

REMEDIACION DE SITIO UTILIZANDO NIVELES DE ACCION EN BASE A RIESGO A LA SALUD HUMANA

**Conrado Leslie
Kleinfelder, Inc.**

ESJANTERIA CONGRATES
ECOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

ABSTRACT

Varios países de América Latina utilizan niveles de remediación no específicos al sitio que fueron históricamente desarrollados en forma general por la EPA de EE.UU. Sin embargo, hoy día a nivel internacional se están utilizando exitosamente niveles de remediación basados en análisis de riesgo a la salud humana y ecología. Estos niveles de remediación están basados en evaluaciones de riesgo para un sitio específico y generalmente son menos restrictivos que aquellos generales y inicialmente sugeridos por algunas autoridades. Niveles de remediación específicos al sitio no solamente protegen a la salud humana y ecología; pero también, pueden representar un ahorro significativo para un cliente.

Kleinfelder fue contratado por una empresa paraestatal para remediar un sitio de aproximadamente una hectárea impactado con hidrocarburos. Las concentraciones de TPH (hidrocarburos de petróleo totales) en el suelo variaron entre 500 y 64,000 mg/kg. Kleinfelder utilizó un estudio de riesgo a la salud y una bioremediación enfocada a las zonas más calientes (que representaban riesgo a la salud). El uso de niveles de remediación en base a riesgo a la salud representó un ahorro al cliente de aproximadamente \$2.5 millones de dólares que posteriormente fueron invertidos en otras remediaciones, capacitación, y programas de prevención.

INTRODUCCIÓN

Kleinfelder fue contratado por una empresa paraestatal para remediar un sitio de aproximadamente una hectárea de terreno donde el suelo y el manto freático habían sido impactados con gasolina y diesel a través de derrames y malas prácticas ambientales. Las concentraciones de TPH's en el suelo variaron entre 500 y 64,000 mg/kg. Algunos pozos de monitoreo tuvieron hasta 1 metro de producto libre.

Como resultado de la privatización, las autoridades requirieron al cliente la remediación del sitio. En una decisión conjunta con una agencia ambiental local, el cliente seleccionó un nivel de remediación preliminar de 1,000 mg/kg de TPH's en el suelo y 100 mg/l en el manto freático. De acuerdo con el cliente, los niveles de limpieza fueron basados en los establecidos en USA. El proyecto fue una de las remediaciones de gran escala de éste tipo en México.

Basado en un nivel de limpieza de 1,000 mg/kg y 100 mg/l, Kleinfelder estimó que aproximadamente un 75% del sitio podría requerir remediación. Kleinfelder inicialmente seleccionó un sistema de remediación que incluyó extracción de vapores, inyección de aire al manto freático (air sparging) y bioremediación ex-situ e in-situ. De acuerdo con el alto contenido de arcillas en los suelos, Kleinfelder también propuso fracturación neumática de manera que se incrementará la permeabilidad y mejorará la eficiencia del sistema de remediación.

Con el fin de cubrir el área afectada y alcanzar el nivel de limpieza deseado, el diseño conceptual del sistema de remediación constó de siete centros de equipos y aproximadamente 220 pozos de remediación. Basados en los diseños conceptuales, Kleinfelder inicialmente estimó que el proyecto podría requerir que el cliente invirtiera aproximadamente cuatro millones de dólares. El costo relativamente alto de la remediación del sitio limitó la habilidad del cliente para invertir en la limpieza de los otros sitios que similarmente requerían remediación.

Kleinfelder subsecuentemente propuso y recibió autorización para realizar un estudio de riesgo a la salud. Kleinfelder en base al estudio de riesgo a la salud, propuso las siguientes acciones:

- 1) identificar las sustancias químicas concernientes a la salud que requieren remediación
- 2) evaluar su toxicidad química
- 3) calcular niveles preliminares de remediación (PRGs) para los químicos concernientes a la salud basados en tiempos de exposición y toxicidad estimada.
- 4) realizar la remediación en base a los PRGs desarrollados en el estudio de riesgo a la salud

El manto freático del sitio era agua salobre y no potable. Por lo tanto exposición por ingestión del agua subterránea no requería remediación de ésta, desde la perspectiva del riesgo a la salud humana. Así mismo, el suelo no contenía compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles con concentraciones arriba de las PRG'S de la USEPA. De acuerdo a las condiciones del lugar específicas y en base a la evaluación de riesgo a la salud, Kleinfelder recomendó un nivel de remediación preliminar de 16,000 mg/kg de TPH's en el suelo y la recuperación del producto libre en el manto freático para mitigar la migración potencial fuera del sitio; comparado a 1,000 mg/kg en suelo/100 mg/l en manto freático inicialmente propuesto por el cliente.

