencionan a continuación las consideraciones básicas para la aplicación de este método.

1. Seleccionar los factores o atributos de decisión de modo que sean, de ser posible, independientes entre sí. Esto significa en términos generales que los criterios de evaluación de cada atributo permitirá comparar preferencialmente cualquier colección de alternativas que difieren solo en ese atributo.
2. Especificar, el papel o función de cada factor dentro de la evaluación global y elegir de acuerdo con ello la escala del mismo. Por ejemplo, a partir de cierto valor del factor las mejoras son cada vez menos importantes, porque se presenta un fenómeno de saturación respecto al factor considerado. Caso extremo de esta situación se presenta cuando factores muy importantes en la evaluación global toman valores muy pobres, lo que puede implicar la eliminación de la alternativa. En este caso puede ser apropiada una escala con dos valores, (sí o no; 1 o 0).
3. Clasificar y de ser posible agrupar los factores con características similares en la evaluación o que califiquen aspectos que puedan ser agrupados en alguno o más general.
4. Integrar un grupo de evaluadores con distintas disciplinas, con el objeto de conocer diferentes puntos de vista sobre factores de evaluación, las tecnologías conocidas y la aplicación del método; así se evitará tener una tendencia sobre un tipo de tecnología dada.

Con base en lo anterior, se describe la metodología para efectuar la evaluación cualitativa de los diversos factores; esta metodología es con el fin de establecer las diferentes matrices necesarias para la aplicación correcta del método, considerando los siguientes pasos.

- 1.- Realizar una **Matriz de Ponderación de Factores**, esta matriz, integra a todos los Factores de Evaluación establecidos, con el objeto de poder relacionarlos entre sí; la relación de estos factores se establece por medio de la asignación de valores establecidos dentro de una escala de acuerdo al grado de mayor o menor importancia según se asigne.

La importancia relativa de cada Factor de Evaluación se establece confrontando cada factor entre sí, asignándoles un valor numérico de acuerdo a una escala establecida, esta escala se presenta en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Escala de importancia de los factores de evaluación

Escala	Descripción
1	Si el factor del renglón tiene mayor importancia que el de la columna
0.5	Si ambos factores tienen la misma importancia
0	Si el factor del renglón tiene menor importancia que el de la columna

Después de asignarles el valor numérico según la escala establecida a todos los Factores de Evaluación, se realiza una suma de estos valores de escala sobre el mismo "renglón", obteniendo un valor total que se suman sobre la misma "columna" obteniendo una Sumatoria de valores totales, finalmente se realiza un cociente de valor total y la sumatoria de valores totales, el resultado del cociente se multiplica por cien, obteniendo como resultado un valor de ponderación por cada factor; integrando así la Matriz de Ponderación; es este primer paso los 4 evaluadores participantes, expresan su punto de vista de manera independiente obteniendo como resultado la formación de 4 matrices así como los factores de evaluación más importantes.

2. La evaluación cualitativa de tecnologías, se realiza en función de los datos obtenidos de la Matriz de Ponderación; para ello, se enlistan todos los factores de evaluación seguido del Valor Ponderado respectivamente, considerando que los renglones de la matriz corresponden a los Factores de Evaluación y las columnas a las Tecnologías Existentes.

Para relacionar renglones con columnas, se determina previamente una escala de calificaciones, bajo el siguiente criterio:

- 10 Bueno
- 7 Regular
- 5 Malo
- 2 Insuficiente

A cada intersección de renglones con columnas, se asigna un valor de acuerdo a la escala esta calificación se realiza para todas las intersecciones posibles conformando la **Matriz de Atributos de Tecnologías**; esta matriz establece la calificación de cada tecnología en función de la información obtenida de la misma; relacionando así, tecnologías contra factores de evaluación; a partir de este paso, solo un evaluador realiza esta actividad (haciendo una adaptación a la metodología dada las características de la presente investigación), pero se consideran los resultados obtenidos en el primer paso.

3. Posteriormente se realiza la calificación de tecnologías; por medio del producto de el valor ponderado por el valor numérico de la escala de calificaciones correspondiente; esta operación se ejecuta en cada renglón. El resultado de este producto es la Calificación Ponderada de los Factores de Evaluación; obteniendo la **Matriz de Ponderación y Calificación de Tecnologías**, Finalmente se realiza una sumatoria de columnas, la sumatoria que resulte ser la mayor, representará a la o las tecnologías más apropiadas para la eliminación de BPC's.
4. Una vez obtenidas las tres matrices antes indicadas, se procede a determinar la frecuencia de coincidencias a partir del universo de tecnologías conocidas, para ello se identifican las tecnologías que sobresalen de la matriz de ponderación y calificación de tecnologías; formando una tabla de **Frecuencias de Coincidencias**, la cual indica el tipo de tecnología y la frecuencia de coincidencias, graficando estos valores. Este criterio determina, que tecnologías se consideran como pre-seleccionadas.
5. Una vez que se determina las tecnologías más apropiadas, se realiza una **Simplificación e Importancia de los Factores de Evaluación**, esto es con el objeto de determinar que factores de evaluación son los más importantes así como los que se aplicarán a las tecnologías que hayan resultado como pre-seleccionadas.

Para establecer cuales son los factores de evaluación más adecuados, se realizó a partir de dos criterios: el primero fue tomar en cuenta los resultados de la matriz de ponderación de factores, para ello de establecieron los factores que son considerados importantes para cada evaluador, seleccionando así aquellos que sean repetitivos; el segundo criterio fue seleccionar los factores de evaluación que obtuvieron una mayor calificación a partir de los resultados obtenidos de la matriz antes mencionada; ambos criterios al momento de agrupar los factores y obtener una calificación ponderada; determinan el valor ponderado de los factores en función de los 4 evaluadores.

6. Una vez que se determinan los factores de evaluación más importantes y conociendo cuales son las tecnologías pre-seleccionadas; se establece una relación entre ambos, a partir de la **Matriz de Simplificación de Tecnologías**.

Esta matriz estará integrada por los factores seleccionados así como el valor porcentual de cada factor y las tecnologías pre-seleccionadas, la formación de este matriz estará a partir de considerar la información que existe para cada tecnología como base con el fin de proporcionar una calificación, si no se cuenta con la información necesaria se le asignará una calificación de cero, pero si se tiene la información, la calificación asignada estará en función con la información recopilada.

7. El último paso es multiplicar la calificación de cada tecnología por el valor porcentual de cada factor, posteriormente se realiza una sumatoria y la suma que resulte mayor, indicará el orden de importancia de las tecnologías pre-seleccionadas, finalizando así el proceso de evaluación de tecnologías para la remediación de suelos contaminados con BPC's, presentando en el siguiente capítulo las matrices que corresponden a la metodología antes descrita.

## **8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En función de la problemática expuesta sobre contaminación por BPC's así como las posibles tecnologías consideradas y llevando a la práctica la aplicación del método multicriterio para seleccionar una o varias tecnologías; se presentan a continuación, los resultados de esta investigación comenzando por la descripción de los 11 factores de evaluación en 3 grandes grupos, la presentación de las matrices y su respectiva explicación y la aplicación de criterios de discusión de las mismas.

### **8.1 DEFINICIÓN DE LOS FACTORES DE EVALUACIÓN**

Para determinar que tecnología es la más adecuada para la remediación de suelos contaminados por BPC's así como otros compuestos (HC, BTX.), fue necesario establecer una serie de factores de evaluación, con el fin de evaluar y seleccionar la tecnología más apropiada, considerando características técnicas y económicas principalmente, los factores considerados son los siguientes.

#### **Factores técnicos**

1. Tipo de tecnología aplicada
2. Técnicas auxiliares utilizadas
3. Descripción del proceso
4. Eficiencia del proceso
5. Campos de aplicación
6. Bioseguridad

#### **Factores económicos**

7. Costos del proceso
8. Infraestructura requerida para su aplicación

#### **Factores complementarios**

9. Status de la tecnología
10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología
11. Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente

A continuación se define cada uno de los factores de evaluación.

#### **1. Tipo de tecnología aplicada**

Está referido a las diferentes técnicas que actualmente se conocen y han sido desarrolladas para la remediación de suelos contaminados por (BPC, HC, BTX.) estas tecnologías contemplan conceptos biológicos, bioquímicos, físicos o la combinación de los tres; las diferentes tipos de tecnologías quedaron agrupados en los casos siguientes.

### **Aerobio**

Proceso que demanda la presencia de oxígeno a nivel molecular con el fin de aceptar electrones para el crecimiento y multiplicación de microorganismos capaces de degradar contaminantes.

### **Anaerobio**

Proceso que requiere la presencia de oxígeno a nivel molecular o a nivel celular con el objeto de que por medio de nutrientes realicen un crecimiento y multiplicación de microorganismos capaces de degradar contaminantes

### ***In-situ***

Procedimiento que se realiza en el mismo lugar donde se encuentren los contaminantes

### ***Ex-situ***

Procedimiento que se realiza afuera o en un lugar alternativo en donde se encuentran contaminantes

### **Aplicación de surfactantes**

Aplicación de sustancias químicas cuya finalidad es proporcionar las condiciones necesarias para facilitar la aplicación de algún proceso de remoción de contaminantes

### **Proceso térmico**

Proceso que consiste en someter a los contaminantes (BPC's, HC, BTX.) a altas temperaturas (400°C o más), por medio de reactores o cámaras donde se realiza una pirólisis, con el fin de eliminarlos

## **2. Técnicas auxiliares utilizadas**

Al llevar a cabo un proceso de remediación de suelos contaminados, y al inicio del procedimiento para la eliminación de éstos, se requiere en algunos casos tomar en cuenta ciertas consideraciones técnicas previas antes de aplicar una tecnología en particular, estas consideraciones son:

### **Prueba piloto**

Relaciona las posibles pruebas previas al aplicar una tecnología en particular; en ciertos casos se requiere de realizar una prueba tipo experimental con el fin de determinar de manera cualitativa el grado de contaminación en el sitio previo al inicio del proceso de remediación..

### **Cuantificación del grado de contaminación**

Considera la necesidad de tomar muestras del sitio y analizarlas en laboratorio, para determinar el grado de contaminación y poder determinar el tipo de tecnología más conveniente a aplicar.

### **Limpieza previa del sitio contaminado**

Se toma en cuenta la configuración del terreno, así como las condiciones inapropiadas que existen en el sitio, (maquinaria, residuos municipales, equipo fuera de operación, topografía del terreno irregular.)

Estos aspectos se determinaron como una técnica auxiliar o de apoyo para una tecnología en particular; sin embargo, no en todos los casos se requiere de estas consideraciones, todo depende del grado de desarrollo de la tecnología o bien del tipo de tecnología.

### **3. Descripción del proceso**

Al aplicar una tecnología dada, se requiere de conocer el procedimiento de la misma, esto implica determinar un proceso dado por una serie de pasos que integran ciertas características y condiciones específicas, conformando así etapas del proceso, estas etapas estarán enfocadas a un objetivo determinado, y con ello se obtendrán resultados favorables; sin embargo, dada la complejidad del problema y la variedad de tecnologías existentes, la descripción del proceso se realizará a nivel de ingeniería básica, es decir se da un descripción general del proceso debido a la falta de disponibilidad para obtener información.

### **4. Eficiencia del proceso**

La determinación de la eficiencia de una tecnología, está dada en función de tres factores: porcentaje de remoción, concentración inicial y final del contaminante y tiempos de remoción, con base en estos factores, podemos estimar una tasa de remoción de contaminante, tomando en cuenta condiciones iniciales y finales al aplicar una tecnología en particular.

### **5. Campos de aplicación**

Este factor determina la ampliación del uso de una tecnología, en función del campo de aplicación, enfocándose a la capacidad para eliminar contaminantes presentes en el suelo, sedimentos, madera, acero, concreto, ladrillo; en la medida que una tecnología sea capaz de aplicarse en varias circunstancias y campos de aplicación, mayor será su demanda.

### **6. Bioseguridad**

Al concluir un proceso de remediación, por procesos biológicos, existirá un remanente del contaminante resultando una concentración final del mismo el cual podríamos aceptar como *seguro*, sin embargo, la bioseguridad se debe contemplar en el sentido de realizar la evaluación de los posibles riesgos al ambiente debido a la aplicación de cualquier organismo modificado ó no genéticamente, lo que implica considerar el remanente tanto de contaminante como organismo exclusivamente desde el punto de vista pos-tratamiento, considerando los criterios de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA), el Instituto Nacional de Ecología (INE), Secretaría de Salud (SS) o el Comité Nacional de Bioseguridad Agrícola (CNBA)

### **7. Costos del proceso**

Con el objeto de evaluar la aplicación de cierta tecnología desde el punto de vista económico y así determinar si es rentable considerando el aspecto social y de seguridad, es necesario conocer el costo de la misma, tomando en cuenta desde su inicio hasta el tiempo total requerido para la implementación del proceso, y en función de la cantidad de materia removida, poder determinar una relación costo - beneficio.

## **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Al llevar a cabo la aplicación de una tecnología en particular, se requiere en algunos casos de infraestructura adecuada para garantizar la eficiencia y cumplir con su objetivo. Esta infraestructura está determinada por equipo de laboratorio, equipo de muestreo en campo, instalación y/o construcción de digestores, reactores biológicos, reactores térmicos, equipo de computo; y con ello determinar de manera indirecta la factibilidad de cada tecnología

## **9. Status de la tecnología**

Con el objeto de evaluar adecuadamente una tecnología es necesario conocer su status, esto implica determinar si la tecnología se encuentra en experimentación, en etapa de evaluación por algún organismo competente (EPA-SITE), aplicado para sitios con características específicas o bien si fue desarrollada para una compañía privada, por alguna universidad o para un problema en particular.

## **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Todas las tecnologías pasan por una etapa de experimentación antes de llegar a la aplicación en un lugar determinado, con base en ello, es necesario conocer los antecedentes y los alcances del centro de investigación, la universidad, la compañía que desarrollo su tecnología o en su caso si una tecnología fue desarrollada para un problema en específico.

## **11. Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

Cada tecnología tiene características propias, y por ello, el conocer el lugar y fecha donde se utilizó anteriormente ayuda a corroborar su eficiencia y status de la misma, asimismo, permite conocer las condiciones actuales del lugar después de realizar un saneamiento en el mismo, tomando en cuenta el tiempo que transcurrió en llegar a las condiciones actuales.

## **8.2 MATRICES DE CALIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS**

Considerando los factores de evaluación y las 24 tecnologías, se aplicó el método multicriterio permitiendo establecer una relación cuantitativa de los factores de evaluación y de cada tecnología, integrando esta relación en tres matrices principales; matriz de ponderación de factores, matriz de atributos de tecnologías y matriz de ponderación y calificación de tecnologías. A continuación se explica la integración de estas matrices, así como la participación de los evaluadores.

### **8.2.1 MATRIZ DE PONDERACIÓN DE FACTORES**

La integración de la matriz de ponderación de factores es a partir de los 11 factores de evaluación, mencionados por orden de prioridad aquellos que consideran factores técnicos, económicos y finalmente aspectos complementarios. De los 11 factores establecidos 6 corresponden a consideraciones técnicas, 2 a económicas y 3 son complementarios, representando el 54.54%, 18.18% y 27.27% respectivamente, lo que indica que existe una mayor consideración por los aspectos técnicos.

La escala de evaluación establecida para determinar la jerarquización de los 11 factores de evaluación, se determinó considerando las bases matemáticas del modelo, sin embargo, aun cuando esta escala tuviera intervalos muy estrechos, el concepto es el mismo, por lo tanto la escala utilizada fue la siguiente: 1 cuando el factor del renglón tiene mayor importancia que el de la columna, 0.5 si ambos factores tienen la misma importancia y 0 si el factor del renglón tiene menor importancia que el de la columna.

Al definir la escala de evaluación así como los factores de evaluación, la formación de la matriz de ponderación de factores se conforma de la siguiente manera; en una sección se enlistan los factores de evaluación seguido de un número progresivo del 1 al 11, estos números sirven como referencia y al mismo tiempo es un medio para distinguirlos fácilmente, la otra sección de la matriz, se coloca en la parte superior y sobre una misma fila los mismos números progresivos de cada factor, al tener ambas secciones, el siguiente paso es llenar la matriz; esto se realiza al comparar el factor que le corresponde el No. 1 contra todos los factores restantes, colocados en la fila superior a excepción del mismo factor, considerando la escala de evaluación, este paso se aplica para los 10 restantes factores, de tal manera que todos los factores de evaluación sean relacionados y evaluados entre sí, integrando a la matriz de ponderación de factores; posteriormente se realiza una suma por cada factor y finalmente obtener el valor ponderado para cada uno.

La formación de esta matriz fue realizada por cada evaluador y de manera independiente e individual, con el fin de conocer los factores que sean más importantes según el criterio de cada uno de ellos, resultando 4 matrices presentadas en forma de tabla (Tabla A1, A2, A3 y A4) como ejemplo, la tabla A1 se presenta a continuación sin embargo, las tablas A2, A3 y A4 se muestran en el anexo 2. No obstante en las 4 matrices se observa que todos los evaluadores consideran como factores importantes la descripción del proceso, la eficiencia del proceso, el status de la tecnología y los costos del proceso debido al alto valor ponderado

### **8.2.2 MATRIZ DE ATRIBUTOS DE TECNOLOGÍAS**

La integración de la matriz de atributos de tecnologías se conforma a partir de los 11 factores de evaluación y su respectivo valor ponderado; integrados en una sección, asimismo, se establece una escala de evaluación de tecnologías, dicha escala tiene la finalidad de asignar una calificación a cada una de las tecnologías conocidas en función de la información obtenida, esta escala consta de 4 valores: 10 si se considera que la tecnología es buena, 7 si se considera que la tecnología es regular, 5 si la tecnología es básica, 2 si la tecnología es insuficiente y N.A. cuando no es posible evaluar a la tecnología respecto algún factor. La sección complementaria de esta matriz es la correspondiente a la calificación de tecnologías por atributos, en esta se colocan las 24 tecnologías recopiladas y a cada se les asigna una letra con el fin de identificarlas, el orden de colocación es indistinto, lo importante es poder identificar correcta y rápidamente cada tecnología. El próximo paso es llenar la matriz, para ello se estudia la información de cada tecnología y se le asigna un valor respecto a la escala establecida considerando los 11 factores de evaluación, así según la información obtenida de cada tecnología se le asigna un valor numérico en función de la escala establecida.

La formación de esta matriz fue realizada por un solo evaluador así como la calificación de tecnologías, y para conformar íntegramente esta matriz solo se consideró el valor ponderado de los factores de evaluación, los cuales corresponden a cada una de la matriz de atributos de tecnologías previamente establecidas resultando 4 matrices de atributos de tecnologías iguales, lo único en que difieren es en los valores ponderados, por esta razón solo se presenta una sola matriz, siendo está realizada por el mismo evaluador que analizó la información obtenida de las 24 tecnologías, asimismo, esta matriz fue la base para establecer las siguientes matrices, la cual se presenta a continuación como Tabla B1.

**TABLA A1 - MATRIZ DE PONDERACION DE FACTORES**  
(Evaluador jim)

NO	FACTORES DE EVALUACION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TOTAL	%
1	Tecnología aplicada		.5	0	0	0	.5	1	.5	0	0	1	3.5	6.79
2	Técnicas utilizadas auxiliares	.5		0	0	0	0	.5	0	0	.5	.5	2.0	3.88
3	Descripción del proceso	1	1		.5	.5	.5	1	1	.5	1	1	8.0	15.53
4	Eficiencia del proceso	1	1	.5		1	.5	1	.5	.5	1	.5	7.5	14.56
5	Campos de aplicación	1	1	0	0		0	.5	0	0	1	1	4.5	8.73
6	Bioseguridad	1	1	.5	.5	1		1	0	0	.5	.5	6.0	11.65
7	Costos del proceso	.5	1	0	0	0	0		.5	.5	1	.5	4.0	7.76
8	Infraestructura requerida	1	1	0	0	0	0	.5		0	1	1	4.5	8.73
9	Status de la tecnología	.5	1	0	.5	.5	.5	1	1		1	1	6.5	12.62
10	Institución que desarrollo la tecnología	1	.5	0	0	.5	0	0	1	0		1	4.0	7.76
11	Lugar y fecha donde haya sido aplicada	0	0	0	0	0	0	0	0	.5	.5		1.0	1.94
<b>Sumatoria</b>													51.5	99.99

jim

Escala de evalua 1 Si el factor del renglon tiene mayor importancia que el de la columna

.5 Si ambos factores tienen la misma importancia

0 Si el factor del renglon tiene menor importancia que el de la columna

**TABLA B1 - MATRIZ DE ATRIBUTOS DE TECNOLOGIAS  
(Evaluador jfm)**

VALOR PONDERADO	FACTORES DE EVALUACION	CALIFICACION DE TECNOLOGIAS POR ATRIBUTOS																									
		tec. A	tec. B	tec. C	tec. D	tec. E	tec. F	tec. G	tec. H	tec. I	tec. J	tec. K	tec. L	tec. M	tec. N	tec. O	tec. P	tec. Q	tec. R	tec. S	tec. T	tec. U	tec. V	tec. W	tec. X		
3.5	Tecnología aplicada	10	10	10	7	10	10	7	10	10	10	10	7	10	10	7	10	7	10	10	10	10	7	7	7	10	
2.0	Técnicas utilizadas auxiliares	NA	NA	5	7	7	NA	NA	NA	NA	5	2	5	NA	7	2	5	5	5	5	5	5	NA	NA	7	NA	
6.0	Descripción del proceso	5	7	10	5	7	10	5	5	5	5	5	5	10	5	2	7	2	7	2	7	2	10	10	7	7	
7.5	Eficiencia del proceso	10	10	7	7	5	7	5	10	10	2	7	2	5	2	7	2	5	5	5	2	5	7	10	10	10	
4.5	Campos de aplicación	7	7	10	10	10	7	10	5	10	10	5	7	2	7	5	5	5	7	10	5	7	10	5	7	10	
6.0	Bioseguridad	2	2	2	2	7	7	2	10	2	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	
4.0	Costos del proceso	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
4.5	Infraestructura requerida	5	7	10	2	7	5	7	5	5	5	5	7	5	7	5	7	5	2	5	7	5	5	7	2	5	
6.5	Status de la tecnología	5	7	7	10	7	7	7	7	5	5	2	5	5	5	2	5	2	5	2	5	2	7	5	7	2	5
4.0	Institución que desarrolló la tecnología	5	10	5	10	7	5	10	10	7	10	10	10	5	10	10	5	10	10	7	10	5	10	7	10	7	
1.0	Lugar y fecha donde haya sido aplicada	2	7	10	7	5	2	5	10	2	5	2	10	7	5	5	10	5	10	5	10	5	10	5	7	2	2

Escala de evaluación de tecnologías (columnas)

- 10 Si se considera que la tecnología es BUENA en base a la información obtenida
- 7 Si se considera que la tecnología es REGULAR en base a la información obtenida
- 5 Si se considera que la tecnología es BASICA en base a la información obtenida
- 2 Si se considera que la tecnología es INSUFICIENTE en base a la información obtenida
- NA No Aplica jfm

### 8.2.3 MATRIZ DE PONDERACIÓN Y CALIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS

La formación de la matriz de ponderación y calificación de tecnologías es el resultado de la integración de la matriz de ponderación de factores y la matriz de atributos de tecnologías, para la primera se considera el valor ponderado de cada uno de los factores de evaluación y para la segunda la calificación de cada una de las tecnologías, la integración de esta matriz radica en colocar en la parte superior la lista de tecnologías conocidas respetando el mismo orden antes establecido, posteriormente se realiza el producto del valor ponderado contra la calificación de tecnologías, este producto se lleva a cabo para cada tecnología, cuya meta es obtener un promedio de calificaciones para cada una de ellas y a partir de ello seleccionar las tecnologías que obtengan el promedio mas alto, esta selección se realiza de las 4 matrices, presentadas en forma de tabla (C1, C2, C3 y C4). A manera de ejemplo la tabla C1 se presenta a continuación y las tablas C2, C3 y C4 se muestran en el anexo 2; a partir de estas matrices se conocen las tecnologías con mayor promedio, obteniendo una primera selección parcial de tecnologías.

La realización de las 4 últimas matrices permitió evaluar, jerarquizar y seleccionar las tecnologías más apropiadas a partir de un universo conocido, esta selección se realizó al considerar los promedio más altos de las 4 matrices. Por ello se estableció un criterio que permita reducir este universo, este criterio consistió en seleccionar a partir de las 4 matrices de ponderación y calificación de tecnologías, aquellas tecnologías que obtuvieron promedios más altos; por ello se presenta a continuación la gráfica de frecuencia de coincidencias, por lo tanto la integración de esta tabla sobresalen 10 tecnologías las cuales representan el 41.66% de las 24 tecnologías conocidas eliminando así a 12 de ellas, no obstante al contar con 10 tecnologías como pre-seleccionadas, esto no nos permite tomar una decisión respecto a la tecnología mas adecuada, por lo que es necesario reducir nuestro universo. Con base en ello se tomaron como tecnologías pre-seleccionadas definitivas aquellas que consideren por lo menos 9 de los 11 factores de evaluación y de los cuales estén incluidos: eficiencia del proceso, descripción del proceso, status de la tecnología y campos de aplicación, como principales, esta condición se baso en observar que para los 4 evaluadores, estos factores se consideran los mas sobresalientes, por lo tanto al tener tecnologías que cubren estos dos requisitos, se tendrá una cobertura por parte de cada tecnología del 81.81% sobre los factores de evaluación.

Por lo tanto sólo 4 tecnologías consideradas como pre-seleccionadas de manera definitiva, son las siguientes:

**Tecnología B.** Degradación de bifenilos policlorados (proceso mixto).

**Tecnología C.** Proceso de reducción química en etapa gaseosa y unidad de desorción térmica (proceso mixto).

**Tecnología J.** Descontaminación de suelo y agua por extracción con surfactantes (proceso químico).

**Tecnología S.** Tratamiento de biodegradación *in-situ* (proceso biológico).

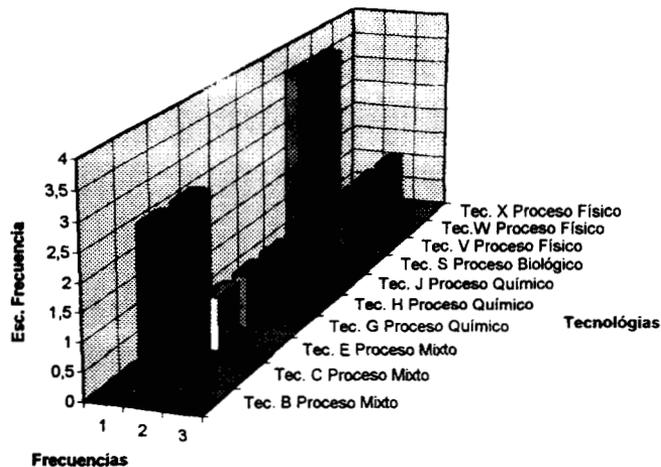
Mismas que se presentan en el anexo 1

**TABLA C1 - MATRIZ DE PONDERACION Y CALIFICACION DE TECNOLOGIAS**  
(Extrahido de Jim)

VALOR PONDERADO	CALIFICACION DE TECNOLOGIAS																									
	tec. A	tec. B	tec. C	tec. D	tec. E	tec. F	tec. G	tec. H	tec. I	tec. J	tec. K	tec. L	tec. M	tec. N	tec. O	tec. P	tec. Q	tec. R	tec. S	tec. T	tec. U	tec. V	tec. W	tec. X		
3.5	35.0	35.0	25.0	35.0	35.0	24.5	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	24.5	35.0	35.0	35.0	24.5	35.0	24.5	35.0	35.0	24.5	24.5	24.5	35.0		
2.0			10.0	14.0	14.0						10.0	4.0	10.0		14.0	14.0	4.0	10.0	10.0	10.0				14.0		
8.0	40.0	56.0	40.0	40.0	56.0	60.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	60.0	40.0	40.0	16.0	16.0	56.0	16.0	80.0	80.0	80.0	56.0		
7.5	75.0	52.5	52.5	37.5	52.5	52.5	37.5	75.0	75.0	15.0	52.5	15.0	37.5	15.0	52.5	15.0	37.5	15.0	37.5	15.0	37.5	15.0	37.5	75.0		
4.5	31.5	45.0	45.0	45.0	31.5	45.0	22.5	45.0	45.0	22.5	31.5	9.0	31.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	31.5	45.0	22.5	31.5	45.0	31.5		
6.0	12.0	12.0	12.0	42.0	42.0	12.0	60.0	12.0	30.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	30.0	12.0	12.0	60.0	12.0	12.0	12.0	12.0	30.0		
4.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	20.0	8.0	28.0	20.0	8.0	8.0	8.0	28.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0		
4.5	22.5	31.5	45.0	9.0	31.5	22.5	31.5	22.5	22.5	22.5	22.5	31.5	22.5	31.5	22.5	31.5	22.5	9.0	22.5	31.5	22.5	22.5	31.5	22.5		
6.5	32.5	45.5	45.5	65.0	45.5	45.5	45.5	45.5	32.5	32.5	13.0	32.5	32.5	32.5	13.0	32.5	13.0	32.5	13.0	45.5	45.5	45.5	45.5	13.0		
4.0	20.0	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	40.0	20.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	28.0	40.0	20.0	40.0	20.0	40.0	40.0	28.0		
1.0	2.0	7.0	10.0	7.0	5.0	2.0	5.0	10.0	2.0	5.0	2.0	10.0	7.0	5.0	5.0	5.0	10.0	5.0	10.0	5.0	5.0	5.0	7.0	2.0		
TOTALES	278.	341.5	323.	317.	347.	315.	344.	321.0	300.0	345.0	220.	308.5	223.	313.0	225.	302.	182.	263.	377.	231.5	281.5	322.	330.5	320.5		
PROMEDIO DE CALIFICACIONES	27.5	34.1	29.3	28.8	31.6	31.5	34.4	32.1	30.0	34.5	20.0	27.8	20.3	31.3	20.5	27.4	16.5	23.9	34.3	21.0	28.1	33.2	30.0	32.0		

Criterio de evaluación:  
Se efectúa el producto del valor ponderado por la escala de evaluación para cada tecnología y posteriormente se realiza una suma, la suma que resulte mayor indica que es la tecnología más apropiada.

Jim



Grafica 8.1 Frecuencia de coincidencias.

#### 8.2.4 MATRIZ DE SIMPLIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Para determinar qué factores de evaluación son los más importantes, es conveniente utilizar el mismo criterio que nos ayudó a simplificar el universo de tecnologías. Para ello se identificaron los factores más importantes, con base en los resultados de las 4 primeras matrices. Seleccionando los factores que indiquen un mayor valor ponderado por cada evaluador, posteriormente se integran en una lista los factores seleccionados con su respectivo valor ponderado y se realiza una suma, resultando 6 factores de evaluación seleccionados, estos representan un 66.9% integrando así el criterio de los 4 evaluadores, formando así la tabla 8.2.1 la cual indica la matriz de simplificación e importancia de factores de evaluación.

Tabla 8.2.1 Matriz de simplificación e importancia de factores de evaluación.

Factores de Evaluación	Evaluadores				Total (%)	Promedio (%)
	GS	JJM	MG	FR		
1 Eficiencia del proceso	11.1	14.5	15.0	12.7	53.4	13.3
2. Costos del proceso	15.1	7.7	15.0	10.0	47.9	11.9
3. Descripción del proceso	7.0	15.5	15.0	10.0	47.6	11.9
4. Status de la tecnología	15.1	12.6	10.0	8.1	45.9	11.4
5. Infraestructura requerida	13.1	8.7	10.0	8.1	40.0	10.0
6. Campos de aplicación	7.0	8.7	8.3	9.0	33.2	8.3
<b>Total</b>	<b>68.6</b>	<b>67.9</b>	<b>73.3</b>	<b>58.1</b>		
<b>Total promedio</b>					<b>67.0</b>	<b>66.9</b>

## 8.2.5 MATRIZ DE SIMPLIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Para simplificar el universo de tecnologías así como el de factores de evaluación, se requiere decidir cual de las 4 tecnologías es la más apropiada, para ello se establece la matriz de jerarquizaron de tecnologías, esta matriz integra 4 secciones, la primera muestra los 6 factores de evaluación, la segunda indica el peso ponderado promedio de cada uno de los factores de evaluación, la tercera es la calificación de cada tecnología otorgada en función de la información obtenida y la última sección corresponde al producto del peso ponderado de cada factor de evaluación con la calificación de tecnologías, obteniendo una simplificación de tecnologías; en esta sección se realiza una suma para cada tecnología por lo que se tiene un total y de acuerdo al valor más alto obtenido se determina cual tecnología es la mas apropiada, de acuerdo con esto, la tecnología J es la que obtuvo una mayor calificación, posteriormente la tecnología S, seguida de la tecnología C y finalmente la B; la matriz de simplificación de tecnologías se presenta en forma de tabla 8.2.2 a continuación.

Tabla 8.2.2 Matriz de simplificación de tecnologías

Factores de Evaluación	Peso ponderado de los factores de evaluación (%)	Calificación de tecnologías				Jerarquización de tecnologías			
		Tec. B	Tec. C	Tec. J	Tec. S	Tec. B	Tec. C.	Tec. J	Tec. S
Eficiencia del proceso	13.3	10.0	8.5	10.0	5.5	133.5	113.4	133.5	73.1
Costos del proceso	11.9	00.0	0.0	8.0	8.0	000.0	000.0	95.7	95.7
Descripción del proceso	11.9	7.0	7.0	8.5	8.5	83.3	83.3	101.1	101.1
Status de la tecnología	11.4	6.0	7.0	7.0	9.0	68.8	80.2	80.2	103.2
Infraestructura requerida	10.0	7.0	8.5	6.0	9.0	70.0	85.0	60.0	90.0
Campos de aplicación	8.3	10.0	10.0	10.0	10.0	83.0	83.0	83.0	83.0
<b>Total</b>						438.6	444.9	553.5	546.1

225550

### 8.3 APLICACIÓN DE CRITERIOS Y DISCUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos se realizan los siguientes comentarios:

El método utilizado (multicriterio) permitió determinar de manera objetiva que tecnología fue la más apropiada, asimismo fue un método que ayudó a la integración de criterios a partir de un grupo multidisciplinario, por lo tanto es una herramienta capaz de utilizarse para cualquier proyecto que requiera la toma de decisiones sin importar la naturaleza misma del proyecto. Sin embargo, la aplicación del método no se realizó en su totalidad según lo indica la propia metodología y por lo tanto se hizo una adaptación considerando las necesidades así como las circunstancias propias de la investigación, para ello se tiene el siguiente punto de vista.

El método indica que cada evaluador una vez que determine el peso ponderado de cada factor de evaluación (Matriz de ponderación de factores), tendrá que conocer las características de cada una de las tecnologías por evaluar (Matriz de atributos de tecnologías) y posteriormente vincular los factores de evaluación con las tecnologías conocidas (matriz de ponderación y calificación de tecnologías), estos tres pasos se realizarán individualmente y posteriormente se unificarán los criterios del grupo multidisciplinario participante.

Lo anterior se realizó de manera parcial, es decir, la participación de cada evaluador sólo fue en la elaboración de la primera matriz (matriz de ponderación de factores), posteriormente el conocer las características de cada tecnología se realizó por un solo evaluador, y solo se considero la opinión de cada evaluador en la elaboración de la tercera matriz (matriz de ponderación y calificación de tecnologías), unificando posteriormente los criterios.

Esta adaptación se considera válida aun cuando el método no lo precisa, debido a la naturaleza de la investigación, es decir esta *se tendría que desarrollar y elaborar por un solo evaluador*, no obstante al realizar esta modificación implica que no haya una diversidad respecto a opiniones y comentarios referentes a las diferentes tecnologías y características propias de las mismas, lo que trae como consecuencia el tener un solo criterio y por ende una sola objetividad para evaluar a cada tecnología; con ello la selección de una tecnología tendrá implícito un error debido a la falta de objetividad total del grupo multidisciplinario

En otro aspecto, al analizar los resultados de la tabla de frecuencia de coincidencias de tecnologías, se observan 2 circunstancias, la primera se refiere a que de las 10 tecnologías seleccionadas las tecnologías con procesos físicos y químicos tienen una mayor representatividad, es decir por proceso físico, químico o mixto y solo 1 por proceso biológico, lo que demuestra que la mayor parte del desarrollo tecnológico está enfocado a estos procesos; como segunda circunstancia al analizar esta misma tabla así como su respectiva gráfica, se observa que las 4 tecnologías que presentan una mayor coincidencia serán las tecnologías definitivas, por lo tanto la simplificación e importancia de factores de evaluación no influye al definir cuales son las tecnologías más propias, lo que propicia la posible creación de un círculo vicioso o bien la realización de esta matriz no tiene un sustento, de ser así, es necesario implementar algún mecanismo que anule este círculo vicioso el cual se generó por sí mismo.

Finalmente al analizar los resultados de la matriz de simplificación de tecnologías se observa que las 4 tecnologías que resultaron mejor calificadas tienen un margen de calificación muy estrecho, una con respecto a otra este margen es a partir de 438.6 hasta 553.5 existiendo una variación de 114.9 puntos, lo que resulta difícil definir que tecnología es la más apropiada debido al corto margen que existe.

Si consideramos solamente este criterio, podríamos establecer que las 4 tecnologías son las más apropiadas y todas ellas garantizan un buen resultado al momento de ser aplicadas y por lo tanto la selección de alguna de ellas dependerá de la decisión conjunta del grupo multidisciplinario participante, y como una posible solución, sería el hacer participativo a los 4 evaluadores estudiando las características propias de las 4 tecnologías expresando su punto de vista de cada una de ellas, indicando ventajas y desventajas, de esta manera se compensarían los posibles errores implícitos en la toma de decisiones.

Sin embargo, si consideramos conceptos estadísticos y los aplicamos para la selección de tecnologías, estos resultarían útiles, por consiguiente, estos conceptos solo se aplicaron a las 4 últimas matrices (matriz de ponderación y calificación de tecnologías), tales como: la media, moda, rango, variancia y desviación estándar, para obtener estos valores, se utilizaron las siguientes fórmulas (Walpole y Myers, 1987) los cálculos obtenidos en cada matriz se indican en la tabla 8.3.1

Media  $X = \frac{\sum x_i}{n}$  Si  $X_1, X_2, \dots, X_n$  constituyen una muestra aleatoria de tamaño  $n$ , entonces la media se define como el estadístico

Moda Si  $X_1, X_2, \dots, X_n$  no son necesariamente diferentes, constituyen una muestra aleatoria de tamaño  $n$ , entonces la moda es el valor de observación que ocurre a menudo o con mayor frecuencia

Rango En una muestra  $X_1, X_2, \dots, X_n$  se define por el estadístico  $X_{(n)} - X_{(1)}$  donde  $X_n$  y  $X_1$ , son respectivamente las observaciones mayor y menor de la muestra

Variancia  $S^2 = \frac{\sum (X_i - X)^2}{n-1}$  Si  $X_1, X_2, \dots, X_n$  constituyen una muestra aleatoria de tamaño  $n$ , entonces la variancia se define como el estadístico

Tabla 8.3.1 Estadística de cada matriz de ponderación y calificación de tecnologías (evaluador)

Evaluador	Media	Moda	Rango	Variancia	Desviación Estándar
JJMS	28.33	34	18	641.61	25.33
GS	25.97	26	16.4	307.18	17.52
MR	31.26	32	21.1	761.56	27.59
FR	30.27	31	17.4	478.24	21.86

De la Tabla 8.3.1, se observa que los valores de media y desviación estándar para dos evaluadores están muy estrechos y para el caso de la media, se observa que 2 tecnologías presentan casi el mismo valor; por lo tanto las tecnologías B, C y J obtendrán la misma prioridad, y la tecnología S como una segunda prioridad, debido a que el valor de la media esta más alejada del valor de cualquier evaluador.

Lo que indica que aun aplicando conceptos estadísticos para este caso la decisión no es precisa debido a la pequeña diferencia de valores entre una tecnología y otra

Tal vez al aplicar los dos últimos pasos del método, sea necesario modificarlo haciendo más participativo a los cuatro evaluadores de manera continua en toda la metodología y así evitar la cercanía de los resultados entre una tecnología y otra.

## 9 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Con base en los resultados obtenidos así como la metodología utilizada, podemos concluir que las tecnologías seleccionadas como las más adecuadas son:

**Tecnología B.** Degradación de bifenilos policlorados, Wilwerding Michael.

**Tecnología C.** Proceso de reducción química en etapa gaseosa y unidad de desorción térmica, Eco Logic International, Inc. (ECO-LOGIC)

**Tecnología J.** Descontaminación de suelo y agua por extracción con surfactantes, GHEA Associates

**Tecnología S.** Tratamiento de biodegradación *in-situ*, General Electric Woods

Las cuales cubren la necesidad de eliminar BPC's del suelo, según lo indicado por el estudio así como la clasificación que se realizó. Sin embargo, para corroborar esta afirmación sería necesario someter a la práctica y bajo condiciones de contaminación de acuerdo a las encontradas en la República Mexicana, considerando factores ambientales así como características propias de suelo y microflora, debido a que estas tecnologías son de procedencia extranjera las condiciones para las cuales se desarrollaron y fueron aplicadas no son las mismas que en la República Mexicana.

El factor de bioseguridad fue eliminado del proceso de selección, aún cuando los evaluadores conocían lo trascendente de este factor, esto fue debido a dos aspectos principalmente, en primer término no se le dio la importancia o reconocimiento que presenta este concepto, y en segundo término este concepto fue aplicado en todas las tecnologías recopiladas, aún siendo tecnologías por procesos físicos químicos o mixtos, los cuales no contemplan este concepto, haciendo que la bioseguridad pierda sentido en la selección de factores, debido a que el 75% de las tecnologías recopiladas representan los procesos antes mencionados.

En otro aspecto, la aplicación del método aun cuando presentó discrepancia para la selección de tecnologías respecto a la toma de decisiones, demuestra que es una herramienta útil y es posible aplicarlo en cualquier problema que involucre una evaluación y selección de tecnologías sin importar del contaminante que se considere o del objetivo propio de las tecnologías por evaluar.

Por lo tanto, la aplicación de este método cubrió los objetivos establecidos, así a partir de un universo de 24 tecnologías, se realizó una selección y sistematización de las mismas obteniendo 10 tecnologías consideradas como pre-seleccionadas y finalmente se definieron 4 de ellas como las más apropiadas para la eliminación de BPC's en suelo. No obstante aun cuando no se logró seleccionar una tecnología en particular, se puede afirmar que de las 4 tecnologías definitivas, estas cubren las necesidades en cuanto a eliminación de BPC's el mecanismo para afirmar o negar esta conclusión sería la aplicación de las tecnologías en campo.