Como resultado del nuevo PRG en base a riesgo específico al sitio, el área que necesitaba remediación fue reducida en gran parte. Kleinfelder rediseñó e instaló un sistema más pequeño que sólo requería de 2 centros de equipo y aproximadamente de 90 pozos de remediación. Esto representó un ahorro al cliente de aproximadamente \$2.5 millones de dólares. El cliente presentó esta metodología al gobierno y la adaptó para la remediación de sus demás propiedades.

DESARROLLO

Principios de la Evaluación de Riesgo a la Salud

El enfoque de la evaluación de riesgo a la salud, es el evaluar los niveles de sustancias químicas tanto en el suelo como en los mantos freáticos que pudieran llegar afectar la salud de los residentes cercanos y de los trabajadores relacionados con las operaciones industriales de este sitio. La evaluación de riesgo hizo uso de los datos de muestreo de suelo y agua disponibles para: 1) Identificar las sustancias químicas de importancia potencial para la salud que puedan requerir de acciones de remediación, 2) Evaluar la toxicidad química, y 3) Calcular los niveles preliminares de remediación (PRG) de las sustancias químicas de importancia, basados en la exposición y la toxicidad química estimada. Los resultados de la evaluación de riesgo a la salud proveen información para las decisiones en remediación, a fin de proteger la salud humana.

El sitio se encuentra ocupado por una empresa paraestatal (confidencial) y es utilizado como un taller y almacén de combustibles.. Sin embargo, inmediatamente adyacente a este taller se encuentra una escuela primaria y un hospital, así como viviendas residenciales establecidas dentro de los 400 metros. Aunque el sitio se consideraba para uso industrial, Kleinfelder utilizó criterios de riesgo para zonas residenciales (mas conservativas). Las probables vías históricas de introducción de sustancias químicas al suelo y a los mantos freáticos en el taller, resulta de las fugas y derrames provenientes tanto de las tuberías subterráneas de diesel , como del transporte superficial de materiales producto del petróleo (principalmente diesel y gasolina). Por lo tanto, las sustancias químicas de importancia fueron principalmente los compuestos del petróleo, aunque también se evaluaron otros químicos. El sitio ha estado en operación desde 1950.

Para determinar las sustancias químicas de importancia y para calcular los PRG, se hizo uso de la metodología general de evaluación de riesgos (1989) de la agencia de protección al Ambiente de los Estados Unidos (U.S. EPA). Para evaluar los riesgos potenciales a la salud por exposición a los agentes químicos del sitio, fueron escogidos los cálculos conservadores para la exposición residencial de la U.S. EPA. Dichas exposiciones residenciales están designadas de manera que protejan la salud de los niños, enfermos y personas de edad avanzada. Los objetivos potenciales de remediación fueron calculados para el medio afectado (eje. suelo) basados en la información toxicológica de los químicos de importancia.

Sustancias Químicas de Interés en el Sitio

En la fase inicial de ésta evaluación de riesgo a la salud fueron revisados los datos de muestreo disponibles y la información del sitio, para seleccionar así las sustancias

químicas de importancia que puedan requerir de PRGs sitio- específicos para protección a la salud.

Una vez que los datos sitio-específicos fueron revisados, las concentraciones máximas de los agentes químicos en el suelo de la propiedad fueron comparadas con los PRGs de la región IX de la U.S. EPA y con los PRGs de la Región III (U.S. EPA Región IX, 1995; U.S. EPA Región III, 1995). Dado que los PRG de la U.S. EPA son estrictos, basados en la salud y derivados de la idea de proteger a los niños expuestos a la ingestión de sustancias químicas del suelo (lista de la Región IX) o a la inhalación de los químicos evaporados del mismo (lista de la Región III), las concentraciones químicas que se encuentran por debajo de los niveles de PRG son improbables de ser importantes para la salud. La lista de PRG de la U.S. EPA son generales y designados para proteger todos los sitios. Por lo tanto, cuando se usan las listas no se toma en cuenta la información sitio- específica. Así que estas listas pueden ser más estrictas de lo necesario.