## 10 REFERENCIAS

1. Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSCA)  
Division of Toxicology  
Bull. E-29, 1996  
1600 Clifton Road  
Atlanta, U.S.A.
2. Beurand D.L., Harbel M.L.  
Influence of chlorine substitution pattern on the degradation of PCB by eight bacterian strains  
*Microbiology Ecology* Vol. 20, 87-102, 1990
3. CANVIRO CONSULTANTS  
PCB Envirotips Manual in Preparation, 1987
4. Comisión Federal de Electricidad, CFE  
TECNOLAB  
El Askarel, Abr. 1989
5. Conference: Environmental Engineering, Austin TX, U.S.A, Julio 10-12  
Environ. Eng. Proc. 1990, Spec Conf. Publ. NY, USA. pp. 370- 384, julio 1990
6. Crine Jean-Pierre  
Hazards, Descontamination and Replacement of PCB  
Hydro-Quebec Research Institute Varennes, Canadá  
Sep. 1987
7. Chemical Waste Management. Inc.  
U.S. Patent Document  
Patent Number 5,453,502  
Oak Brook Illinois, U.S.  
sep. 1995
8. Chemical Waste Management, Inc.  
European Patent Application  
Application Number 93304747.4  
Oak Brook Illinois, 60521 U.S.  
Jun. 1993
9. Electric Power Research Institute  
PCB Seminario  
Boston Massachusetts, Agosto, 1995
10. ENRS Corporation  
Houston, Tx, 77098 U.S.
11. Erickson, M.D.  
Analytical Chemistry of PCB  
Ann Arbon Science,  
Butterworth Publishers, S. Massachusetts, 1986
12. Food, Drug Administration U.S.A,  
FD and CA, Food, Drug, and Cosmetic Act

13. Frank R., Braun H and Thorpe B.  
Comparison of DDT and PCB Residues in the General Diet and in Human Blood  
*Bull. Environ. Contam. Toxicol* No. 15 146-152, 1993
14. Freeman Harry M., Harris Eugene F.  
Hazardous Waste Remediation  
Capitulo 6 pp. 45-60, 1995
15. General Electric Company, N.Y., U.S.  
U.S. Patent Document  
Patent Number 5,430,232  
jul. 1995
16. General Electric Company, N.Y., U.S.  
U.S. Patent Document  
Patent Number 5,427,688  
jun. 1995
17. Gidi Fraun David A.  
Saneamiento de sitios contaminados  
Procuraduria Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA)  
*Gaceta Ecológica* No. 36, Sep. 1995
18. Gotlieb Tzhak  
Soil and Water Descontamination by Extraction with Surfactants  
*Separation Science and Technology*, Vol. 28 No. (1-3),  
pp. 793-804 (1993)
19. Granero Andrés Martín  
Transformadores en Baño de PCB's un Peligro Potencial  
*Automática e Instrumentación* No. 211, 74-77, 1991
20. Greenpeace México, A.C.  
Boletín de prensa No. 15  
México, Marz. 1996
21. Hutzinger, O. Safe, S. and Zitko, V.  
The Chemistry of PCB's  
CRC Press, Inc. Florida 268, 1974
22. Legorreta López Edgar  
Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI)  
No. Expediente 941613  
No. Folio 22373  
mar. 1994  
Av. Pacifico 468, C.P. 04330, México, D.F.
23. McConell E.  
Acute and Chronic Toxicity, Carcinogenesis, Reproduccion Teratogenesis and  
Mutagenesis in Animals in  
Halogenated Biphenyls and Related Products  
Amsterdam, 1980

24. Monsanto, Co.  
Aroclor Plasticizers  
Tecnical Bulletin No. 0/PL-306  
Organic Chemical Division, St. Luis, Missouro, 1986
25. Monsato Company  
Elemental Analysis by Galbraith Laboratories  
Knoxville, Tennesseen, 1973
26. Patent Cooperation treaty (PCT)  
Patent Number PCT/US89/05805  
Dic. 1988
27. Phillips D.J.  
PCB and the Environment  
Vol. 2 CRC, Press, Inc. USA., 1986
28. Programa de Evaluación e Innovación Tecnológica (SITE)  
EPA/540/R-94/526, Noviembre de 1994
29. Programa de Evaluación e Innovación Tecnológica (SITE)  
EPA/540/SR-93/522, Sep. de 1994
30. Quemarais, B. y Lemieux, C.  
Concentration and Surces of PCB and Organochlorine Pesticides in the St. Lawrence  
River Canadá  
Chemosphere Vol. 29 No. 3 561-610, 1994
31. Safe S.  
Polychlorinated Biphenyls, Human Health Effects  
Bull. Report, Departmant of Veterinary Physiology and Pharmacology  
Texas A&M University  
Collage Station, 1987
32. Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL)  
Programa de desechos industriales en México, 1988
33. Shahid Ahmed, Alex Husseiny and Hang Youn  
Methodology for Acceptability Analysis of Alternate Sites for Nuclear Power Station  
*Nuclear Enginerring and Design*  
No. 51, 361-388, 1979
34. Shaw G. R. and Connell D. W.  
*PCB's and the Environment*  
Vol. 1 CRC. Pres, Inc. USA., 1986
35. Shi, W. Y. and Mackay D.  
A critical Review of Aqueos Solubilities, Vapor Pressures, Henry's Law Constants and  
Octanol/Water Partion Coefficients for PCB's  
*Journal Phys. Chemical*, 15, 911, 1986
36. Technical Services Branch  
Environmental Protection Service, Canadá, Ottawa, 1987

37. Tom Pope  
Wastw Age, pp. 86-90, Septiembre 1990
38. Trejo Alvarado Mayra; Tulio Guillen Servio  
Método multicriterio de ponderación por intervalos  
Instituto de Ingeniería, UNAM. 1994
39. Trustees of Princeton University  
U.S. Patent Document  
Patent Number 5,458,437  
Princeton, N.J. U.S.  
Oct. 1995
40. Viganò, L. Galassi, S. and Arillo A.  
Bioconcentration of PCB's in Rainbow Trout Caget in the River  
*Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 28 287-297, 1994
41. Villegas Mendoza Patricia  
Tesis "Contaminación por Bifenilos Policlorados"  
Instituto Politecnico Nacional, 1994
42. Walpole Ronald E. y Myers Raymond H.  
Probabilidad y estadística para ingenieros  
Interamericana, pag. 727, México, D.F., 1987
43. Wekhof Alex  
Treatment of Contaminated Water, Air, And Soil with UV Flashlamps  
*Environmental Progress*, Vol. 10, No. 4, pp. 241-247, Nov. 1991
44. Walter E. Grube, Jr  
U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio  
Evaluation of Waste Stabilized by the Soliditech  
SITE Technology, Vol. 40, No. 3, pp. 310-316, Mar. 1990
45. William C. Meenand y George D. Sullivan  
Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI)  
Patente Numero 162,542  
Country of Lake  
Cook, Illinois, U.S.  
may. 1991
46. Wilwerding, Michael  
Patent Cooperation Treaty (PCT)  
International Application Number PCT/US90/02176  
2328 Eberlieu, Klamath Falls Or. 97601 U.S.  
Abr. 1990
47. Zbozinek J. V., Chang T. J. and Court J. E.  
PCB Disposal Manula  
Electric Power Research Institute  
EPRI CS-4098, Jun. 1985

# **ANEXO**

**1**

# INCREMENTO DE LA EVAPORACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS Y BPC<sup>1</sup>

## 1. Tipo de tecnología

Descontaminación de suelos y partículas de compuestos orgánicos (COV) y BPC's por desorción térmica, obteniendo la evaporación de estos compuestos por acción directa de aditivos

## 2. Técnicas utilizadas auxiliares

No requiere de una técnica auxiliar o de apoyo para llevar a cabo el proceso

## 3. Descripción del proceso

Este proceso consiste de un método para separar contaminantes orgánicos y BPC's depositados en los poros de materiales inertes mezclando materiales con algún líquido que sea capaz de obtener una remoción de contaminantes, debido a que los contaminantes en el líquido, asimismo, se realiza este proceso en condiciones de vacío y temperaturas ligeramente arriba del punto de ebullición de los líquidos orgánicos pero por debajo de la temperatura de descomposición tanto de líquidos orgánicos como de los propios contaminantes, el incremento de temperatura se realiza en presencia de un flujo de gas inerte a través de los poros de los materiales, posteriormente los vapores son precipitados, y después de aplicar este proceso se liberan para un tratamiento de destrucción posterior.

Los BPC's son separados eficientemente de los poros de materiales tales como: arena, concreto y suelo, estos materiales son mezclados con aditivo, el cual remueve al contaminante debido a que este último es soluble en el aditivo, al mismo tiempo son expuestos a temperatura promedio de 300°C con el fin de realizar la (evaporación de contaminantes) posteriormente se aplica presión de vacío, siendo este el primer paso del proceso.

Los aditivos utilizados no son tóxicos como son: aceite de pino y aceite mineral principalmente, buscando una eficiente desorción en los poros de los materiales, la cantidad utilizada es de 3% a 6% del peso del material que será tratado, al utilizar mayor cantidad de aditivo el tiempo de residencia aumentará.

Si sólo se incrementa la temperatura y se tiene condiciones de vacío, se tendrán desventajas para la eliminación de contaminantes, es por ello que se induce un flujo de gas inerte como CO<sub>2</sub> o N<sub>2</sub>, el gas penetra entre los poros del suelo y captura tanto a los contaminantes como al aditivo en fase gaseosa, la velocidad de flujo del gas es de 0.01 a 0.06 ft<sup>3</sup>/h. y la presión de 200 a 450 mm de Hg. El tiempo de residencia menor a 4 minutos. Los resultados que se obtuvieron a partir de una serie de experimentos realizados en suelos que contenían BPC's y humedad dentro de un rango de 5%-25% del peso de la cantidad de suelo a tratar, se realizaron con diferentes aditivos y diferentes concentraciones de BPC's.

---

<sup>1</sup> TEC-MIX-A

#### **4. Eficiencia del proceso**

Por cada 100 g. de suelo, 1% de glicerina a una concentración inicial de BPC's de 8102 ppm, a temperatura de 300° C, presión de vacío de 200 mm de Hg y tiempo de residencia de 3 minutos; se obtuvo una concentración final de BPC's de 66 ppm.

Por cada 100 g. de suelo, 5% de aceite mineral, 2% de agua, a una concentración inicial de BPC's de 26000 ppm a temperatura de 300° C, presión de vacío de 200 mm de Hg y tiempo de residencia de 4 minutos; se obtuvo una concentración final de BPC's de 93 ppm

#### **5. Campos de aplicación**

Suelos, arena y concreto que estén contaminados con BPC's y compuestos orgánicos volátiles (COV) a altas concentraciones

#### **6. Bioseguridad**

Este concepto lo considera de manera parcial y es considerado superficialmente debido a que la selección y utilización de algún aditivo se pretende que no sea tóxico al ambiente.

#### **7. Costos del proceso**

No proporciona una cifra que indique un costo de manera numérica solo en forma textual indica que el costo del proceso es bajo

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Equipo de laboratorio necesario para determinar condiciones iniciales y finales en todo el proceso, así como la instalación del equipo para incrementar temperatura, realizar condiciones de vacío y suministro de gas inerte.

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología patentada en los EE.UU., probada y desarrollada a nivel laboratorio

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Tecnología desarrollada por General Electric Company, N.Y.

#### **11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

No especifica un lugar determinado, sin embargo, la fecha de desarrollo y presentación de la tecnología fue en Julio 1995.

## DEGRADACIÓN DE BIFENILOS POLICLORADOS (BPC)<sup>2</sup>

### 1. Tipo de tecnología

Degradación química de BPC's en aceite de transformadores, suelo y sedimento; por la acción de un catalizador en solución líquida en presencia de un ácido e incremento de temperatura.

### 2. Técnicas utilizadas auxiliares

No requiere de alguna técnica auxiliar para llevar a cabo este proceso

### 3. Descripción del proceso

Esta tecnología fue desarrollada para dos condiciones distintas, la 1a. cuando se tienen BPC en aceite de transformadores y la 2a. cuando los BPC se encuentran en el suelo.

#### - Tratamiento de aceite contaminado por BPC's

El proceso es aplicable a fluidos no acuosos en concentraciones de BPC's desde 10 ppm hasta 1000 ppm, la limpieza del aceite de transformadores se realiza aun si existe la presencia de agua, para ello el primer paso es remover el agua por la generación de vacío o por un incremento de temperatura.

Posteriormente la adición de solventes, los cuales son miscibles en el líquido contaminado, son el metanol, mezclado con  $\text{AlCl}_3$  y  $\text{FeCl}_3$ , así el metanol mezclado con estos compuestos obtiene una adecuada eficiencia.

La proporción usada se basa en la siguiente relación: 1000 galones de aceite contaminado a una concentración de 500 ppm de BPC utiliza 2.4 kg. de  $\text{AlCl}_3$  o bien en un galón de metano, se disuelve 60% de  $\text{FeCl}_3$ ; sin embargo, cuando se utiliza  $\text{AlCl}_3$  y  $\text{FeCl}_3$  los rangos más apropiados están de 1:1 a 10:1 respectivamente.

El incremento de temperatura propicia una reacción química eficiente para un tiempo de residencia adecuado, por tanto, para obtener los mejores resultados el rango de temperatura es de 300°C a 350°C a presión atmosférica, no obstante el tiempo de residencia dependerá del tiempo de reacción química y esta última condición estará en función de la concentración de los BPC, no obstante, cuando se tienen temperaturas arriba de los 300°C a una concentración de 1000 ppm de BPC, estos se degradan completamente por un periodo de 2 h.

Finalmente la combinación de ácido con  $\text{AlCl}_3$  y  $\text{FeCl}_3$  se realiza formando primeramente una capa de  $\text{AlCl}_3$  y posteriormente  $\text{FeCl}_3$ , con ello el contaminante líquido es recirculado continuamente formando una mezcla de ácido,  $\text{AlCl}_3$  y  $\text{FeCl}_3$ , eliminando así a los BPC's del aceite.

#### - Tratamiento de suelo contaminado con BPC

El proceso es aplicable en la destoxicación de suelos, sedimentos y lodos, los cuales contienen BPC, este proceso está desarrollado para la remediación de suelos, la cual se realiza por la combinación de ácido,  $\text{AlCl}_3$  y  $\text{FeCl}_3$ , estas se ponen en contacto con el suelo contaminado por medio de la adición de metanol en condiciones in-situ.

---

<sup>2</sup> TEC-MIX-B

Los rangos de contaminación a los cuales el proceso es aplicable, es de 100 a 300 ppm de BPC, para ello la adición de un solvente orgánico así como un ácido y una solución utilizada como catión, facilita la disolución de los BPC; el Polietileno Glicol por ejemplo, es un gran solvente debido a que químicamente es inocuo para el medio ambiente al momento de usarse en el proceso. Por tanto para obtener mejores resultados se utiliza una relación tomando en cuenta el porcentaje en peso del ácido y los BPC, siendo del orden de 1:01 o 20:1

Posteriormente, la temperatura se incrementa en un rango promedio de 300°C mezclando el suelo contaminado con hidróxido metálico, finalmente la mezcla es transferida a un horno rotatorio donde el agua es eliminada por vacío o bien por deshidratación, así el suelo contaminado es continuamente mezclado y los vapores de BPC son destilados y tratados para no causar contaminación a la atmósfera, pasan a través de un filtro de carbón activado, al carbón se le proporciona un tratamiento posterior, con el objeto de evitar saturación de BPC.

#### **4. Eficiencia del proceso**

En un recipiente con 300 ml de aceite de transformador a una concentración inicial de 500 ppm de BPC, se agrego 5g. de  $AlCl_3$ , 1.5g de  $FeCl_3$  y 25% de metanol, a temperatura de 325°C por un tiempo de 1.5 h.; se mezclan los componentes y después de llevar a cabo el proceso, se tomo una muestra para realizar su análisis por cromatografía, obteniendo una concentración final de 1 ppm de BPC's

Se tiene una muestra de suelo, la cual contiene 15% de humedad, presenta una concentración inicial de 1740 ppm de BPC, el suelo es mezclado con 350 ml de Polietileno Glicol y NaOH, la mezcla es transportada en un horno rotatorio de 3.5 ft gt diámetro y 38 ft de longitud a temperatura promedio de 300 °C y presión por debajo de la atmosférica, los vapores son retenidos por filtros de carbón activado obteniendo una concentración final de 135 ppm de BPC.

#### **5. Campos de aplicación**

Suelo, sedimentos, lodos y aceite de transformadores contaminados con BPC's.

#### **6. Bioseguridad**

Este proceso considera este concepto sólo de manera parcial y muy superficial, en lo que respecta a la eliminación de BPC en suelo.

#### **7. Costos del proceso**

No precisa ningún dato numérico, solo indica que el costo es bajo.

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Equipo de laboratorio (cromatógrafo de gases) para determinar concentración final e inicial, así como la infraestructura necesaria para la instalación de un horno giratorio en el lugar, tomando en cuenta motores eléctricos, dosificadores y recipientes de almacenamiento para solventes, elementos para proporcionar una temperatura del orden de 300 °C, termopares y el espacio requerido para la operación del horno tomando.

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología patentada en la República Federal de Alemania, asimismo se realizaron pruebas de eficiencia y se desarrollo a nivel laboratorio a mediana escala.

**10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Wilwerding Michael  
2328 Eberlieu, Klamath Fall, Or 97601, U.S.A.

**11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

Se aplico en St. Paul Minnesota, la fecha de presentación de la tecnología ante la oficina de patentes fue en octubre de 1990

## **PROCESO DE REDUCCIÓN QUÍMICA EN ETAPA GASEOSA Y UNIDAD DE DESORCIÓN TÉRMICA<sup>3</sup>**

### **1. Tipo de tecnología aplicada**

Proceso de reducción química en etapa gaseosa y desorción térmica para líquidos y sólidos contaminados con BPC

### **2. Técnicas utilizadas auxiliares**

- Preparación previa del lugar por medio de un sistema depurador
- Sistemas de recirculación de gas y centros de control eléctrico

### **3. Descripción del proceso**

Se requiere de un reactor de reducción química para la etapa gaseosa, tratando desechos líquidos orgánicos en contacto con hidrógeno enriquecido a temperatura de 900 °C y presión ambiente, este proceso es adecuado para corrientes de desecho acuoso; los productos de la reacción incluyen cloruro de hidrógeno para la reducción de BPC's, metano y etileno, la ausencia de oxígeno libre en el reactor inhibe la formación de dioxina.

El reactor se puede combinar con una unidad de desorción térmica que trata desechos orgánicos en medios tanto sólidos como líquidos, la unidad de desorción térmica procesa suelo a través de la desorción de orgánicos entre temperaturas de 500 a 600°C utilizando un baño de sales de metal fundido como medio de transferencia de calor.

Los desechos orgánicos quedan absorbidos en un gas agente que funciona como agente catalítico rico en hidrógeno, la mayoría de los metales volátiles que se encuentran en el suelo se disuelven en el baño de metal fundido, algunos pasarán al reactor con el gas agente y los restantes permanecerán en el suelo tratado. Los metales no volátiles permanecerán en el suelo tratado. El gas agente rico en hidrógeno transporta los orgánicos desorbidos al reactor en donde se someten a una reacción química de reducción en etapa gaseosa.

Para el funcionamiento del reactor, un intercambiador de calor evapora materia prima acuosa contaminada para formar vapor y un destilado concentrado. Atomizadores rocían licor caliente, con partículas asociadas, hacia dentro del reactor, una bomba envía aceites ricos en BPC's directamente al reactor a través de atomizadores, posteriormente, se recircula gas comprimido rico en hidrógeno por medio del intercambiador de calor, el cual penetra por la parte superior del reactor propiciando una mezcla de manera homogénea, esta mezcla pasa a través de barras calentadas por energía eléctrica a 900 °C. En el fondo del reactor, la mezcla invierte su trayectoria y el flujo es ascendente por lo tanto, las reacciones reductivas se realizan mientras los gases viajan de la salida del reactor a la entrada del depurados.

Al fluir los gases y entrar en contacto con el agua, se elimina el cloruro de hidrógeno y partículas finas, haciendo recircular el agua depurada a través de un enfriador hasta llegar a 35 °C, se agrega agua cáustica para mantener una adecuada eficiencia como eliminador de cloruro de hidrógeno.

---

<sup>3</sup> TEC-MIX-C

El gas reformado que sale del depurador contiene hidrogeno en exceso, metano, etileno y una pequeña cantidad de vapor de agua; aproximadamente el 95% del gas rico en hidrógeno se calienta a 500°C y se vuelve a circular en el reactor. Cerca del 5% del gas se utiliza como combustible adicional para la operación de una caldera, siendo esta la única que genera emisiones a la atmósfera. Cuando se tratan desechos que contienen desechos altamente concentrados, el proceso genera gas reformado en exceso, permitiendo al sistema el utilizar el gas excedente o almacenarlo par ser usado más adelante.

#### **4. Eficiencia del proceso**

Con un volumen de 16 toneladas de suelo a 627 ppm de BPC's, se realizó una prueba con una duración de 72 hrs continuas y se obtuvo un eliminación de BPC's en un 85% promedio

#### **5. Campos de aplicación**

Aceite contaminado con BPC, agua residual industrial y suelos contaminados con BPC

#### **6. Bioseguridad**

Esta tecnología solo trata de manera parcial este concepto, estableciendo que no hay formación de dioxinas y de furanos, sin embargo, no indica la cantidad reducida de dioxinas

#### **7. Costos del proceso**

De manera precisa no se tiene un dato exacto, sin embargo, a manera de aproximación se tendrá un costo de USD \$ 300/tonelada.

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

- Remolque con plataforma de 15 m
- Sistema depurador para recircular gas y un centro de control
- Remolque para tanque de propano y un cilindro para precalentamiento de desechos
- Remolque para soporte de desorción térmica
- Todo el sistema requiere de una superficie promedio de 1225 m<sup>2</sup>

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología probada dentro del programa de Evaluación e Innovación Tecnológica (SITE) de la EPA en 1994

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Eco Logic International, Inc. (ECO LOGIC)

#### **11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

En un relleno sanitario en Middleground en la ciudad de Bay City, en EE.UU. en diciembre de 1992

# TRATAMIENTO QUÍMICO-BIOLÓGICO<sup>4</sup>

## 1. Tipo de tecnología aplicada

Tratamiento químico y biológico para remediar suelos contaminados con BPC's

## 2. Técnicas utilizadas auxiliares

- Oxidación química en suelo como pretratamiento

## 3. Descripción del proceso

El desarrollo de esta tecnología consta de una etapa preliminar y dos etapas principales; la preliminar es una oxidación química primaria, seguida de una oxidación química secundaria y una biológica, estas dos últimas son etapas principales, describiéndolas a continuación.

### Oxidación Química

Los tratamientos biológicos y químicos principales no utilizan químicos agresivos, se toma en cuenta los subproductos que resulten de esta fase, asegurándose que estos últimos resulten inertes y puedan ser biológicamente degradados.

Tomando en cuenta lo anterior, en primer término, se realiza una descontaminación de materiales por medio de reactivos químicos que tienen la capacidad de degradar y oxidar parcialmente a los contaminantes orgánicos (BPC y HC) a partir de la existencia de  $O_2$  y  $H_2O$ , resultando de estos contaminantes compuestos intermedios.

### Tratamiento Biológico

En esta segunda fase, un sistema biológico degrada residuos a partir de una oxidación química parcial en la primera fase, integrando así un biosistema, ya sea en secuencia o solo, dependiendo de las características y la concentración de los desechos.

En esta fase, las moléculas de BPC's menos de 5 cloros son más susceptibles a la degradación en contraste con moléculas de BPC's con más de 5 cloros, así los tratamientos biológicos por sí solos no son suficientes, lo que indica que los desechos tratados químicamente están sujetos a ciclos de degradación iniciando con un tratamiento químico, posteriormente con un tratamiento biológico y si los contaminantes son degradados convenientemente salen del ciclo, si no es así, entran nuevamente al ciclo químico-biológico.

## 4. Eficiencia del proceso

Por proceso químico se obtiene un 40% de eficiencia y puede llegar a 90% de eliminación por medio de la combinación de ambos procesos (químico-biológico) en altas concentraciones de compuestos clorados.

No obstante, en condiciones aerobias con mono y di-cloro bifenilos se obtendrá una eficiencia del 44-77% de biodegradación.

---

<sup>4</sup> TEC-MIX-D

Para el caso de HC la eliminación de estos será de 50%

En el sistema integral (químico-biológico) se obtienen resultados a partir de 42 días, según lo demostraron las pruebas realizadas a gran escala.

#### **5. Campos de aplicación**

En suelos y sedimentos contaminados con BPC, HC, Hidrocarburos Aromáticos y Alcanos.

#### **6. Bioseguridad**

Este concepto no lo indica ni parcial ni generalmente.

#### **7. Costos del proceso**

No especifica un costo de manera numérica, solamente de manera textual, indica que es bajo.

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

No especifica una infraestructura detallada o de manera general para la aplicación de esta tecnología.

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología robada dentro del Programa de Evaluación e Innovación Tecnológica (SITE) de la EPA por un período de dos años en presencia de BPC's, obteniendo resultados favorables, sin embargo, se continua probando en otras áreas.

#### **10. Institución o compañía que desarrollo o aplica esta tecnología**

The Institute of Gas Technology, 1700 South Mount Prospect  
Road Des Plaines, IL 6000-18-1804, U.S.A.

#### **11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente.**

Aun cuando esta tecnología fue probada a gran escala, no indica un lugar en particular, se empezó a probar en 1982, y en 1994 se obtuvo la aprobación por el SITE

## **ESTABILIZACIÓN DE DESECHOS POR MEDIO DE LA SOLIDIFICACIÓN <sup>5</sup>**

### **1. Tipo de tecnología**

Mezcla de materiales de desecho pozolánico, con aditivos, cemento tipo portland y agua formando una mezcla cuyo fin es la solidificación

### **2. Técnicas utilizadas auxiliares**

Antes y después de aplicar esta tecnología, se consideran cuatro criterios para asegurar la eliminación o reducción de los contaminantes presentes en el sitio como son:

1. Pruebas de extracción en periodos cortos
2. Pruebas de extracción y lixiviados en periodos cortos
3. Examen petrográfico
4. Observación en cuanto a la integridad estructurada

Asimismo, se tienen procedimientos para corroborar la eficiencia de la tecnología como son: American Society for Testing and Materials (ASTM), Investigation of Test Methods for Solidified Waste Characterization (TMSWC), American Nuclear Society (ANS).

### **3. Descripción del proceso**

Estando el suelo contaminado, se realiza una excavación de 5 ft de ancho, 3 ft de profundidad y 8 ft de largo, este volumen de material es depositado sobre una unidad móvil (camión) el cual tiene instalado un contenedor simulando una celda de confinamiento, posteriormente, se realiza una filtración del desecho, con el fin de homogeneizarlo y evitar la existencia de fragmentos de roca, raíces de árboles o cualquier escombros que pudiera ser incorporado al proceso.

Con el objeto de asegurar que cualquier escombros pudiera interferir en el proceso, estos son removidos y para ello se toman muestras del suelo para su análisis y asegurar su homogeneidad.

Se realizan 3 diferentes tipos de mezclas, las cuales constan de agua, cemento tipo portland, aditivos y suelo; con estos cuatro elementos se tiene una mezcla completa; sin embargo, se pueden tener relaciones distintas de estos elementos, dependiendo del tratamiento y del tipo de desecho que exista.

Las distintas relaciones se comprenden de: suelo, filtración, filtro-lodo y aditivos con arena; se proceden a obtener diferentes relaciones de agua, cemento y aditivo.

Suelo: 58% material de desecho, 28.9% cemento, 11% agua y 0.7% aditivo.

Filtro: 58% material de desecho, 25.8% cemento, 14.1% agua y 0.7% aditivo

Filtro-Lodo: 40% material de desecho, 50.9% cemento, 6.8% agua y 0.7% aditivo

Aditivo-Arena: 56.3% material de desecho, 31.1% cemento, 10.8% agua y 1.1 aditivo

---

<sup>5</sup> TEC-MX-E

Después de realizar las mezclas correspondientes según el caso, la molienda se descarga en un cubo de madera prefabricado con un volumen de 1 yarda cúbica, en forma proporcional, la mezcla es repartida en cilindros de PVC de diferentes diámetros y tamaños que oscilan desde los 2.5 cm a 6.5 cm y 4.8 cm a 6.5 cm respectivamente.

Todas las mezclas realizadas son probadas después de 28 días de permanecer en el cilindro de PC. Posteriormente las muestras son transportadas al laboratorio para realizar los análisis correspondientes (según ASTA, TMSWC)

Aproximadamente 14 yardas cúbicas de material fueron tratadas y confinadas en cubos de madera con 1 yarda cúbica, colocadas en hileras y cubiertas con plástico, con el objeto de realizar un análisis después de un período mayor a los 28 días.

Los cilindros tienen características diferentes en cuanto al tipo de mezcla que se realizó, teniendo los siguientes resultados:

	SUELO		FILTRO	
	Sin tratar	Con tratamiento	Sin tratar	Con tratamiento
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.26	1.591	114	1.43
Permeabilidad		3.41 x10-8		4.53x10-5
Compresibilidad		680.00		390.00
Cont. Agua (%)	23.50	12.60	28.70	21.00

	FILTRO-LODO	
	Sin Tratar	Con Tratamiento
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.19	1.68
Permeabilidad		8.93x10 <sup>-9</sup>
Compresibilidad		860.00
Cont. Agua (%)	58.10	14.70

En cuanto a la eliminación de BPC's, se tienen los siguientes resultados:

	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
Análisis Total (Filtro-Total) (mg/kg)	43	15
Análisis Total (Suelo) (mg/kg)	43	40

Análisis Químico según procedimiento de prueba de extracción (BET)

**Relación Sólido-Líquido**

	1:4		1:20		1:100	
BPC mg/l	Sin Tratamiento	Con Tratamiento	Sin Tratamiento	Con Tratamiento	Sin Tratamiento	Con Tratamiento
1242	<1.1	<0.42	<0.44	<0.42	<0.41	<0.22
1260	<2.2	<0.84	<0.88	<0.84	<0.82	<0.44

**4. Eficiencia del proceso**

Para filtro-lodo, el análisis total determino que a una concentración inicial de 43 mg/kg, se obtiene una concentración final de 15 mg/kg

Para suelo, el análisis total determino que a una concentración inicial de 43 mg/kg, se obtiene una concentración final de 40 mg/kg

A diferentes relaciones, se tienen las siguientes remociones

l	1:4		1:20		1:100	
BPC mg/l	Sin Tratamiento	Con Tratamiento	Sin Tratamiento	Con Tratamiento	Sin Tratamiento	Con Tratamiento
1242	<1.1	<0.42	<0.44	<0.42	<0.41	<0.22
1260	<2.2	<0.84	<0.88	<0.84	<0.82	<0.44

En todos los casos se cuenta con un período de 30 días promedio

**5. Campos de aplicación**

Suelos y sedimentos contaminados con BPC principalmente

**6. Bioseguridad**

Se realizan pruebas de toxicidad sobre los cilindros siguiendo los procedimientos de EP y TCLP, resultando negativas en todos los casos, lo que indica que la existencia de BPC's después de la aplicación de esta tecnología no se registra

**7. Costos del proceso**

No proporciona algún dato aproximado sobre el costo de aplicación de esta tecnología

**8. Infraestructura requerida para su aplicación**

- Pala mecánica para escarbar y transportar material contaminado
- Vehículo equipado para recibir material contaminado y cuya capacidad sea mayor a 1 yarda cúbica
- Instrumentos de medición y suministro de agua, cemento y aditivos

**9. Status de la tecnología**

Tecnología probada dentro del Programa de Evaluación e Innovación Tecnológica (SITE) de la EPA tanto a nivel laboratorio como a mediana escala

**10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

The Soliditech, Inc, Houston, TX, U.S.A.

**11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

No existe dato en cuanto al lugar de aplicación, sin embargo la fecha de realización de la prueba en campo y laboratorio es de 1990

## DESCONTAMINACIÓN DE SÓLIDOS Y PARTÍCULAS <sup>6</sup>

### 1. Tipo de tecnología aplicada

Eliminación de BPC depositados en suelo por medio de un proceso de lavado utilizando surfactante no-ionico en solución acuosa, completando la eliminación por la extracción de líquidos.

### 2. Técnicas utilizadas auxiliares

No requiere de técnica auxiliar o de apoyo para llevar a cabo este proceso.

### 3. Descripción del proceso

Este método se basa sobre un proceso de extracción líquido-líquido, el cual tiene la capacidad para remover eficientemente BPC e HC en suelos (arena o grava) a partir de una solución acuosa, (surfactante no-ionico). Al seleccionar el surfactante no-ionico para un contaminante orgánico, se tiene como resultado una gran eficiencia en cuanto a la eliminación de BPC.

En esta tecnología, la extracción líquido-líquido puede removerse A uno o más componentes, a partir de un 1er. surfactante al estar en contacto con un 2o, este último es insoluble en el 1er. Siendo el objetivo del segundo surfactante disolver las impurezas o contaminantes contenidos en el 1er. Logrando la extracción líquido-líquido por medio de la mezcla de ambos, a través de una agitación y posteriormente la separación por medio de la diferencia de densidades.

Es por ello, para esta tecnología el suelo contaminado es mezclado con surfactante en solución por un período de tiempo suficiente, con el objeto de reducir la concentración del contaminante. El lavado se realiza a temperatura ambiente, ejecutando esta operación en forma repetitiva; en cada aplicación del procedimiento se tiene una reducción de BPC.

El agua junto con el surfactante se separa, de las partículas y del contaminante; las partículas (suelo) son depositadas en un relleno sanitario para su confinamiento final y los BPC contenidos en solución acuosa son extraídos con solvente de tal manera que sea inmisible en aceite o hidrocarburos, e igualmente, se pretende que el solvente disuelva a los BPC o cualquier otro compuesto presente a partir de la solución acuosa. Esta técnica de extracción líquida-líquida no presenta emulsión durante y después del proceso.

Las propiedades que deben tener los solventes deben ser necesarias para la realización de un proceso de remoción a partir de una solución acuosa, estas propiedades son: alta capacidad para disolver materiales inertes, químicamente estables, fácilmente regenerable, costo de aplicación y adquisición bajo, no corrosivo, no tóxico, no inflamable y no contaminante.

Los resultados que se obtuvieron a partir de experimentos realizados demostraron que el iso-octano, n-octano y n- heptano son excelentes solventes, dando resultados de eliminación de BPC a una concentración inicial de BPC de 118 ppm una relación de solventes 1:1 y una concentración de surfactante de 120 ppm, por lo tanto, se obtuvo la eliminación de BPC del 97% en un periodo de 18 h.

---

<sup>6</sup> TEC.-QUIM.-F

Para completar la eficiencia de este procedimiento, el uso de algún surfactante no requiere de utilizar otro componente químico para la aplicación de este. debido a que el surfactante utilizado debe de tener una gran solubilidad en la materia orgánica; así para reducir las pérdidas del surfactante al momento de aplicarlo, es recomendable que los solventes a utilizar tengan una baja solubilidad en agua o bien las soluciones acuosas empleadas cumplan con esta circunstancia, asimismo, los bajos pesos moleculares ayudarán a recuperar una parte del solvente utilizado en la solución acuosa. Este tipo de surfactantes garantiza una eficiencia de por lo menos 97%.

#### **4. Eficiencia del proceso**

Resultados obtenidos con diferentes combinaciones de surfactantes y solventes teniendo una concentración inicial de BPC de 305 ppm con una concentración de surfactante de 1% del volumen en peso de la muestra y una relación 1:1 de solvente, se obtuvo una eliminación de BPC del 98% en un tiempo de 24 h.

#### **5. Campos de aplicación**

En suelos (arena o grava) que contengan BPC e HC

#### **6. Bioseguridad**

Este concepto lo considera de manera indirecta y es aplicable de manera parcial, refiriéndose solo en los requisitos que se tienen para la selección y aplicación de algún surfactante o solvente.

#### **7. Costos del proceso**

No menciona alguna cifra que indique un costo, solo indica que el costo del proceso es bajo.

#### **8. Infraestructura requerida**

Equipo de laboratorio necesario para determinar concentraciones iniciales y finales incluyendo equipo de cromatografía de líquidos con el objeto de cuantificar la eliminación de BPC en soluciones acuosas.

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología patentada en EE.UU. probada y desarrollada a nivel de laboratorio a gran escala.

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Tecnología desarrollada por General Electric Company en Schenectady, N.Y. U.S.A.

#### **11. Lugar y fecha donde haya sido aplicada anteriormente**

No especifica un lugar determinado, sin embargo, la fecha de desarrollo y presentación de la tecnología fue en Junio 1995

# PROCESO DE EXTRACCIÓN Y EQUIPO PARA ELIMINAR BPC EN SUELOS Y SEDIMENTOS<sup>7</sup>

## 1. Tipo de tecnología aplicada

Proceso de eliminación de contaminantes inorgánicos (sales metálicas) y contaminantes orgánicos (BPC) en suelos y sedimentos por medio de solventes y surfactantes.

## 2. Técnicas utilizadas auxiliares

No requiere de alguna técnica auxiliar para llevar acabo este proceso.

## 3. Descripción del proceso

El problema real que existe al limpiar algún suelo contaminado con BPC's, es la presencia de agua, debido a la tensión superficial con el suelo, envolviendo a las partículas que contienen BPC's y suelo, formando así una barrera impenetrable. Para ello cuando el agua esta presente se requiere de aplicar el solvente correcto, este puede ser de dos características básicas:

**Hidrofilico**, el cual es utilizado en presencia de suelo-agua, este solvente podría no tener efectos físicos sobre el suelo y al mismo tiempo es separado fácilmente del agua.

**Hidrofibico**, este tipo de solvente podría tener efectos sobre el agua-suelo, precipitando la mezcla, con el objeto de realizar una separación agua-suelo y contaminante, sin embargo si la precipitación es prematura, los contaminantes no podrán ser separados.

Por lo tanto cualquier contaminante (BPC, HC, BTX y COV's) puedan ser disueltos por un solvente hidrofobico junto con un surfactante, los cuales pueden ser removidos a partir de diferentes mezclas de suelo-agua, existiendo relaciones de suelo de 1-20% del peso total de la muestra.

La aplicación del solvente es en forma de rocío, buscando ser soluble en el agua, esta solubilidad se utiliza con el objeto de requerir de 30-100 partes del solvente para disolver 1 parte de contaminante, bajo condiciones de presión y temperatura ambiente; una característica del solvente es que sea insoluble en agua, teniendo una densidad menor al 0.8 y un punto de ebullición por debajo del punto de ebullición del agua, pretendiendo obtener una separación suelo-solvente más eficiente, siendo los solventes más propios para el caso de BPC y HC son: propano, butano, pentano, hexano, octano, ciclopentano y ciclohexano

La ventaja de utilizar solventes con punto de ebullición bajo, es con el objeto de facilitar su recuperación por medio del proceso de destilación y así volverlo a utilizar nuevamente obteniendo un 88% de recuperación, el remanente junto con los BPC's y HC son colectados para un tratamiento posterior. La cantidad de solvente a utilizar esta dada al obtener una saturación de la mezcla suelo-agua-contaminante, tomando como referencia el 50% del peso total del suelo a tratar.

Al combinar surfactante con solvente, y al estar en contacto con el suelo así como el contaminante, se origina una hidratación sobre las partículas, esta hidratación esta acompañada por la absorción del solvente dentro de la mezcla (suelo-agua-surfactante);

---

<sup>7</sup> TEC.-QUIM.-G

experimentos indican que al tener una mezcla de suelo-agua-surfactante, la precipitación de solventes es del 20% promedio, asimismo se debe mantener un pH de 7, sin embargo, para evitar la hidratación, se puede agregar ácido dependiendo del tipo de surfactante y del solvente a utilizar.

No obstante cuando se utiliza un surfactante en forma pulverizada al entrar en contacto con la mezcla y el contaminante, se realiza un rompimiento entre contaminante y partículas, lo que implica una recuperación de solvente del 40% por proceso de extracción y al complementar la separación de suelo y agua, se obtiene una recuperación de solvente del orden del 88%.

Por tanto el surfactante es generalmente incorporado dentro del solvente, así la utilización del surfactante esta dada en relación al peso del material contaminado, por ejemplo cuando se tiene una tonelada de suelo contaminado solo o en mezcla (agua) la utilización del surfactante es del orden de 400 lb/ton. de material contaminado. Los surfactantes más utilizados son surfactantes no-ionicos, siendo los más representativos los ácidos orgánicos, aminas y óxidos de etileno, utilizados a una relación de 0.5-8.0% del peso total del suelo contaminado a tratar. Los surfactantes cationicos utilizados son los alifáticos, aminas y sus derivados incluyendo etileno, polipropanol, polietanolamina entre otros.

Los surfactantes utilizados son surfactante activos, los cuales reducen la tensión superficial del agua, debido a que esta presenta una tendencia a agrupar las partículas sólidas; experimentos de laboratorio indican que la temperatura es un factor importante para la extracción eficiente de contaminantes en el suelo. Por ello un incremento en la temperatura incrementa la velocidad de desorción de los contaminantes, los cuales se adhieren a la superficie de los sólidos. En base con lo anterior el rango de temperatura más adecuada es de 50-100 °C.

El tiempo requerido para alcanzar una mezcla eficiente dependerá del tipo de mecanismo usado, pero sin importar el tipo de mecanismo el tiempo promedio adecuado es de 2-10 minutos, este tiempo es específico para transferir los sólidos a fase líquida, después de alcanzar un equilibrio, la agitación es detenida, realizando una separación de sólidos y líquidos por medio de la fuerza de gravedad y centrifuga.

La fase líquida contiene a los contaminantes y es vaciada en un separador líquido formando una columna de destilación, allí el solvente es procesado y purificado para su reuso en el proceso, obteniendo así una eficiencia de eliminación del contaminante. No obstante, el proceso de eliminación de contaminantes se puede sistematizar de la siguiente manera:

Primeramente suelo contaminado y agua son depositados en forma de apilamiento, esta forma es con el fin de eliminar parte del agua por gravedad, posteriormente el contaminante es llevado por medio de una banda transportadora a un primer contenedor, el contaminante es transferido dentro del contenedor sirviendo este dispositivo para clasificar de manera rápida el tamaño de partícula; posteriormente la clasificación se realiza por medio de una banda vibradora, en seguida el suelo contaminado viaja hacia un tanque de agitación este tanque esta compuesto por un motor eléctrico, al lado del motor se cuenta con una línea de dosificación de solvente, el solvente es suministrado por dosificadores encontrándose almacenado en tanques.

El tanque de agitación recibe por el extremo opuesto al solvente por medio de una línea de suministro de surfactante y al suelo contaminado se mezcla con estos compuestos químicos por un tiempo específico, después de obtener una estabilidad en la mezcla, esta es enviada a un "segundo tanque", en este último, se realiza una separación sólido-líquido, después de esta separación el solvente que contiene a los BPC's es enviado hacia una columna de destilación, cuyo objetivo es eliminar a los BPC y recuperar posteriormente por medio de una

condensación al solvente. El proceso continua hasta que el surfactante pasa por un secador, incrementando la temperatura donde finalmente se obtiene al suelo descontaminado y en otro aspecto, se obtiene una recuperación de surfactante al cual es enviado al inicio del proceso e iniciando el ciclo nuevamente.

#### **4. Eficiencia del proceso**

Para corroborar la eficiencia de esta tecnología, se realizaron varios experimentos presentando el resultado de dos de ellos.

60g de BPC como condiciones iniciales; se tiene 30% del peso en agua, 1% del peso de surfactante anionico, 120 g. de suelo a temperatura de 80 °C y tiempo de residencia de 5 minutos, se obtiene una remoción de 50g de BPC, por lo tanto solo 10g de BPC se consideraran remanentes

100 g de BPC como condiciones iniciales, se tiene 75% del peso en agua, 25% del peso en sólidos, 1% del peso de surfactante cationico, .25% de hexano a temperatura de 68 °C y tiempo de residencia de 5 minutos, se obtiene un 95% de eliminación de BPC

#### **5. Campos de aplicación**

Arena, grava, arcilla, sedimentos de ríos o lagos contaminados con BPC, HC, BTX y COV.

#### **6. Bioseguridad**

Este proceso no considera este concepto de manera directa o indirecta.

#### **7. Costos del proceso**

No precisa ningún dato numérico, solo indica de manera textual que el costo es bajo.

#### **8. Infraestructura requerida**

Equipo necesario para la instalación del proceso incluyendo motores eléctricos, tanques de almacenamiento de surfactante y solvente, tanque de mezclado, dosificadores, termopares, así como las conexiones mecánicas necesarias para la instalación del proceso, incluyendo equipo para determinar concentraciones iniciales y finales de los contaminantes.

#### **9. Status de la tecnología**

Esta tecnología fue patentada en la oficina europea de patentes, asimismo, se realizaron pruebas de eficiencia y diseño a nivel de laboratorio.

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

ENSR Corporation  
3000 Richmond Avenue, Houston, TX, 77098 U.S.A.

#### **11. Lugar y fecha donde haya sido aplicada anteriormente**

No especifica un lugar determinado, sin embargo, la fecha de desarrollo y presentación de la tecnología fue en Marzo 1990

## **TRATAMIENTO DE SUELO CONTAMINADO CON BPC POR MEDIO DE LA EXTRACCIÓN DE SOLVENTES<sup>8</sup>**

### **1. Tipo de tecnología**

Remediación de suelos contaminados con BPC a temperatura ambiente por medio de solventes *in-situ*

### **2. Técnicas Utilizadas Auxiliares**

No requiere de una técnica auxiliar adicional

### **3. Descripción del proceso**

La tecnología desarrollada por medio de la aplicación de solventes en suelos contaminados con BPC, consiste en agregar solvente en el suelo en forma directa, formando así una mezcla de solvente - suelo - BPC.

El resultado de la solución de BPC y solvente, es separado del suelo, extrayendo a los BPC y al propio solvente, dejando libremente el suelo, este paso es conocido como ciclo de lavado.

No obstante al aplicar cada ciclo de lavado, el 100% del solvente no es recuperado, sin embargo, algunos BPC se quedan como remanente en el suelo junto con el remanente del solvente. Si el remanente de BPC en el suelo es aceptable, entonces el proceso se detiene.

Si la concentración de BPC en el suelo es ligeramente menor o igual a la que existía después del primer ciclo, entonces se aplica otro ciclo de lavado, cada ciclo de lavado es aplicado hasta que la concentración de BPC en el suelo se encuentre dentro de una concentración dada.

Después de eliminar a los BPC, el solvente remanente en el suelo es eliminado por medio de un proceso de volatilización o bien por la extracción del mismo en forma de vapor.

Posteriormente, el solvente contaminado es procesado para destruir a los BPC y reducir su volumen, la limpieza del solvente es entonces reducida dentro de un circuito cerrado (close-loop); por tanto el concentrado es colectado y transportado hacia instalaciones propias para la destrucción del contaminante.

La etapa final sobre el proceso de tratamiento consiste en adicionar microbios y nutrientes para remover cualquier residuo de solvente en el suelo, este procedimiento se realiza en dos días después del tratamiento propio.

---

<sup>8</sup> TEC.-QUIM.-H

#### **4. Eficiencia del proceso**

La eliminación de BPC a partir de una concentración inicial máxima de 170 mg/kg obteniendo concentración final de 2 mg/kg; Sin embargo, el tiempo promedio requerido sólo para la implementación del proceso es de dos días; no obstante, podemos estimar con base en la literatura existente en esta materia, que el tiempo de aplicación total para esta tecnología es aproximadamente de 3 a 5 semanas.

#### **5. Campos de aplicación**

Suelos contaminados con BPC principalmente

#### **6. Bioseguridad**

Al aplicar cualquier solvente, esta tecnología toma en cuenta la reglamentación de la Toxic Substance and Control Act (TSCA), las pruebas realizadas con la Environmental Protection Agency (EPA) indicaron que el proceso de descontaminación de suelos esta dentro del reglamento de la (TSCA).

#### **7. Costos del proceso**

No se cuanta con datos sobre este concepto

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Dada la descripción del proceso, la infraestructura necesaria será aquella capaz de realizar análisis en suelo, determinar concentraciones de BPC, sistemas de aplicación y recolección de solventes impregnado con BPC así como el transporte del mismo.

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología probada en el Programa de Innovación y Evaluación Tecnológica (SITE) de la EPA, así como la regulación del Código Federal de Reglas (40 CFR 761)

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Terra - Kleen Response Group, Inc.  
4152 Kerwood Court, San Diego, CA 92130 U.S.A.

#### **11. Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

Naval Air Station North Island, Coronado California en 1994  
Naval Environmental Leadership Program en mayo 1994

225550

# EXTRACCIÓN DE CONTAMINACIÓN ORGÁNICA<sup>9</sup> POR MEDIO DE SURFACTANTES NO IONICOS

## 1. Tipo de tecnología aplicada

Extracción no-ionica de contaminantes orgánicos acumulados sobre un sustrato y por medio de la utilización de surfactantes.

## 2. Técnicas utilizadas auxiliares

No requiere de una técnica auxiliar o de apoyo para llevar a cabo el proceso.

## 3. Descripción del proceso

Este método presenta un proceso de separación de contaminantes sobre un sustrato (sedimentos, suelo, arena, arcilla) por medio de extracción no-ionica manteniendo una baja solubilidad de surfactante en el agua, utilizando al surfactante como enlace entre el contaminante y el sustrato. Este método comprende las siguientes etapas:

- 1) Mantener el sustrato en medio acuoso junto con una mezcla de partículas que contengan cantidad suficiente de óxido magnético y surfactante anionico, este actuará como receptor por medio de un cambio anionico hacia la partícula.
- 2) Mantener en contacto tanto al contaminante y al sustrato el tiempo necesario a fin de permitir la ruptura de la unión química de estos, por medio del surfactante.
- 3) Separar tanto partículas como surfactante y contaminante magnéticamente dejando aislado al sustrato.

El primer paso consiste en poner en contacto el sustrato con algún contaminante orgánico (BPC, BTX, HC); mezclado con óxido magnético y surfactante anionico, el agente contaminante orgánico se comporta como un agente no- ionico, el cual es absorbido en la superficie del sustrato; para facilitar este proceso el contacto se realiza en un medio acuoso, como el agente contaminante no-ionico tiene baja solubilidad en el agua, las partículas contienen cierta cantidad de óxido de magnesio disueltas en el agua propiciando que agua y partículas actúen como uno solo.

El óxido es tratado con surfactante anionico con el fin de depositar al surfactante anionico sobre la superficie del óxido, debido a que el óxido generalmente tiende a cambiar el pH de la solución acuosa al momento de estar en contacto, generalmente el valor del pH es ajustado a 8 con ello las partículas de óxido atraen al surfctante anionico.

Cualquier óxido magnético como son óxido férrico, óxido ferroso, hidróxido férrico y óxido de titanio, pueden utilizarse para este fin a una relación de 25% del peso total del sustrato.

Para el caso de surfactante anionico, estos pueden ser ácido sulfúrico, fosfatos y sulfatos de sodio entre otros.

El segundo paso es la separación del contaminante con el sustrato, así como el agua y el surfactante absorbido por las partículas magnéticas. Sin embargo, el tiempo de contacto entre el contaminante y el surfactante debe ser el necesario de tal manera que se logre una

---

<sup>9</sup> TEC.-QUIM.-I

adecuada separación del contaminante y el sustrato, al mismo tiempo se debe de seleccionar un surfactante que tenga gran afinidad hacia las partículas magnéticas.

El tercer paso, consiste en separar el sustrato del surfactante esta separación es llevada a través de una separación magnética producida por el óxido magnético y absorbido por el surfactante.

El último paso consiste en la extracción de los contaminantes por medio de partículas magnéticas, para ello se utiliza un solvente orgánico o una solución base con pH mayor que el que contiene las partículas magnéticas, finalizando así el proceso.

#### **4. Eficiencia del proceso**

Una muestra de 10 g. de suelo contaminado con BPC a una concentración de 5.74 mg/Kg, 54 ml de agua, 1 g de óxido férrico y 2 ml de policarbonato en solución, tanto el sustrato contaminado como el surfactante se mezclaron por un lapso de 6 h. y al final se obtuvo una eliminación de BPC al 99%.

#### **5. Campos de aplicación**

En sedimentos, suelos, arena y arcilla contaminada con BPC, BTX y HC así como agua contaminada con algún contaminante antes mencionado.

#### **6. Bioseguridad**

Este proceso no considera este concepto de manera parcial o total

#### **7. Costos del proceso**

No presenta una cifra que indique un costo de manera directa, solo de manera textual indica que el costo es bajo.

#### **8. Infraestructura requerida**

Equipo de laboratorio necesario para realizar mediciones en condiciones iniciales y finales asimismo poder determinar pH del suelo y concentraciones adecuadas tanto del surfactante como de algún compuesto no-ionico a utilizar.

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología patentada en EE.UU; probada y desarrollada a nivel de laboratorio

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Tecnología desarrollada por Trustees of Princeton University, Princeton. N.Y. por Peter R. Jaffe.

#### **11. Lugar y fecha donde haya sido aplicada anteriormente**

No especifica un lugar determinado, sin embargo, la fecha de desarrollo y presentación de la tecnología fue en octubre 1995.

# DESCONTAMINACIÓN DE SUELO Y AGUA POR EXTRACCIÓN CON SURFACTANTES<sup>10</sup>

## 1. Tipo de tecnología aplicada

Tratamiento de suelo contaminado y lodos industriales por medio de la extracción de surfactantes y aditivos en solución denominado proceso GHEA

## 2. Técnicas utilizadas auxiliares

No requiere de la utilización de alguna técnica auxiliar para su aplicación

## 3. Descripción del proceso

El proceso comienza con la excavación en el sitio, iniciando una remoción del suelo contaminado por medio de la aplicación del surfactante en solución bajo condiciones de control como son; tiempo, temperatura y pH; así al aplicar el surfactante en el sitio se inicia la etapa de extracción; la dosificación y composición del surfactante es función del tipo de suelo y del nivel de contaminación que exista.

Después de aplicar el surfactante, se inicia la etapa de enjuague y filtración; el enjuague se realiza con agua la cual es reciclada con el fin de remover todos los remanentes del surfactante del suelo, y posteriormente se filtra.

En la etapa de extracción, se realiza el lavado del líquido este es separado en dos fases, fase líquida (agua) y fase densa (lodo) de surfactante, la fase de separación se realiza controlando temperatura y pH, el cual es específico para cada formulación de surfactante.

La fase líquida es tratada por medio de un proceso combinado de flotación con aire y ultrafiltración, este proceso elimina los residuos o remanentes del surfactante.

Los metales son separados por medio de una solución, a través de un proceso de flotación con aire, controlando el pH y manteniéndolo entre 8-11

La separación del surfactante y compuestos orgánicos se realiza por remoción utilizando vapor y posteriormente extraer al solvente, el solvente es recuperado al someterse a destilación y con ello el surfactante es regresado al proceso inicial.

## 4. Eficiencia del proceso

Según resultados de los análisis aplicados antes y después del proceso, se tiene lo siguiente:

Muestra sin tratamiento 380 00 mg/kg (con. inicial)

Muestra con tratamiento 0.57 mg/kg (con. final)

porcentaje de eliminación 99.8 %

Para este caso, la muestra de suelo presentaba una relación de 25-50% de arena y arcilla respectivamente

---

<sup>10</sup> TEC.-QUIM.-J

## **5. Campos de aplicación**

Suelos, lodos y agua contaminada con BPC

## **6. Bioseguridad**

Este concepto no lo considera como tal, sin embargo, según el proceso no es tóxico, debido a que no hay desdoblamiento del surfactante

## **7. Costos del proceso**

El costo de operación e inversión se encuentra entre USD \$ 50-80 por tonelada

## **8. Infraestructura requerida**

Equipo para análisis de laboratorio en muestras de suelo, aditamentos para suministrar el surfactante, equipo para la separación del contaminante, así como equipo para recuperar el agua utilizada.

## **9. Status de la tecnología**

Esta tecnología a medida que fue desarrollada también fue probada por diferentes instituciones como son:

- Centro de Investigación para el Manejo de Sustancias Peligrosas.
- Departamento de Ingeniería Química, New Jersey
- Agencia de Protección Ambiental, Cincinnati

## **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

GHEA Associates  
5 Balsam Court  
Roseland, New Jersey. U.S.A.

## **11. Lugar y fecha donde haya sido aplicada anteriormente**

Se probó y aplicó en lugares contaminados con BPC provenientes del estado de N.Y. EE.UU., en 1992

# SELECCIÓN DE SOLVENTES Y SURFACTANTES PARA LA ELIMINACIÓN DE BPC'S<sup>11</sup>

## 1. Tipo de tecnología aplicada

Aplicación de solventes y surfactantes para la eliminación de BPC'S o HC en superficies metálicas incluyendo interiores en tuberías.

## 2. Técnicas utilizadas auxiliares

- Por medio de un modelo de flujo multi-fase el cual pronosticar la migración de BPC'S en tuberías y evaluar la eliminación de BPC'S.

## 3. Descripción del proceso

El proceso consta de 4 pasos, los cuales son: absorción del surfactante en tubería, desorción de moléculas de HC con alto peso molecular en válvulas y depósitos de grasas, encapsulamiento y oxidación de BPC y precipitación de contaminantes.

- Se determino que los BPC son retenidos fuertemente por el carbón activado indicando que el carbón del acero tiene gran afinidad con la acumulación de BPC así, también, se fijan a otras superficies metálicas como son partes de válvulas.
- La absorción es importante para la retención de BPC en tuberías con cierto espesor y a condiciones de baja condensación de líquido, sin embargo a pesar que la relación absorción/desorción se determino con base en el estudios con BPC, esta reacción es rápida y reversible cinéticamente, esto implica la restricción para ciertas superficies en tuberías.
- Por ello, el terpeno se utiliza como solvente y demostró tener una mejor solvencia hacia los BPC así la cinética no se encuentra restringida.
- Según experimentos demostraron que la contaminación de BPC en partículas al estar en contacto con soluciones de oxidación indicaron una mayor acumulación de BPC y con ello una probable descontaminación
- La selección de un solvente para eliminar BPC en tuberías es compleja, debido a que los BPC no se encuentran en un solo tipo de aceite sino en mezclas de aceites y grasas, lo que la degradación de BPC es bajo esas circunstancias, para ello, el terpeno se utilizó como solvente así el surfactante al estar bajo condiciones de presión - temperatura tendrá la disponibilidad de disolver grasas y aceites obteniendo una alta afinidad para los BPC.
- La descontaminación de BPC en una tubería depende de la aplicación correcta del solvente y por tanto dicho solvente debe de cumplir con lo siguiente:
  - \* Alta solvencia en BPC
  - \* Permanezca como líquido bajo cualquier condición de presión y temperatura
  - \* Baja toxicidad
  - \* Vapor del solvente debe ser inocuo
  - \* El consumo del solvente debe ser dosificado
  - \* Debe ser económico

---

<sup>11</sup> TEC.-QUIM.-K

- asimismo, se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones para garantizar una adecuada remoción de BPC

\* Si los mecanismos son predominantes, significa que la eficiente limpieza de BPC estará dada como producto de la corrosión

\* Si la absorción o precipitación predominan entonces la desorción puede llevarse a cabo a través de un lavado con solvente o surfactante

#### **4. Eficiencia del proceso**

De manera textual, indica que presenta una alta eficiencia, pero no indica algún porcentaje, no obstante, el tiempo de aplicación promedio de esta tecnología es de días a semanas en función del grado de contaminación y de la selección del solvente o surfactante, sin embargo es aplicable para concentraciones abajo de 50 ppm y magnitudes moleculares entre bifenil y decaclorobifenil

#### **5. Campos de aplicación**

Superficies metálicas e interior de tuberías principalmente

#### **6. Bioseguridad**

La tecnología considera este concepto de manera parcial, debido a que la selección y aplicación de cualquier solvente, debe ser de baja toxicidad e inocuo

#### **7. Costos del proceso**

Indica que es bajo, pero no presenta una cifra que lo corrobore.

#### **8. Infraestructura requerida**

Equipo de laboratorio necesario para realizar análisis a diferentes mezclas de aceite o grasas, así como los instrumentos para toma de muestra.

#### **9. Status de la tecnología**

El 50% de la tecnología es aplicación real y 50% restante en prueba en laboratorio

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Roy F. Weston, Inc. (WESTON), 2300 Clayton Road, Suite 1580 Concord, California 94520 U.S.A.

#### **11. Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

No especifica un lugar determinado, en cuanto a la fecha de aplicación se presentó a partir de 1993

## **DESCONTAMINACIÓN DE BPC'S EN ACEITE DE TRANSFORMADORES<sup>12</sup>**

### **1. Tipo de tecnología aplicada**

Proceso de extracción de BPC'S, HC y metales por medio de sustancias químicas

### **2. Técnicas utilizadas auxiliares**

- Aplicación de fórmulas químicas desarrolladas para la migración y eliminación de BPC y HC

### **3. Descripción del proceso**

Esta tecnología está conformada por tres etapas; siendo: preparación de la superficie, extracción y enjuague, formando así un ciclo de eliminación.

#### **Preparación de la superficie**

- Se utiliza una solución compuesta por ácidos orgánicos e inorgánicos con el objeto de impregnar y aislar a los contaminantes por medio de un químico especial.
- Se toma en consideración la migración y las fuerzas secundarias sobre los contaminantes para estimar la profundidad de estos debido al comportamiento electrostático y químico, con ello se determina la tendencia que existe de los BPC para depositarse en los poros del material.

#### **Extracción**

- Requiere de micro y macroemulsificantes junto con un electrólito para la impregnación del mismo hacia los contaminantes, definiendo previamente tiempo de residencia.
- El emulsificante penetra dentro de los poros del material lo más profundo posible, rompiendo la cadena del contaminante para evitar una mayor contaminación o migración.

#### **Enjuague**

- Se requiere un pH neutro, esto ayuda a que los emulsificantes eliminen vapores orgánicos o compuestos remanentes o furtivos
- Todos los químicos son aplicados en bajos volúmenes (en forma de spray) para eliminar el consumo de estos y garantizar una adecuada impregnación y penetración en los materiales, así se eliminan los BPC'S y HC concluyendo el proceso.

---

<sup>12</sup> TEC.-QUIM.-L

#### **4. Eficiencia del proceso**

En la aplicación del 1er. ciclo se garantiza un 60% de eliminación de contaminantes en los ciclos posteriores se tiene un 90% de eliminación de BPC y HC, considerando un tiempo de 24 h. continuas por cada ciclo, reduciendo 60% de los BPC'S, a partir de una concentración inicial de 1000 mg/cm<sup>2</sup> como concentración máxima.

#### **5. Campos de aplicación**

Superficies de concreto, ladrillos, superficies metálicas, madera y acero que estén contaminados con BPC y HC

#### **6. Bioseguridad**

Este concepto no lo indica, aún cuando haya sido probada esta tecnología por el SITE

#### **7. Costos del proceso**

USD 5.0/ft<sup>2</sup> para concreto a una concentración de 1000 mg/cm<sup>2</sup>

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Equipo necesario para realizar toma de muestras así como la aplicación de surfactantes en cada etapa, asimismo se requiere de 4 técnicos y un supervisor en todo el ciclo.

#### **9. Status de la tecnología**

Esta tecnología fue probada dentro del Programa de Evaluación e Innovación Tecnológica (SITE) de la EPA en 1994

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

TechXtract Technology, 4710 Bellaire Boulevard, Texas, U.S.A.

#### **11. Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

En el Departamento de Energía y el Departamento de Defensa de los EE.UU., así como en la industria eléctrica, del acero, aluminio y otras; a partir de 1994.

## REMEDIACIÓN DE RESIDUOS<sup>13</sup>

### 1. Tipo de tecnología aplicada

Tratamiento químico in-situ en suelo y cenizas

### 2. Técnicas utilizadas auxiliares

Se toman muestras de suelo de manera aleatoria dentro del sitio identificado previo a un análisis realizado, con el objeto de determinar concentración inicial de BPC

### 3. Descripción del proceso

Previa identificación de la concentración inicial (100 ppm de BPC) existente en el sitio, se tomaron 44 muestras del suelo en cuatro áreas dentro del sitio, estas muestras se analizaron identificando los niveles de BPC.

12 sitios para muestras son seleccionados adicionalmente, en 12 de ellos, solo 4 se hicieron perforaciones a profundidad de 8 ft con el objeto de realizar un análisis completo del suelo en las cuatro perforaciones.

A partir del nivel de contaminación existente en las 4 muestras, se tomaron 44 muestras adicionales, y 27 de ellas, fueron seleccionadas para análisis en laboratorio.

Al realizar el análisis a las 27 muestras, 7 contenían altas concentraciones de BPC (77 y 150 ppm), 5 muestras presentaron concentraciones menores a 1 ppm y el resto con concentraciones de 25 ppm, asimismo, los valores de pH oscilaron desde 6.9 - 7.9, ninguna presentó un valor de pH con condiciones corrosivas.

Una vez determinado el nivel de contaminación y ciertas características del suelo, se realiza la aplicación de químicos en el lugar y con ello se lleva a cabo la eliminación de BPC en el sitio.

### 4. Eficiencia del proceso

No presenta un dato de manera exacta, solo indica que se tendrá una concentración final de 10 ppm de BPC tomando en cuenta que la concentración inicial promedio es de 100 ppm

### 5. Campos de aplicación

Suelos y cenizas producto de un incendio

### 6. Bioseguridad

Este concepto no lo contempla de manera directa o indirecta

### 7. Costos del proceso

La limpieza del sitio se estima en USD \$ 1000 tomando en cuenta que existen BPC, plata y plomo como contaminantes principales

---

<sup>13</sup> TEC.-QUIM.-M

### **8. Infraestructura requerida**

Equipo de campo para realizar perforaciones someras en subsuelo y equipo de laboratorio para determinar concentración inicial y final.

### **9. Status de la tecnología**

Tecnología desarrollada para un problema y lugar en particular a nivel de experimentación a gran escala

### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Radían Corpration

### **11. Lugar y fecha donde haya sido aplicada anteriormente**

Fort Huachaca, Arizona, U.S.A. 1990

## **PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN<sup>14</sup>**

### **1. Tipo de tecnología aplicada**

Proceso de separación química de BPC's en suelo y lodo por medio de procesos físicos

### **2. Técnicas utilizadas auxiliares**

No requiere de alguna técnica auxiliar para llevar a cabo este proceso

### **3. Descripción del proceso**

El proceso consiste en separar el contaminante a partir de suelo o sedimento por medio de un sistema cerrado, por lo que no hay contaminación a la atmósfera, así mismo el proceso contempla adición de compuestos químicos sometidos a presión de vacío y temperaturas por debajo del rango de incineración, posteriormente se mezclan los contaminantes bajo estas condiciones iniciándose una emisión de contaminantes en estado gaseoso, la cual se condensa y finalmente se le aplica un tratamiento posterior; los principales pasos que integra este proceso son:

1. Se introduce el material en una basija, la cual se inyecta N<sub>2</sub> como gas inerte y posteriormente se realiza vacío.

2. Se realiza una mezcla del contaminante y el gas inerte se empieza a extraer, asimismo se incrementa la temperatura a 250 °C promedio y 200 mm Hg de presión, bajo estas condiciones continuamente se mezcla el contaminante, resultando las primeras emanaciones del contaminante en forma de vapor.

3. Considerando un tiempo de operación de 1 hr. En forma continua, se remueve el contaminante a las condiciones de presión y temperatura promedio. Asimismo de manera intermitente se agregan productos químicos de tal manera que se separen los contaminantes en forma rápida y eficiente del suelo, asimismo se realiza una separación del contenido de agua que exista.

4. Finalmente se filtra y posteriormente se condensan los contaminantes con el objeto de proporcionarles un tratamiento físico - químico de tal manera que a partir de concentraciones iniciales de 1000 ppm, se garantice una concentración final de 25 ppm.

---

<sup>14</sup> TEC-QUIM-N

#### **4. Eficiencia del proceso**

A partir de un volumen de 1.5 toneladas de suelo contaminado con BPC, y un tiempo de operación de 1 hora a 250°C y 50 mm Hg a una concentración inicial de 1000 ppm, se obtiene una concentración final de 25 ppm.

#### **5. Campos de aplicación**

Suelos, arena y sedimentos que contengan BPC's o pentaclorofenoles

#### **6. Bioseguridad**

Este concepto no lo considera, sin embargo, al indicar que es un sistema cerrado, implica que no hay emisiones a la atmósfera

#### **7. Costos del proceso**

No proporciona una cifra que indique un costo de manera numérica, solo menciona que le costo es bajo.

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Equipo de laboratorio para determinar condiciones iniciales y finales, así como equipo que permita incrementar temperatura, realizar condiciones de vacío y suministra gas inerte

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología patentada en la oficina de patente europea, Londres, Probada y desarrollada a nivel laboratorio

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Tecnología desarrollada por Chemical Waste Management, Inc.

#### **11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

No especifica un lugar determinado, sin embargo la fecha de desarrollo y presentación de la tecnología ante la oficina de patentes fue en junio 1993

# **PROCESO BIOTECNOLÓGICO PARA LA BIODEGRADACIÓN Y ELIMINACIÓN DE BPC O PRODUCTOS QUE LOS CONTENGAN<sup>15</sup>**

## **1. Tipo de tecnología aplicada**

Biodegradación de BPC por medio de bacterias desarrolladas para este fin.

## **2. Técnicas utilizadas auxiliares**

- Análisis previo de la concentración de BPC para determinar la cantidad de biomasa, oxígeno, nutrientes, polímeros, emulsificantes y compuestos necesarios y requeridos para eliminar BPC

## **3. Descripción del proceso**

Primeramente se colocan los BPC o productos que los contengan en un biorreactor o fermentador, el cual ha sido inoculado con bacterias no patógenas, capaces de vivir en contacto con BPC y además alimentarse de ellos.

Como resultados de dicha alimentación, los microorganismos cultivados y seleccionados alimentan los BPC y productos que los contengan, generando agua, CO<sub>2</sub>, sales y proteínas los cuales no son subproductos tóxicos.

Se recomienda que el biorreactor y el equipo que se utiliza en el proceso cuente con los aditamentos necesarios para regular la aereación, temperatura y características del medio en el cual se lleva a cabo el procedimiento biológicos, así el proceso de biodegradación continua conforme se agreguen BPC al sistema.

## **4. Eficiencia del proceso**

Esta tecnología no proporciona un dato sobre eficiencia, sin embargo, con base en la literatura se supone que la eficiencia para esta tecnología esta basada en pruebas laboratorio exclusivamente

## **5. Campos de aplicación**

Productos que contengan o este impregnadas con BPC

## **6. Bioseguridad**

Debido a que la biodegradación se realiza en un sistema cerrado, aparentemente no presenta efectos colaterales negativos ni sub-productos tóxicos, el proceso considera este concepto de manera general y superficial

---

<sup>15</sup> TEC.-BIO.-O

## **7. Costos del proceso**

Dado las características del proceso, se tienen un costo bajo de operación aun cuando no especifica una cifra de manera exacta, solo indica textualmente.

## **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

-Equipo y materiales de laboratorio para análisis de concentraciones iniciales y finales, así como determinar la cantidad de biomasa, oxígeno, nutrientes, polímeros y emulsificantes.

-Biorreactor y equipo capaz de regular la aereación, temperatura y características del medio en el cual se lleva el proceso biológico.

## **9. Status de la tecnología**

Tecnología patentada en SECOFI, como patente de invención y probada a nivel laboratorio

## **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Esta tecnología fue desarrollada por Edgar Legorreta López  
Av. Pacifico 468 Col. Rocedal Coyoacan, México, D.F.

## **11. Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

No especifica un lugar determinado, sin embargo la fecha de desarrollo y presentación de la tecnología fue en Marzo 1994

# BIODEGRADACIÓN DE SEDIMENTOS CONTAMINADOS CON BPC Y PAH<sup>16</sup>

## 1. Tipo de tecnología aplicada

Tratamiento de suelo y sedimento por medio de reactor biológico en condiciones *ex-situ* (*on-site*)

## 2. Técnicas utilizadas auxiliares

- Previa biodegradación aerobia de BPC y PAH por medio de un laboratorio a escala.
- Biodegradación de BPC y PAH en una planta piloto adicionando carbón, fósforo y nitrógeno.

## 3. Descripción del proceso

El proceso contempla básicamente dos fases, las cuales son independientes si el grado de eliminación de contaminantes es adecuado, de no ser así, se relacionan ambas fases, sin embargo la primera se refiere a pruebas de laboratorio y la segunda a pruebas piloto a gran escala.

### FASE I

Después de realizar una pre-biodegradación en laboratorio a escala, se procede a aplicar pruebas básicas bajo condiciones aerobias y con ello determinar la biodegradación de sedimentos lacustres, para ello, se requiere de adicionar carbón.

Se preparan 60 acres de sedimento lacustre con una alta concentración de HC, así mismo se cuenta con la presencia de carbón con el objeto de realizar una mezcla homogénea de BPC y PAH, y así iniciar la degradación con microorganismos.

Se adiciona fósforo y nitrógeno con el objeto de reponer las precipitaciones de calcio y fósforo, donde finalmente se degradan los BPC y PAH.

### FASE II

Previamente en una planta piloto, se introducen 1500 galones de lodo (incluyendo nutrientes), posteriormente en un reactor, se mezcla suelo contaminado con arena a una relación de 50:50.

El tratamiento se aplica sobre un volumen de suelo cuyas dimensiones son de 4ft de ancho, 22ft de largo y 0.5ft de profundidad, para ello se utilizan tres reactores y 6 plantas piloto, estando este proceso bajo condiciones aerobias por un período de 10 semanas.

Se realizan tomas de muestra a la 5a. y 6a. semana y un muestreo al final del periodo, si la reducción de BPC's es menor al 20% y PAH menor al 50% se completa la FASE I, si la eliminación de contaminantes esta dentro del rango de 20% - 50% para BPC's, se realiza una biodegradación primaria a partir de la 5a semana con pesos moleculares bajos para BPC's (1-4 cloros) y HC (2-4 anillos) respectivamente.

---

<sup>16</sup> TEC.-BIO.-P

No obstante al aplicar el proceso en ambas fases se describe el siguiente procedimiento:

- Se realiza una biodegradación aerobia de BPC y PAH por microorganismos adicionando fósforo y nitrógeno.
- Sobre un reactor se deposita un volumen determinado de material, realizando una mezcla de BPC y PAH adicionando aire, nitrógeno, fósforo y controlando el pH.
- Se toman muestras de material lacustre y posteriormente se transporta a tanques con carbón, suministrando aire donde finalmente se degradan los BPC y PAH.
- Se prepara material lacustre ( $44 \text{ ft}^3$ ) adicionando nutrientes por lapso de una semana.
- Las relaciones de volumen son 10:20 arena y 1 de sedimento, tomando 10 semanas de tiempo de residencia, en donde finalmente se concluye el proceso.

#### **4. Eficiencia del proceso**

Para BPC's se tiene un rango de 20-50% de eliminación, dependiendo si solo se utiliza un reactor o bien si se complementa el proceso con la utilización de ambas fases.

Para PAH, se tiene un rango de 50-95% de eliminación dependiendo de las mismas condiciones para el caso de BPC's

En ambos casos, se obtienen resultados parciales a la 5a. y 6a semana de tratamiento, sin embargo para obtener resultados finales, se requiere un período de 10 semanas promedio.

#### **5. Campos de aplicación**

Suelos y sedimentos contaminados con BPC's y HC.

#### **6. Bioseguridad**

Aun cuando no contempla este concepto, esta tecnología contempla la estabilización de los BPC's remanentes después de su biorremediación, asegurando que el riesgo para el hombre y para el medio ambiente son mínimos.

#### **7. Costos del proceso**

No especifica un costo de manera numérica, solo en forma textual, indica que es bajo

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Instalación de accesorios que forman parte del reactor como son dosificadores de nutrientes, bombas de agua, motores eléctricos, mezcladores, difusores de aire, sistema de monitoreo para toma de muestras y tanques de depósito para carbón.

#### **9. Status de la tecnología**

Aun cuando esta tecnología ya fue probada, se esta perfeccionando para comprobar su funcionamiento y en la medida de lo posible mejorarla

**10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Aluminum Company of America, 100 Technology Drive, Alcoa Center, Pennsylvania, 15059, EE.UU.

**11. Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

Esta tecnología no indica un lugar específico, sin embargo, la fecha de aplicación es de 1994

## **LIMPIEZA DE DESECHOS POR BACTERIAS<sup>17</sup>**

### **1. Tipo de tecnología aplicada**

Biorremediación por bacterias en playas contaminadas por derrame de hidrocarburos y BPC

### **2. Técnicas utilizadas auxiliares**

Utilización de enzimas para el proceso de biorremediación

### **3. Descripción del proceso**

Se utiliza primeramente una gran variedad de bacterias y algas y con ayuda de enzimas capaces de digerir toxinas y compuestos tóxicos como solventes, vapores tóxicos y BPC presentes en agua y suelo.

A partir de varias aplicaciones se obtuvieron buenos resultados, como es 6 millones de galones de agua y 16,000 yardas cúbicas de suelo contaminado con 2,4-di (herbicida) en Dakota del Norte por medio de biorreactores, utilizando bacterias por un lapso de 90 días a concentración inicial de 14000 ppm, obteniendo concentración final de 10 ppm.

### **4. Eficiencia del proceso**

Para remover fertilizantes incluyendo se obtiene un 100% de eficiencia, tomando en cuenta concentración inicial de 14000 ppm y 10 ppm como concentración final

Para BPC y HC, se considera un 20% de eliminación potencial.

En ambos casos, se toma 90 días promedio a partir de la aplicación de los microorganismos en el sitio

### **5. Campos de aplicación**

Suelos contaminados con BPC, HC y fertilizantes.

### **6. Bioseguridad**

No contempla este concepto ni parcial ni total.

### **7. Costos del proceso**

Un promedio de USD \$ 40-70/tonelada

---

<sup>17</sup> TEC.-BIO.-Q

**8. Infraestructura requerida**

No menciona la infraestructura requerida para esta tecnología

**9. Status de la tecnología**

Tecnología aplicada, probada y utilizada en diferentes partes en los EE.UU.

**10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Aplicada y desarrollada para la Exxon Valdez Oil, Inc.

**11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

En las playas de Alaska y en Dakota del Norte, EE.UU., en 1990

## **DESARROLLO DE UN CULTIVO MICROBIOLÓGICO EN CONDICIONES ANAEROBIAS PARA LA BIODEGRADACIÓN DE PCB'S<sup>18</sup>**

### **1. Tipo de tecnología aplicada**

Declaración de suelos y sedimentos contaminados con BPC's por microorganismos en condiciones anaerobias.

### **2. Técnicas utilizadas auxiliares**

- Se determina la biodisponibilidad para declarar suelos contaminados con BPC's en condiciones anaerobias en un sistema granular

### **3. Descripción del proceso**

Una vez que se determinó la biodisponibilidad para la declaración del suelo; en un biorreactor y en condiciones anaerobias, se desarrolla un sistema granular, al cual se aplica un volumen de agua residual contaminada con BPC's.

Al sistema granular se incorpora una mezcla de ácido graso, glucosa y metanol, estando operando el reactor en forma continua, el tamaño de los granos en el sistema, oscilan de 0.5 - 5 mm, sobre ello, se depositan los microorganismos tales como especies metanogénicas y acetanogénicas, desarrolladas para la declaración de BPC's en función del tipo de sedimento contaminado; Posteriormente se realiza una mezcla homogénea de suelo (20 kg peso hum/ 20 l de agua de tanque) y aroclor 1254 a una concentración de 500 mg/kg a condiciones de suelo húmedo.

El tanque (biorreactor) es acondicionado anaerobicamente por un tiempo de 4-5 días y estando en esas condiciones, se agrega madera pulverizada (0.01%) como fuente de soporte para los nutrientes y propiciar el incremento de la declaración.

Posteriormente a los 5 días en condiciones anaerobias, la mezcla suelo-BPC's es cubierta con agua a una altura de 15 cm aproximadamente cubriendo la parte superior del biorreactor a temperatura constante.

Después de 8 semanas se presenta una alta declaración de los compuestos penta y hexa-cloro bifenilos, sin embargo di y tri clorobifenilos se incrementa ligeramente, no obstante 4, 5, 6 y 7 clorobifenilos son reducidos en 20%, 40%, 45%, y 20% respectivamente por un lapso de 16 semanas, concluyendo el proceso, por lo tanto al incrementar el tiempo de residencia, la reducción en porcentajes de cloro se incrementa.

### **4. Eficiencia del proceso**

En 4, 5, 6 y 7 clorobifenilos, se presenta una eliminación en 20%, 40%, 45% y 20% respectivamente, para 3 y 7 clorobifenilos en sistema granular 50% promedio. Los porcentajes de eliminación se obtienen en un lapso de 16 semanas promedio a partir del encapsulamiento del reactor.

---

<sup>18</sup> TEC.-BIO.-R

## **5. Campos de aplicación**

En suelos contaminados con BPC's (1242, 1254, 1260) y en sedimentos que contengan BPC's.

## **6. Bioseguridad**

No contempla este concepto, solo de manera textual indica que es seguro el proceso.

## **7. Costos del proceso**

No especifica un costo de manera numérica solamente de manera textual, indicando que es bajo.

## **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Instalación del biorreactor, así como los sistemas de monitoreo y análisis para corroborar la degradación de BPC, incluyendo sistemas de computo.

## **9. Status de la tecnología**

Tecnología desarrollada en el Instituto de Biotecnología, Michigan, siendo probado a gran escala.

## **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Michigan Biotechnology Institute 3900 Collins Road, Lansing,  
MI 48910-8398, EE.UU.

## **11. Lugar y Fecha donde haya sido utilizada anteriormente.**

Está tecnología se probó a gran escala en 1994, pero no indica el lugar de prueba.

## TRATAMIENTO DE BIODEGRADACIÓN *IN-SITU*<sup>19</sup>

### 1. Tipo de tecnología aplicada

Sistema de tratamiento de biodegradación en suelos, sedimentos y lodos

### 2. Técnicas utilizadas auxiliares

Perforaciones someras en subsuelo para determinar gradiente hidráulico en la zona de estudio, por medio de pozos de perforación.

### 3. Descripción del proceso

Consta de cuatro etapas: pre-tratamiento, inoculación biológica, sistema de nutrientes, sistema de oxigenación y sistema de control biológico/químico de aditivos.

El pre-tratamiento se inicia con el uso de agua para infiltración; necesaria para remover metales, esta agua puede ser tratada, potable o de riego, siempre y cuando cumpla con ciertas características, si el agua contiene hierro disuelto, ayudará a retener fosfatos, los cuales son necesarios para un crecimiento de nutrientes, así mismo el peróxido de hidrógeno se utilizará como fuente de oxígeno, incrementando así la biotratabilidad

Inoculación biológica, se realiza sobre el agua para infiltración incrementando la población de microorganismo de manera natural, una inoculación es realizada a partir de muestras tomadas en el sitio a tratar, estas muestras serán el soporte de la selección de cultivos comercialmente disponibles, con ello se obtienen microorganismo capaces de sobrevivir en ambientes hostiles y extraños, asimismo, la disponibilidad para metabolizar un gran rango de sustrato.

La adición de nutrientes como son nitrógeno y fósforo, ambos elementos son esenciales para la actividad biológica nativa del lugar, procurando condiciones optimas de los nutrientes para sitios específicos.

En la oxidación de los contaminantes, la energía es liberada o removida, siendo el oxígeno un electrodo terminal receptivo durante la biodegradación aerobia, las concentraciones de oxígeno bajo la superficie son mínimas y para evitar esta circunstancia otras fuentes de oxígeno (peróxido de hidrógeno, ozono) pueden añadirse por medio de agua infiltrada.

La adición de agua y aditivos químicos en el suelo son con el objeto de regular el pH y otros parámetros relacionados con la biodegradación, poniendo atención al valor del pH y la movilidad o migración de los contaminantes, debido a que esta migración puede incrementarse por un cambio en el pH, con ello se toman las precauciones para el empleo de aditivos químicos, siendo no persistentes en el ambiente, con base en esto se enmiendan aplicaciones con concentraciones que ajustan el incremento o decremento de demanda microbiana

### 4. Eficiencia del proceso

En sedimentos de río a una concentración de 20-40 ppm se elimina el 55% del total de BPC, este resultado se obtiene a partir de 10.5 semanas tomando en cuenta pruebas de laboratorio y tratabilidad

---

<sup>19</sup> TEC.-BIO-S

## **5. Campos de aplicación**

Sedimentos lacustres, suelos con arena, arcilla y lodos compuestos con arcilla

## **6. Bioseguridad**

- Se toma en cuenta desde la selección y concentración de aditivos químicos al momento de aplicarlos, estos deben de ser no tóxicos
- Se consideran los posibles efectos a la salud después del proceso mismo

## **7. Costos del proceso**

Con un volumen de 150 ft<sup>3</sup> se estima USD \$2.6 M, incluyendo laboratorio a escala completo y tratabilidad

## **8. Infraestructura requerida**

- Equipo de perforación para realizar pozos someros de monitoreo e inyección.
- Equipo de bombeo para la inyección de nutrientes o inyección de agua tratada.
- Instalaciones de laboratorio para determinar pH y concentración de nutrientes

## **9. Status de la tecnología**

Tecnología probada dentro del Programa de Evaluación e Innovación Tecnológica (SITE) de la EPA en 1994 y ha sido aplicada a escala de laboratorio en problemas reales.

## **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Tecnología aplicada por la General Electric

## **11. Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

General Electric Woods, Pittsfield, MA  
General Electric, Río Hudson, NY  
Crosby, TX  
Río Sheboygan, Sheboygan, IL de 1991-1994

# **BIORREMEDIACION DE SUELOS CONTAMINADOS CON BPCB'S<sup>20</sup>**

## **1. Tipo de tecnología aplicada**

Biorremediación de suelos contaminados con BPC'S en condiciones aerovías anaerobias.

## **2. Técnicas utilizadas auxiliares**

- Ingeniería genética aplicada para el desarrollo de bacterias.
- Selección de bacterias para dechlorar altas concentraciones de BPC's

## **3. Descripción del proceso**

Se realiza una selección y caracterización del sitio de manera previa, posteriormente se realizan pruebas de laboratorio las cuales servirán para la aplicación de los microorganismos.

Se inicia con un lavado del suelo aplicando surfactantes con una relación de 0.01 g/l de agua, esto es con el fin de preparar la superficie contaminada.

Se realiza una separación inicial de BPC por medio del surfactante aplicado este en tierra diatomasa y propiciando la degradación anaerobia, esto conlleva a dos tendencias para la eliminación de BPC'S tanto en condiciones anaerobias como aerobias, la primera adiciona polímeros, tierra diatomasa y nutrientes, propiciando una dechloración inicial, en la segunda se inoculan nutrientes, complementando una biodegradación in-situ.

Dependiendo de la reducción de polímeros se regresa el proceso de condición aerobia y si hay reducción de BPC'S se inicia la fase bajo condiciones anaerobias.

Se determina la remoción de BPC'S y si es baja, se inicia nuevamente el proceso hasta obtener una condición aerobia, si la eliminación es alta, se da por finalizado el proceso.

## **4. Eficiencia del proceso**

A concentraciones iniciales de 100 ppm, sin embargo no se tiene dato en cuanto a concentraciones finales ni tiempo de eliminación de BPC's, solo, indica de manera textual que la eficiencia es buena.

## **5. Campos de aplicación**

Suelos contaminados con BPC'S, principalmente hacia la industria

## **6. Bioseguridad**

No contempla este concepto

## **7. Costos del proceso**

No especifica un costo de manera numérica, solamente de manera textual indica que el costo es bajo.

---

<sup>20</sup> TEC.-BIO.-T

### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Aquella capaz de realizar pruebas de laboratorio, en muestras de suelo y con ello la caracterización del tipo de microorganismos adecuados para la destrucción de BPC's.

### **9. Status de la tecnología**

En el desarrollo de esta tecnología participaron:

University of Tennessee's Center for Environmental Biotechnology; Oak Ridge National Laboratory and Tennessee Valley Authority's Environmental Research Center, asimismo esta tecnología esta dentro del Programa de Evaluación e Innovación Tecnológica (SITE)

### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Tennessee Valley Authority CEB, Muscle Shoals, Alabama 35661, EE.UU.

### **11. Lugar y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

Suelos contaminados con BPC's a manera de prueba, la fecha de la etapa de prueba ante la EPA fue en abril de 1996

# PROCESO PARA REMOVER COMPUESTOS VOLÁTILES DEL SUELO Y LODOS CONTAMINADOS CON BPC Y MATERIALES PELIGROSOS<sup>21</sup>

## 1. Tipo de tecnología aplicada

Procedimiento para separar contaminantes químicos, volátiles, semi-volátiles y BPC en bajas concentraciones presentes en suelos o lodos por medio de temperaturas cercanas a la temperatura de pirólisis

## 2. Técnicas utilizadas auxiliares

No requiere de alguna técnica auxiliar para llevar a cabo este proceso

## 3. Descripción del proceso

El proceso opera con contaminantes aislados o en mezcla, bajo condiciones de presión de vacío, adecuada para contaminantes volátiles y semi-volátiles, a temperaturas abajo de la temperatura de incineración, o cercana a la temperatura de pirólisis, con el objeto de que continuamente se remueven, colecten y condensen los vapores desprendidos del proceso, con un tiempo adecuado para eliminar a los contaminantes; para ello, el proceso consta de los siguientes pasos:

- A) Captura de contaminantes incluyendo al sustrato (suelo, lodos) que los contiene.
- B) Introducción del sustrato dentro de un reactor térmico
- C) Realización de vacío dentro del reactor, y al mismo tiempo se purga el sustrato de cualquier gas existente por medio de la introducción de gas inerte.
- D) Agitación del sustrato dentro del reactor en presencia del gas inerte, incrementando la temperatura entre los 200 y 600 °C
- E) Se alcanza una presión de vacío de 50 mm de Hg y se liberan los BPC dejando al sustrato libre de contaminantes.

No obstante, los diferentes tipos de suelo comprenden texturas y estructuras complejas, lo que propicia a no ser un proceso continuo, para lo cual se tienen seis etapas, las cuales son:

La primera etapa esta dada por un secado del sustrato por medio de la evaporación de líquidos, considerando que los contaminantes están presentes en sólidos y en contacto con algún líquido (agua), bajo estas condiciones se inicia una evaporación de los líquidos, así los sólidos paulatinamente se secan, para ello, se requiera de diferentes variables, las cuales son: temperatura, tiempo de residencia y composición de los sólidos.

La segunda etapa conocida como fase de velocidad constante corresponde a un período de tiempo necesario para realizar una evaporación de líquidos, la fase de velocidad constantes es continua hasta alcanzar un punto tal que dicha velocidad comienza a decrecer, conociendo a este punto como "contenido de humedad crítica".

---

<sup>21</sup> TEC.-FIS.-U

La tercera etapa es llamada etapa de velocidad de decremento, esta etapa es identificada por un cambio continuo de velocidad por medio de un ciclo de secado, el cual relaciona el decremento de la superficie saturada y la no saturada, esta característica, inicia el punto de ciclo de secado en donde la humedad interna depende de este ciclo.

Generalmente el secado de la humedad depende de los factores que afectan a las variables de difusión de humedad, a partir de una superficie de evaporación y de humedad interna en los poros, tomando en cuenta el flujo de humedad debido a los fenómenos de capilaridad y gravedad, así también el gradiente de temperatura y presión de vapor; todas estas variables son las que influyen en la eficiencia y velocidad de secado de los sólidos.

La presencia de vacío durante el calentamiento y mezclado de los contaminantes corresponden a una velocidad de evaporación de contaminantes volátiles y semi-volátiles (BPC) en adición con un gas inerte, a partir del conjunto de estos factores, se inicia la transformación de fase líquida a fase gaseosa.

La etapa de evaporación se realiza en un reactor, el cual está diseñado para alcanzar como mínimo 25 mm de Hg de presión de vacío, al mismo tiempo que se realiza una mezcla de contaminantes con el sustrato, con ello existe un desprendimiento de vapores de compuestos volátiles y semi-volátiles (BPC), la presión de vacío depende del tiempo de residencia y es controlada por un microprocesador, el cual mide también a la temperatura del sistema y la velocidad de evaporación.

La etapa gaseosa, se refiere al vapor del agua, aire, gas inerte y vapores de contaminantes volátiles y semi-volátiles (BPC); el agua y los compuestos son condensados y enviados a un tratamiento posterior. No obstante la presencia de gas inerte es con el fin de realizar un desplazamiento de oxígeno dentro del reactor en el momento de realizar la purga del mismo, por tanto, la velocidad y suministro de gas inerte es controlado por medio de un microprocesador el cual depende de los valores de temperatura y la velocidad de evaporación del sistema.

En otro aspecto, el gas inerte es utilizado como medida de seguridad con el fin de eliminar el riesgo de explosión o incendio en el sistema, es así que el gas inerte que se utiliza es el nitrógeno ( $N_2$ ), sin embargo se puede utilizar bióxido de carbono ( $CO_2$ ) o Argón (Ar), la utilización de algún gas en particular depende de las consideraciones económicas.

Finalmente los sólidos se confinan a temperatura promedio de 300 °C y tiempo de residencia de 8 h., definiendo al tiempo de residencia como el tiempo que se toma en llenar al reactor, realizar vacío, mezclar y evaporar a los contaminantes, asimismo el tiempo que tarda el reactor en enfriarse. Este proceso es aplicable para componentes orgánicos (alcoholes, éteres, hidrocarburos aromáticos, compuestos volátiles, y BPC); por tanto las características propias de este método así como sus componentes son los siguientes:

El sustrato es introducido por medio de tuberías hacia el interior del reactor, pasando por la fase de secado por medio de la generación de vacío, con una capacidad máxima de 1.5 t. de sustrato contaminado, para esta operación se requiere de 1 h. aproximadamente.

Después de realizar el secado, la bomba de vacío es puesta en operación e inicia la purga del gas e introducir al sistema nitrógeno, posterior a ello, un agitador interno es puesto en marcha mientras que la presión de vacío y la velocidad de suministro del gas es controlada así como temperatura y velocidad de flujo dentro de todo el sistema, la presión máxima de vacío alcanzada es de 50 mm de Hg y la temperatura promedio de 300 °C, a un tiempo de residencia adecuado para evitar emisiones contaminantes a la atmósfera.

Los contaminantes al estar en contacto con el gas inerte, a alta temperatura y presión de vacío, se inicia la evaporación realizando la separación de sólidos, así se tienen partículas volátiles y compuestos orgánicos en estado gaseoso, las partículas se confinan en un filtro y los compuestos orgánicos en estado gaseoso son enviados a un condensador, este opera a una temperatura de 0 °C con el objeto de condensar hidrocarburos y agua, sin embargo no todo el volumen de vapor se condensa existiendo en un solo condensador una fase líquida y gaseosa, así tanto fase líquida como gaseosa pasan a un segundo condensador, en este condensador el vapor es llevado a una temperatura de 13 °C separando nuevamente líquido, gas y algunas partículas.

La fase líquida del segundo condensador es recirculada hacia el primer condensador, con el objeto de que al final de la segunda etapa de condensación solo se maneje vapor.

Finalmente el vapor resultante del segundo condensador pasa a una tercera etapa de condensación, obteniendo así una alta eficiencia, haciendo pasar el flujo de gas a través de un filtro de carbón activado, donde se capturan los contaminantes orgánicos.

#### **4. Eficiencia del proceso**

La concentración máxima de BPC que puede ser eliminada mediante este proceso, es de 250 ppm, obteniendo una eliminación del 95%, con un tiempo de remoción de 8 h. a una temperatura promedio de 300 °C y con una capacidad de procesamiento de 1.5 t.

#### **5. Campos de aplicación**

Sedimentos, lodos, suelos, arenas que estén contaminados con BPC's, HC, BTX's, solos o en mezcla.

#### **6. Bioseguridad**

Aun cuando el proceso no considera este concepto como tal, se puede decir que por llevarse a cabo este proceso en un sistema cerrado, aparentemente no desprende ninguna dioxina a la atmósfera,

#### **7. Costos del proceso**

No precisa ningún dato numérico, solo indica de manera textual que el costo es bajo.

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Equipo necesario para la instalación del sistema, el cual consta de: reactor, mezclador, microprocesador, bobas de vacío, sistema de refrigeración, tuberías y conexiones para la recirculación de fluidos y gases.

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología patentada en los EE.UU. y Europa, asimismo, se realizaron pruebas para corroborar su eficiencia a nivel de laboratorio a mediana escala.

**10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Chemical Waste Management, Inc.  
Oak, Brook, IL, EE.UU.

**11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

No especifica un lugar determinado de aplicación de esta tecnología, sin embargo, la fecha de desarrollo y presentación fue en Sep. 1995

## MÉTODO Y APARATO PARA TRATAR SEDIMENTOS CONTAMINADOS CON BIFENILOS POLICLORADOS<sup>22</sup>

### 1. Tipo de tecnología aplicada

Calentamiento de sedimentos contaminados con BPC en un rango de temperatura de 454-2371 °C y tiempo de residencia del sedimento de 2 segundos.

### 2. Técnicas utilizadas auxiliares

No requiere de alguna técnica auxiliar para llevar a cabo este proceso

### 3. Descripción del proceso

El procedimiento para eliminar contaminantes tales como los BPC, se basa en un sistema el cual esta integrado un equipo con las siguientes características:

- Mezclador
- Separador
- Separador ciclónico
- Colector seco
- Horno

Los sedimentos secos o húmedos con BPC se vierten primeramente en un mezclador, la naturaleza del sedimento no es crítica y el dispositivo está adaptado para operar con arena, lodo, materia orgánica, aguas residuales municipales y similares.

El mezclador es un mezclador-alimentador, el cual cuenta con un mecanismo de alimentación de rosca en forma horizontal dentro del mismo mezclador, conforme es alimentado el mezclador, el sedimento es enviado al separador de BPC, allí, el sedimento puede vaciarse en estado húmedo (20% de sólidos), con el objeto de realizar un secado rápido, esta operación se realiza contra corriente de aire caliente que sopla desde el fondo del separador, permitiendo un movimiento ascendente, así a través de este dispositivo el sedimento es secado por una corriente de aire caliente.

El aire dentro del separador se encuentra entre 425 - 1371 °C sin embargo, para obtener una máxima ventaja, se utiliza un rango de temperatura de 760 - 1090 °C.

Las partículas grandes se precipitan a una velocidad controlada mediante un dispositivo dilatorio, este último consta de una superficie tronco-conica angulada, con el fin de dirigir las partículas hacia una porción central adyacente.

Finalmente las partículas se precipitan a una cubierta con configuración tronco-conica dirigida hacia arriba para recibir partículas y dirigida hacia la periferia del separador.

La cubierta posee brazos, estos están asegurados en los extremos a un tubo que rodea a la flecha, así como una serie de uniones y conexiones utilizadas para ajustar el ángulo del brazo, controlando de esta manera la velocidad de las partículas. Eventualmente, las partículas caen afuera de los bordes de la cubierta y son recolectadas en el fondo del separador, cualquier partícula que presente una concentración excesiva de BPC es regresada al mezclador, así el mezclador mezcla a las partículas gruesas y seca el sedimento húmedo entrante.

---

<sup>22</sup> TEC.-FIS.-V

En el separador una vez que se tienen partículas secas y finas, son enviadas a un separador ciclónico por medio de un motor eléctrico, provocando un vacío y depositando tanto a los BPC como a las partículas dentro del separador ciclónico convencional, cuyo fin es separar partículas y gases, por lo que el gas sale del separador ciclónico por la parte superior, mientras que las partículas descienden hacia la parte inferior del separador.

El gas que sale del separador ciclónico es filtrado en un saco convencional eliminando cualquier partícula remanente, así el influente de BPC se alimenta al horno, mientras que las partículas que no excedan una concentración de BPC, se descargan a un filtro de carbón activado, realizándose la limpieza de partículas finas.

Por el gas que fluye en todo el sistema, se genera un vacío producido por el ventilador el cual es capaz de mover aproximadamente 13,500 ft<sup>3</sup>/min de aire caliente.

El horno está compuesto de un quemador de combustible múltiple, alcanzando temperaturas de 2700 °C como máximas, el horno tiene en ambos lados tuberías concéntricas las cuales están intercaladas conduciendo agua y aire, no obstante existen, tuberías que llevan en su interior a los BPC, sin embargo, todas las tuberías en su extremo cuentan con boquillas, dirigiendo el flujo hacia el centro de la cámara de combustión en forma radial, de esta manera, aire, combustible y BPC son mezclados a lo largo de la longitud de la flama del quemador, dando como resultado una combustión completa de BPC.

El agua que circula en el interior de las tuberías se calienta y es transportada en forma de vapor por tuberías hacia la entrada de turbinas, las cuales se utilizan para generar energía eléctrica.

Parte de los gases de combustión se utilizan para incrementar el proceso de secado de los sedimentos, el resto de los gases de combustión son tratados en lavadores de gases y precipitadores electrostáticos.

Con este proceso se garantiza que el 1% de los BPC permanecen después de finalizar el proceso, debido a que tanto en la entrada como en la salida de cada etapa, se monitorea las concentraciones de BPC, y si se presenta alguna concentración alta, esta concentración es enviada a la etapa inicial.

El tiempo de residencia oscila entre 0.5 - 2 segundos a temperatura de 982 °C promedio, no obstante las partículas dentro del separador tienen un tiempo de residencia de 0.5 segundos, al encontrarse las partículas en el separador se requiere un tiempo de residencia de 10 segundos a 454 °C, siendo capaz de procesar 4.45 kg/h.

#### **4. Eficiencia del proceso**

A cualquier concentración inicial que tenga de BPC's después de aplicar este proceso, se tiene una eliminación del 98% con un tiempo de residencia promedio total de 12 segundos y temperatura promedio de 800 °C con capacidad de procesamiento de 4.45 Kg sedimento por hora.

#### **5. Campos de aplicación**

Sedimentos contaminados con BPC tales como arena, lodo y fondo de lagos y corrientes de ríos o aguas residuales.

## **6. Bioseguridad**

Aún cuando el proceso no considera este concepto como tal, por llevarse a cabo este proceso como un sistema cerrado, aparentemente no desprende dioxinas a la atmósfera

## **7. Costos del proceso**

No precisa ningún dato numérico, solo de manera textual indica que le costo del proceso es bajo

## **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Equipo necesario para la instalación completa del sistema así como el equipo de laboratorio que permita realizar un análisis de la concentración de BPC al finalizar cada etapa del proceso

## **9. Status de la tecnología**

Tecnología patentada en los EE.UU. y en México, asimismo se realizó una prueba a nivel de laboratorio a gran escala para corroborar su eficiencia

## **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Esta tecnología fue desarrollada de manera conjunta por:  
William C. Meenam, 330 Douglas Avenue Illinois, U.S.A.  
George D. Sullivan, 1043 Old Lane, Illinois, U.S.A

## **11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

No especifica un lugar determinado, sin embargo la fecha de desarrollo y presentación de la tecnología fue en mayo de 1991.

## TRATAMIENTO DE AGUA, AIRE Y SUELO CON LAMPARA DE UV<sup>23</sup>

### 1. Tipo de tecnología aplicada

Tecnología desarrollada para eliminar BPC y VOC por medio de una alta exposición de luz ultravioleta.

### 2. Técnicas utilizadas auxiliares

Aplicación de surfactantes solo si los UV no penetran la matriz de la roca.

### 3. Descripción del proceso

Esta técnica fue desarrollada y perfeccionada para suelo contaminado con BPC a concentraciones de 800 mg/kg y DDT a concentración de 650 mg/kg respectivamente.

Utilizando un sistema de UV de la 3a generación, al inicio de la aplicación de esta tecnología, se determina si los UV pueden penetrar la matriz de la roca, de no ser así, se aplica un surfactante con el fin de extraer los contaminantes del interior hacia la superficie, utilizando surfactantes como sulfato de sodio en solución al 1%; la aplicación del surfactante es en spray cubriendo un volumen de 200g.

Posteriormente la distancia entre el suelo y la lampara es de 5 cm, la lampara esta equipada con un reflector parabólico de UV, con el objeto de proporcionar una distribución uniforme de luz ultravioleta sobre la superficie del suelo.

Dos tipos de pruebas fueron realizadas sobre el suelo, una con 15 cm de longitud de onda corta y la otra sobre 15 cm de longitud media de onda, en ambos casos se tubo el mismo poder de consumo de 60 watt por lampara, encontrándose que por medio de pulsos a presión media los UV fueron más eficientes para la destrucción de quimicos, siendo el tiempo de exposición de 30 minutos; con ello, se redujo la concentración de BPC y DDT a 85% promedio.

Se estima que las lamparas proporcionan suficiente emisión de UV dentro de la absorción de banda de 0.1 watt/cm<sup>2</sup>/nm, así la velocidad de destrucción de los tóxico es de 1 mg/L/seg.; la acción más efectiva de los UV son por medio de pulsaciones de UV a 254 nm, adicionando un proceso de oxidación, otra ventaja importante es el uso de pulsos de UV, con ello se tiene una disponibilidad para producir una intensidad de fotones, los cuales son miles de veces más grandes que la misma energía emitida por segundo.

El cambio de cinética a fotoquímico, es un cambio en el cual se presentan velocidades de degradación en un lugar específico; las altas emisiones de fotones tienen tres características definidas: PP, RMS y AP;

PP: Esta definido como la relación entre la energía de un pulso y el tiempo de duración de ese pulso

RMS: Es el periodo en el cual se ejerce una acción de un pulso sobre el PP a una velocidad repetida

AP: Es la energía combinada de todos los pulsos definidos en 1 segundo a una velocidad dada

---

<sup>23</sup> TEC.-FIS.-W

A partir de que se definen estas características, se cuenta con rangos definidos, los cuales se determinan experimentalmente definiendo una relación óptima para la destrucción de cada tóxico en particular y una concentración dada.

#### **4. Eficiencia del proceso**

A partir de una concentración inicial de 800 mg/kg de BPC después de ser sometida a una radiación de UV por un periodo de 30 minutos promedio, se tiene una concentración final de 100 mg/kg, esta tecnología puede tratar 1 m<sup>3</sup>/24 h.

#### **5. Campos de aplicación**

Esta tecnología se aplica en aire, agua subterráneas y suelo contaminado con BPC y VOC principalmente

#### **6. Bioseguridad**

Aun cuando la aplicación de la tecnología misma no genera subproductos o compuestos secundarios que puedan ser tóxicos, es necesario considerar el manejo adecuado de los UV, debido a la posibilidad de generar cáncer en piel y desprendimiento de retina al estar en contacto directo con los UV

La tecnología en si no considera esa posibilidad ni este concepto de manera general.

#### **7. Costos del proceso**

El costo de operación total (equipo, instalación, mantenimiento, amortización) se estima de USD \$ 118.650 m<sup>3</sup>

El costo por tratamiento es de USD \$ 2.24/ m<sup>3</sup>

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

La infraestructura requerida es aquella necesaria para la instalación y mantenimiento del equipo de UV

#### **9. Status de la tecnología**

Tecnología aplicada en problemas reales, sin embargo, se aplico a nivel de planta piloto

#### **10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Ultraviolet Energy Generators, Inc. (UVERG)  
285 Fifth Street, Oakland, CA EE.UU. 94607

#### **11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

No indica un lugar en específico donde haya sido utilizada con anterioridad, sin embargo, la fecha de aplicación es en 1990

## **DESTRUCCIÓN DE ASKARELES POR UN PROCESO DE GASIFICACIÓN<sup>24</sup>**

### **1. Tipo de tecnología aplicada**

Destrucción cualitativa de sustancias tóxicas orgánicas por medio de una combustión parcial producto de una gasificación de oxígeno y vapor denominado proceso Toxiplex

### **2. Técnicas utilizadas auxiliares**

No requiere de la utilización de alguna técnica auxiliar para su aplicación

### **3. Descripción del proceso**

El proceso Toxiplex es una adaptación del proceso de hulla simplex y de gasificación de biomasa, el cual suministra para la gasificación escoriada de mezclas compactas con sulfatos, hulla y desperdicios de materiales celulósicos.

Las mezclas son bien combinadas en brinquetas y se cargan a la entrada del horno, dentro de el, son secados, volatilizados y quemados asimismo, las briquetas de carbón reaccionan con el vapor y con una estequiometría deficiente de oxígeno a una temperatura de 300 °F y una presión de 1-30 atm. utilizando gas sintético o combustible medio.

En este proceso, las sustancias organo-tóxicas para ser destruidas, siendo introducidas directamente dentro de la zona donde se realiza la combustión parcial, por medio de la gasificación del oxígeno y el vapor pasando por una boquilla de alimentación ya sea en forma líquida, en solución o en forma de lodo.

La temperatura de la flama resultante, es observada y medida por medio de un puerto de entrada en la boquilla, estando controlada a 300 °F regulando el oxígeno a una proporción de vapor de tal manera que el balance de la combustión exotérmica parcial de carbón con la reacción endotérmica del agua gaseosa.

Los productos de la combustión parcial, son básicamente monóxido de carbono, metano, ácido clorhídrico y bióxido de carbono, esto incide encima de la incandescencia del lecho de carbón en donde la gasificación es completa.

El tiempo de residencia en la zona de combustión parcial es de 50-100 milisegundos, mientras que el tiempo de contacto con el carbón incandescente a 300-2500 °F es de uno o más segundos dependiendo del flujo.

El substrato incandescente podría dividirse por la diversificación en cuanto a la alimentación de carbón incluyendo petróleo calcinado, carbón, antracita, lignina o brinquetas de biomasa, al emplear petróleo, la operación es independiente del proceso así como la eficiencia de destrucción es de 99% en un solo paso con una completa ausencia de dioxinas cloradas.

Sin embargo, al utilizar residuos municipales como carbón, se recomienda que la combustión sea utilizada en forma gaseosa proporcionando la recirculación del gas a una temperatura de 3000 °F, lo que significa abajo de la zona interna o externa, por este medio se tendrán los fenoles, hidrocarburos y otros gases que por la combustión o pirólisis son convertidos a pequeñas moléculas de gas.

---

<sup>24</sup> TEC.-FIS.-X

Las características del proceso Toxiplex comprende lo siguiente:

- Produce efluentes líquidos, el desperdicio del agua de desecho, se recicla y se trata.
- La temperatura de la flama alta y el substrato en contacto con el carbón incandescente, proporciona un eficiente del 97% o mayor destrucción de bifenilos
- La reducción de una alta atmósfera dentro de la gasificación en presencia de hidrógeno, monóxido de carbono, metano y carbón incandescente, excluye la existencia de cloro libre y la formación de PCDF's y PCDD's

#### **4. Eficiencia del proceso**

A una concentración inicial de aroclor 1260 de 13.980 gr y 1550 °C se tiene una concentración final de 1.3 mg obteniendo una eficiencia de 99%

A una concentración inicial de 14.509 gr y 1620 °F se tiene una concentración final de 0.0 mg obteniendo una eficiencia de 100%

#### **5. Campos de aplicación**

En aceites de transformadores contaminados con BPC, asimismo se pueden tratar desechos sólidos municipales, lodos de agua residual y sulfuros bituminosos

#### **6. Bioseguridad**

Aún cuando no contempla este concepto, tomando en cuenta la alta eficiencia del proceso en cuando destrucción de BPC, no produce dioxinas, polvos o cenizas que dispongan de un confinamiento especial o una contaminación a la atmósfera, dado que es un sistema cerrado a excepción cuando se utiliza una turbina de gas.

#### **7. Costos del proceso**

Debido a que se tiene una capacidad para tratar 5000 galones/día, los costos son bajos tanto de inversión como de mantenimiento en comparación con el proceso de incineración tradicional. Sin embargo, no se menciona un costo de manera precisa.

#### **8. Infraestructura requerida para su aplicación**

Con base en los datos obtenidos para la construcción de una planta piloto, las dimensiones de esta son 10 ft de alto, y una sección transversal de 100 in<sup>2</sup> para una capacidad de 5 ton/día, considerando aparte los equipos de medición y control de temperatura, inyección de oxígeno y los sistemas de tratamiento y recirculación de agua.

#### **9. Status de la tecnología**

La supervisión de la aplicación de esta tecnología estuvo a cargo por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y fue probada a nivel de planta piloto en condiciones reales de contaminantes.

**10. Institución o compañía que desarrolla o aplica esta tecnología**

Esta tecnología fue desarrollada y aplicada por la Universidad de Columbia, EE.UU.

**11. Lugares y fecha donde haya sido utilizada anteriormente**

Aparentemente se aplicó en la Universidad de Columbia, pero se desconoce la fecha de prueba ante la EPA.

## **ANEXO**

**2**

**TABLA A2 - MATRIZ DE PONDERACION DE FACTORES**  
(Evaluador gs)

NO	FACTORES DE EVALUACION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TOTAL	%
1	Tecnología aplicada	.5	1	0	0	.5	.5	.5	0	1	1	1	5.0	10.10
2	Técnicas utilizadas auxiliares	.5	0	.5	0	1	.5	0	.5	0	1	1	5.0	10.10
3	Descripción del proceso	0	0	.5	.5	.5	0	0	0	0	1	1	3.5	7.07
4	Eficiencia del proceso	.5	0	.5	1	.5	.5	.5	0	1	1	1	5.5	11.11
5	Campos de aplicación	1	0	.5	0	.5	0	.5	0	.5	0	.5	3.5	7.07
6	Bioseguridad	.5	0	.5	.5	.5	.5	.5	0	.5	0	0	3.0	6.06
7	Costos del proceso	1	1	.5	.5	1	.5	.5	.5	1	1	1	7.5	15.15
8	Infraestructura requerida	.5	1	.5	.5	1	.5	.5	0	1	1	1	6.5	13.13
9	Status de la tecnología	.5	1	.5	.5	1	.5	.5	1	1	1	1	7.5	15.15
10	Institución que desarrollo la tecnología	0	0	0	0	0	.5	0	0	.5	0	.5	1.5	3.03
11	Lugar y fecha donde haya sido aplicada	0	0	0	0	0	.5	0	0	0	0	.5	1.0	2.02
	<b>Sumatoria</b>												<b>49.5</b>	<b>99.99</b>

gs

Escala de evalua 1 Si el factor del renglon tiene mayor importancia que el de la columna  
 .5 Si ambos factores tienen la misma importancia  
 0 Si el factor del renglon tiene menor importancia que el de la columna

**TABLA A3 - MATRIZ DE PONDERACION DE FACTORES**  
(Evaluador mg)

NO	FACTORES DE EVALUACION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TOTAL	%
1	Tecnología aplicada		0	0	0	.5	0	0	.5	.5	1	1	3.5	5.83
2	Técnicas utilizadas auxiliares	1		0	0	.5	.5	0	.5	.5	1	1	5.0	8.33
3	Descripción del proceso	1	1		.5	1	1	.5	1	1	1	1	9.0	15.00
4	Eficiencia del proceso	1	1	.5		1	1	.5	1	1	1	1	9.0	15.00
5	Campos de aplicación	1	.5	0	0		.5	0	.5	.5	1	1	5.0	8.33
6	Bioseguridad	1	.5	0	0	1		0	0	0	1	1	4.5	7.50
7	Costos del proceso	1	1	.5	.5	1	1		1	1	1	1	9.0	15.0
8	Infraestructura requerida	1	.5	.5	0	.5	1	0		.5	1	1	6.0	10.0
9	Status de la tecnología	1	.5	.5	.5	.5	0	.5	0	.5	1	1	6.0	10.0
10	Institución que desarrollo la tecnología	.5	0	0	0	0	.5	0	0	0	0	1	2.0	3.3
11	Lugar y fecha donde haya sido aplicada	.5	0	0	0	0	.5	0	0	0	0	0	1.0	1.66
<b>Sumatoria</b>													<b>60.00</b>	<b>99.95</b>

mg

Escala de evalua 1 Si el factor del renglon tiene mayor importancia que el de la columna  
.5 Si ambos factores tienen la misma importancia  
0 Si el factor del renglon tiene menor importancia que el de la columna

**TABLA A4 - MATRIZ DE PONDERACION DE FACTORES**  
(Evaluador fr)

NO	FACTORES DE EVALUACION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TOTAL	%
1	Tecnología aplicada		.5	.5	0	.5	0	.5	.5	.5	1	1	5.0	9.09
2	Técnicas utilizadas auxiliares	.5		.5	0	.5	0	.5	.5	0	.5	1	3.5	6.36
3	Descripción del proceso	.5	.5		.5	0	.5	.5	.5	.5	1	1	5.5	10.00
4	Eficiencia del proceso	1	1	.5		.5	.5	.5	.5	.5	1	1	7.0	12.73
5	Campos de aplicación	.5	.5	1	.5		.5	.5	.5	.5	0	0	5.0	9.09
6	Bioseguridad	1	1	.5	.5	.5		.5	.5	.5	.5	.5	6.0	10.91
7	Costos del proceso	.5	.5	.5	0	1	.5		1	.5	.5	.5	5.5	10.00
8	Infraestructura requerida	.5	.5	.5	.5	.5	.5	0		.5	.5	.5	4.5	8.18
9	Status de la tecnología	.5	1	0	0	.5	.5	1	.5		.5	0	4.5	8.13
10	Institución que desarrollo la tecnología	0	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	4.5	8.18
11	Lugar y fecha donde haya sido aplicada	0	0	0	0	1	.5	.5	.5	1	.5		4.0	7.27
<b>Sumatoria</b>													<b>55.0</b>	<b>99.99</b>

fr Escala de evalua 1 Si el factor del renglon tiene mayor importancia que el de la columna  
 .5 Si ambos factores tienen la misma importancia  
 0 Si el factor del renglon tiene menor importancia que el de la columna

**TABLA B2 - MATRIZ DE ATRIBUTOS DE TECNOLOGIAS**  
(Evaluador gs)

VALOR Ponderado	FACTORES DE EVALUACION	CALIFICACION DE TECNOLOGIAS POR ATRIBUTOS																									
		tec. A	tec. B	tec. C	tec. D	tec. E	tec. F	tec. G	tec. H	tec. I	tec. J	tec. K	tec. L	tec. M	tec. N	tec. O	tec. P	tec. Q	tec. R	tec. S	tec. T	tec. U	tec. V	tec. W	tec. X		
5.0	Tecnología aplicada	10	10	10	7	10	10	7	10	10	10	10	7	10	10	7	10	7	10	10	10	10	7	7	7	10	
5.0	Técnicas utilizadas auxiliares	NA	NA	5	7	7	NA	NA	NA	NA	NA	5	2	5	NA	7	7	2	5	5	5	NA	NA	7	NA		
3.5	Descripción del proceso	5	7	10	5	7	7	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	2	2	7	2	7	2	10	7		
5.5	Eficiencia del proceso	10	10	7	7	5	7	7	5	10	10	2	7	2	5	2	7	2	2	5	5	2	5	7	10		
3.5	Campos de aplicación	7	7	10	10	7	7	10	5	10	10	5	7	2	7	5	5	5	7	10	5	7	7	7	10		
3.0	Bioseguridad	2	2	2	2	7	7	2	10	2	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	2	2	2	2		
7.5	Costos del proceso	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
6.5	Infraestructura requerida	5	7	10	2	7	5	7	5	5	5	5	7	5	7	7	5	2	5	7	5	2	5	7	2		
7.5	Status de la tecnología	5	7	10	7	7	7	7	7	5	5	2	5	5	5	2	5	2	5	2	7	5	7	5	2		
1.5	Institución que desarrolló la tecnología	5	10	5	10	7	5	10	10	7	10	10	10	10	10	10	10	7	10	5	10	7	10	5	10		
1.0	Lugar y fecha donde haya sido aplicada	2	7	10	7	5	2	5	10	2	5	2	10	7	5	5	5	10	5	10	5	10	5	7	2		

Escala de evaluación de tecnologías (columnas)

- con factores de erruac
- 10 Si se considera que la tecnología es BUENA en base a la información obtenida
  - 7 Si se considera que la tecnología es REGULAR en base a la información obtenida
  - 5 Si se considera que la tecnología es BASICA en base a la información obtenida
  - 2 Si se considera que la tecnología es INSUFICIENTE en base a la información obtenida
  - NA No Aplica

**TABLA B3 - MATRIZ DE ATRIBUTOS DE TECNOLOGIAS**  
(Evaluador mg)

VALOR PONDERADO	FACTORES DE EVALUACION	CALIFICACION DE TECNOLOGIAS POR ATRIBUTOS																													
		tec. A	tec. B	tec. C	tec. D	tec. E	tec. F	tec. G	tec. H	tec. I	tec. J	tec. K	tec. L	tec. M	tec. N	tec. O	tec. P	tec. Q	tec. R	tec. S	tec. T	tec. U	tec. V	tec. W	tec. X	tec. Y	tec. Z				
3.5	Tecnología aplicada	10	10	10	7	10	10	7	10	10	10	10	7	10	10	7	10	10	7	10	10	10	7	10	10	7	10	10			
5.0	Técnicas utilizadas auxiliares	NA	NA	5	7	7	NA	NA	NA	NA	NA	5	2	5	NA	7	7	2	5	5	5	5	NA	NA	7	NA	7	NA			
9.0	Descripción del proceso	5	7	10	5	7	7	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	2	2	7	2	7	2	7	2	10	10	7			
9.0	Eficiencia del proceso	10	10	7	7	5	7	7	5	10	10	2	7	2	5	2	7	2	5	5	5	2	5	5	2	5	7	10	10		
5.0	Cambios de aplicación	7	7	10	10	10	7	10	5	10	10	5	7	2	7	5	5	5	5	7	10	5	7	10	5	7	7	10	7		
4.5	Bioseguridad	2	2	2	2	7	7	2	10	2	5	2	2	2	2	2	2	5	2	2	10	2	2	2	2	2	2	2	5		
8.0	Costos del proceso	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	2	7	5	2	2	2	17	2	10	2	2	2	2	2	2	10	2		
6.0	Infraestructura requerida	5	7	10	2	7	5	7	5	5	5	5	7	5	7	7	5	2	5	7	5	5	7	5	7	5	7	2	5		
6.0	Estado de la tecnología	5	7	7	10	7	7	7	7	5	5	2	5	5	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	7	5	7	2	5	
2.0	Institución que desarrolló la tecnología	5	10	5	10	7	5	10	10	7	10	10	10	10	5	10	10	10	7	10	5	10	10	7	10	5	10	7	10	7	
1.0	Lugar y fecha donde haya sido aplicada	2	7	10	7	5	2	5	10	2	5	2	10	7	5	5	5	10	5	10	5	10	5	5	10	5	10	5	7	2	2

Escala de evaluación de tecnologías (colímanas) con factores de evaluac

10 Si se considera que la tecnología es BUENA en base a la información obtenida  
7 Si se considera que la tecnología es REGULAR en base a la información obtenida  
5 Si se considera que la tecnología es BASICA en base a la información obtenida  
2 Si se considera que la tecnología es INSUFICIENTE en base a la información obtenida  
NA No Aplica mg

**TABLA B4 - MATRIZ DE ATRIBUTOS DE TECNOLOGIAS**  
(Evaluador fr)

VALOR PONDERRADO	FACTORES DE EVALUACION	CALIFICACION DE TECNOLOGIAS POR ATRIBUTOS																									
		tec. A	tec. B	tec. C	tec. D	tec. E	tec. F	tec. G	tec. H	tec. I	tec. J	tec. K	tec. L	tec. M	tec. N	tec. O	tec. P	tec. Q	tec. R	tec. S	tec. T	tec. U	tec. V	tec. W	tec. X		
5.0	Tecnología aplicada	10	10	10	7	10	10	7	10	10	10	10	7	10	10	7	10	10	7	10	10	10	7	10	10	7	10
3.5	Técnicas utilizadas auxiliares	NA	NA	5	7	7	NA	NA	NA	NA	NA	5	2	5	NA	7	7	2	5	5	5	5	NA	NA	7	NA	
5.5	Descripción del proceso	5	7	10	5	7	7	10	5	5	5	5	5	5	10	5	5	2	2	2	7	2	10	10	7	7	
7.0	Eficiencia del proceso	10	10	7	7	5	7	7	5	10	10	2	7	2	5	2	7	2	5	5	2	5	2	5	7	10	
5.0	Campos de aplicación	7	7	10	10	10	7	10	5	10	10	5	7	2	7	5	5	5	2	2	10	5	7	10	5	7	
6.0	Bioseguridad	2	2	2	2	7	2	7	2	10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	10	2	2	2	2	5	
5.5	Costos del proceso	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	10	2	2	2	2	5	
4.5	Infraestructura requerida	5	7	10	2	7	5	7	5	5	5	7	5	7	5	7	5	2	5	7	5	2	5	7	2	5	
4.5	Status de la tecnología	5	7	7	10	7	7	7	7	5	5	2	5	5	5	2	5	2	5	2	7	5	7	5	7	2	5
4.5	Institución que desarrolló la tecnología	5	10	5	10	7	5	10	10	7	10	10	10	5	10	10	10	10	7	10	5	10	10	7	10	7	
4.0	Lugar y fecha donde haya sido aplicada	2	7	10	7	5	2	5	10	2	5	2	10	7	5	5	5	10	5	10	5	10	5	10	5	2	

Escala de evaluación de tecnologías (columnas)

- 10 Si se considera que la tecnología es BUENA en base a la información obtenida con factores de evaluación
- 7 Si se considera que la tecnología es REGULAR en base a la información obtenida
- 5 Si se considera que la tecnología es BASICA en base a la información obtenida
- 2 Si se considera que la tecnología es INSUFICIENTE en base a la información obtenida
- NA No Aplica

**TABLA C2 - MATRIZ DE PONDERACION Y CALIFICACION DE TECNOLOGIAS**

(Evaluador g)

VALOR PONDERADO	VALOR PONDERADO %	CALIFICACION DE TECNOLOGIAS																										
		tec. A	tec. B	tec. C	tec. D	tec. E	tec. F	tec. G	tec. H	tec. I	tec. J	tec. K	tec. L	tec. M	tec. N	tec. O	tec. P	tec. Q	tec. R	tec. S	tec. T	tec. U	tec. V	tec. W	tec. X			
5.0	10.10	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0		
5.0	10.10			25.0	35.0	35.0						25.0	10.0	25.0														
3.5	7.07	17.5	24.5	35.0	17.5	24.5	35.0	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	35.0	17.5	17.5	7.0	7.0	24.5	7.0	24.5	7.0	35.0	35.0	24.5		
5.5	11.11	55.0	55.0	38.5	36.5	27.5	36.5	38.5	27.5	55.0	55.0	11.0	38.5	11.0	27.5	11.0	38.5	11.0	27.5	27.5	11.0	27.5	27.5	11.0	27.5	36.5	55.0	
3.5	7.07	24.5	24.5	35.0	35.0	35.0	24.5	35.0	17.5	35.0	35.0	17.5	24.5	7.0	24.5	17.5	17.5	17.5	24.5	35.0	17.5	24.5	24.5	24.5	24.5	35.0	24.5	
3.0	6.06	6.0	6.0	6.0	21.0	21.0	6.0	30.0	6.0	15.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	15.0	
7.5	15.15	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	37.5	15.0	52.5	37.5	15.0	15.0	15.0	15.0	52.5	15.0	75.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	
6.5	13.13	32.5	45.5	65.0	13.0	45.5	32.5	45.5	32.5	32.5	32.5	32.5	45.5	32.5	45.5	32.5	45.5	32.5	13.0	32.5	45.5	32.5	32.5	45.5	45.5	13.0	32.5	
7.5	15.15	37.5	52.5	52.5	75.0	52.5	52.5	52.5	52.5	37.5	37.5	15.0	37.5	37.5	37.5	37.5	15.0	37.5	15.0	52.5	37.5	52.5	37.5	52.5	37.5	52.5	15.0	37.5
1.5	3.03	7.5	15.0	7.5	15.0	10.5	7.5	15.0	15.0	10.5	15.0	15.0	15.0	7.5	15.0	15.0	15.0	10.5	15.0	10.5	15.0	7.5	15.0	10.5	15.0	10.5		
1.0	2.02	2.0	7.0	10.0	7.0	5.0	2.0	5.0	10.0	2.0	5.0	2.0	10.0	7.0	5.0	5.0	5.0	5.0	10.0	5.0	10.0	5.0	5.0	7.0	2.0	2.0		
<b>TOTALES</b>	<b>99.99</b>	<b>247.</b>	<b>295.0</b>	<b>339.</b>	<b>292.</b>	<b>321.</b>	<b>268.</b>	<b>282.</b>	<b>267.5</b>	<b>261.0</b>	<b>300.0</b>	<b>206.</b>	<b>292.0</b>	<b>238.</b>	<b>261.0</b>	<b>217.</b>	<b>278.</b>	<b>187.</b>	<b>260.</b>	<b>367.</b>	<b>236.5</b>	<b>228.5</b>	<b>274.</b>	<b>310.5</b>	<b>266.5</b>			
<b>PROMEDIO DE CALIFICACIONES</b>		<b>24.7</b>	<b>29.5</b>	<b>30.8</b>	<b>26.5</b>	<b>29.2</b>	<b>26.8</b>	<b>28.2</b>	<b>26.7</b>	<b>26.1</b>	<b>30.0</b>	<b>20.6</b>	<b>26.5</b>	<b>23.8</b>	<b>26.1</b>	<b>19.7</b>	<b>25.3</b>	<b>17.0</b>	<b>23.6</b>	<b>33.4</b>	<b>23.9</b>	<b>22.8</b>	<b>27.4</b>	<b>28.2</b>	<b>26.6</b>			

Se efectua el producto del valor ponderado por la escala de evaluación para cada tecnología y posteriormente se realiza una suma, la suma que resulte mayor indica que es la tecnología más apropiada.

Criterio de evaluación:

**TABLA C3 - MATRIZ DE PONDERACION Y CALIFICACION DE TECNOLOGIAS**

(P/valorador mg)

VALOR PONDERADO	VALOR PONDERADO		CALIFICACION DE TECNOLOGIAS																									
	%		tec. A	tec. B	tec. C	tec. D	tec. E	tec. F	tec. G	tec. H	tec. I	tec. J	tec. K	tec. L	tec. M	tec. N	tec. O	tec. P	tec. Q	tec. R	tec. S	tec. T	tec. U	tec. V	tec. W	tec. X		
3.5	5.63		35.0	35.0	35.0	24.5	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	24.5	35.0	24.5	35.0	24.5	35.0	24.5	35.0	24.5	35.0	35.0	24.5	35.0	24.5	35.0	35.0
5.0	8.33				25.0	35.0	35.0						25.0	10.0	25.0													
9.0	15.00		45.0	63.0	90.0	45.0	63.0	90.0	45.0	63.0	90.0	45.0	45.0	45.0	90.0	45.0	45.0	45.0	18.0	18.0	63.0	18.0	45.0	45.0	18.0	45.0	63.0	63.0
9.0	15.00		90.0	90.0	63.0	63.0	45.0	63.0	63.0	45.0	90.0	90.0	18.0	63.0	18.0	45.0	18.0	63.0	18.0	45.0	18.0	45.0	18.0	45.0	18.0	45.0	63.0	90.0
5.0	8.33		35.0	35.0	50.0	50.0	50.0	50.0	35.0	50.0	25.0	50.0	25.0	35.0	10.0	35.0	25.0	25.0	25.0	25.0	35.0	50.0	25.0	35.0	50.0	35.0	50.0	35.0
4.5	7.50		9.0	9.0	9.0	9.0	31.5	31.5	9.0	45.0	9.0	22.5	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	22.5	9.0	9.0	45.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	22.5
9.0	15.00		18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	45.0	18.0	63.0	45.0	18.0	18.0	18.0	63.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
6.0	10.00		30.0	42.0	60.0	12.0	42.0	30.0	42.0	30.0	30.0	30.0	30.0	42.0	30.0	42.0	42.0	30.0	12.0	30.0	42.0	30.0	42.0	30.0	42.0	30.0	42.0	30.0
6.0	10.00		30.0	42.0	42.0	60.0	42.0	42.0	42.0	42.0	30.0	30.0	30.0	12.0	30.0	30.0	30.0	30.0	12.0	30.0	42.0	30.0	42.0	30.0	42.0	30.0	42.0	30.0
2.0	3.3		10.0	20.0	10.0	20.0	14.0	10.0	20.0	20.0	14.0	20.0	20.0	20.0	10.0	20.0	20.0	20.0	10.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	14.0
1.0	1.66		2.0	7.0	10.0	7.0	5.0	2.0	5.0	10.0	2.0	5.0	2.0	10.0	7.0	5.0	5.0	5.0	5.0	7.0	5.0	10.0	5.0	5.0	5.0	7.0	2.0	2.0
<b>TOTALES</b>	<b>99.95</b>		<b>304.</b>	<b>361.0</b>	<b>412.</b>	<b>343.</b>	<b>380.</b>	<b>329.</b>	<b>363.</b>	<b>315.0</b>	<b>323.0</b>	<b>372.5</b>	<b>239.</b>	<b>351.5</b>	<b>264.</b>	<b>329.0</b>	<b>263.</b>	<b>328.</b>	<b>212.</b>	<b>282.</b>	<b>445.</b>	<b>245.0</b>	<b>300.5</b>	<b>350.</b>	<b>407.5</b>	<b>369.5</b>		
<b>PROMEDIO DE CALIFICACIONES</b>			<b>30.4</b>	<b>36.1</b>	<b>37.4</b>	<b>31.2</b>	<b>34.5</b>	<b>32.9</b>	<b>35.3</b>	<b>31.5</b>	<b>32.3</b>	<b>37.2</b>	<b>21.7</b>	<b>31.9</b>	<b>24.0</b>	<b>32.9</b>	<b>23.9</b>	<b>29.6</b>	<b>19.3</b>	<b>25.6</b>	<b>40.4</b>	<b>22.2</b>	<b>30.0</b>	<b>35.0</b>	<b>37.0</b>	<b>36.9</b>		

Criterio de evaluación:  
Se efectúa el promedio del valor ponderado por la escala de evaluación para cada tecnología y posteriormente se realiza una suma, la suma que resulte mayor indica que es la tecnología más apropiada.

mg

**TABLA C4 - MATRIZ DE PONDERACION Y CALIFICACION DE TECNOLOGIAS**

(Evaluador fr)

VALOR PONDERADO	VALOR PONDERADO		CALIFICACION DE TECNOLOGIAS																									
	%		tec. A	tec. B	tec. C	tec. D	tec. E	tec. F	tec. G	tec. H	tec. I	tec. J	tec. K	tec. L	tec. M	tec. N	tec. O	tec. P	tec. Q	tec. R	tec. S	tec. T	tec. U	tec. V	tec. W	tec. X		
6.0	9.09		50.0	50.0	50.0	35.0	50.0	50.0	35.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	35.0	50.0	50.0	35.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	35.0	50.0	50.0	
3.5	6.36				17.5	24.5	24.5						17.5	7.0	17.5			24.5	24.5	7.0	17.5	17.5					24.5	
5.5	10.0		27.5	38.5	55.0	27.5	38.5	38.5	55.0	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	44.0	55.0	27.5	27.5	11.0	11.0	38.5	11.0	38.5	11.0	55.0	55.0	38.5	
7.0	12.73		70.0	70.0	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	35.0	70.0	70.0	14.0	49.0	14.0	35.0	14.0	49.0	14.0	35.0	35.0	14.0	35.0	14.0	35.0	49.0	70.0	
5.0	9.09		35.0	35.0	50.0	50.0	50.0	35.0	50.0	25.0	50.0	50.0	25.0	35.0	10.0	35.0	25.0	25.0	25.0	35.0	35.0	25.0	35.0	25.0	35.0	35.0	35.0	
6.0	10.91		12.0	12.0	12.0	12.0	42.0	42.0	12.0	60.0	12.0	30.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	30.0	12.0	12.0	60.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	30.0	
5.5	10.00		11.0	22.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	27.5	11.0	38.5	27.5	11.0	11.0	11.0	38.5	11.0	38.5	11.0	55.0	11.0	11.0	11.0	55.0	
4.5	8.18		22.5	31.5	45.0	9.0	31.5	22.5	31.5	22.5	22.5	22.5	22.5	31.5	22.5	31.5	31.5	22.5	9.0	22.5	9.0	22.5	22.5	31.5	22.5	31.5	9.0	
4.5	8.18		22.5	31.5	31.5	45.0	31.5	31.5	31.5	31.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	9.0	22.5	9.0	31.5	22.5	31.5	22.5	31.5	9.0	22.5	
4.5	8.18		22.5	45.0	22.5	45.0	31.5	22.5	45.0	45.0	31.5	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	31.5	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	31.5	
4.0	7.27		8.0	28.0	40.0	28.0	20.0	8.0	20.0	40.0	8.0	20.0	8.0	20.0	8.0	20.0	20.0	20.0	20.0	40.0	20.0	40.0	20.0	20.0	20.0	28.0	8.0	
<b>TOTALES</b>	<b>99.99</b>		281.	363.5	383.	336.	365.	310.	340.	347.5	305.0	365.0	241.	343.0	270.	317.0	254.	332.	232.	290.	422.	259.5	279.5	333.	365.0	319.0		
<b>PROMEDIO DE CALIFICACIONES</b>			28.1	36.3	34.8	30.5	33.2	31.0	34.0	34.7	30.5	36.5	21.9	31.1	24.5	31.7	23.1	30.1	21.0	26.3	28.4	23.5	27.9	33.3	32.3	31.9		

Criterio de evaluación:

Se efectue el producto del valor ponderado por la escala de evaluación para cada tecnología y posteriormente se realiza una suma, la suma que resulte mayor indica que es la tecnología más apropiada.

fr