Las sustancias químicas en el suelo que tengan concentraciones que estén por arriba de los PRG, o que no tengan PRG (tales como gasolina y el diesel) son evaluados de forma adicional.

Las concentraciones máximas de las sustancias químicas en los mantos freáticos, fueron comparados con los Niveles Máximos de Contaminantes (MCLs) de Estados Unidos para sustancias químicas en el agua para beber, y con los PRG de la región IX de la U.S. EPA (basados en el gasto diario de agua para beber por los habitantes) cuando los MCLs para agentes químicos en específico no estaban disponibles.

Resultados de Muestreos Ambientales

Las actividades de muestreo en el sitio fueron conducidos por dos grupos: IDOM-TEMA en 1994 y Kleinfelder en 1995. Los resultados del muestreo de suelos de IDOM-TEMA (1994) reportaron concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) en el sitio que variaron entre 25 mg/kg hasta 64,000 mg/kg (de las 26 muestras totales, 16 se detectaron fuera de ámbito). Los hidrocarburos de la gasolina fluctuaron desde valores no detectados hasta 2.8 mg/kg (de las 25 muestras totales, 5 se detectaron fuera de ámbito). Los hidrocarburos del diesel mostraron variaciones desde no detectables hasta 1,029 mg/kg (de las 26 muestras totales, 15 se detectaron fuera de ámbito). Las muestras fueron divididas en superficiales y subsuperficiales. Las muestras de suelo fueron también analizadas para compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles, y para metales (en suelo superficial solamente). Aunque se reportaron los resultados en mg/kg para los compuestos volátiles y semi-volátiles detectados (de las 26 muestras totales, 8 se detectaron fuera de ámbito), sólo se reportaron las concentraciones totales de todos éstos compuestos sin hacer detalle de las sustancias químicas de forma individual. Los PRG no pueden ser calculados para tales grupos de compuestos totales debido a que los cálculos requieren de información químico-específica. Las concentraciones de metales (plomo, cromo, zinc y cadmio) que fueron

detectadas en el sitio se reportaron como buenas bajo los PRG de la Región IX de la EPA (la Región IX U.S. EPA, 1995), y por tal razón no se consideran preocupantes para la salud en éste sitio.

IDOM-TEMA también colectó en el sitio, muestras de mantos freáticos y muestras de gas del suelo. El manto freático es somero y presente bajo el sitio en una profundidad promedio de cerca de 5 metros por debajo de la capa superficial. Las concentraciones máximas de las sustancias químicas en el manto freático fueron comparados con los MCLs de Estados Unidos establecidos para agua de beber. En 10 de las muestras no se detectaron compuestos orgánicos volátiles del benceno, etilbenceno, tolueno y xilenos (BETX), ni de gasolina. Fueron detectados tanto el TPH como el diesel, sin embargo los MCLs o los PRG de la U.S. EPA no están disponibles para mezclas de petróleo. Los PRG pueden ser calculados para TPH y para diesel, dependiendo del uso del manto freático (eje. agua para beber o uso no-potable).

En la inspección del gas del suelo de varias localizaciones de la propiedad, se encontró: gas tetracloroetileno (PCE), gasolina, diesel y naftaleno (todos del ámbito de los hidrocarburos). Debido a que la inspección solo se analizó los niveles de respuesta del porcentaje relativo de gas en el suelo lo cual no indica la concentración de las sustancias químicas individuales, éstos datos no pueden ser usados para comparar las concentraciones químicas con los PRG de la U.S. EPA, ni pueden ser usados para calcular PRG sitio-específicos. IDOM-TEMA (1994) notó que las concentraciones de PCE en el suelo fueron insignificantes.

Después de revisar los datos del suelo de IDOM-TEMA, Kleinfelder colectó muestras adicionales de suelo y agua, y las analizó para compuestos orgánicos volátiles y semi volátiles (28 muestras de cada uno). Se detectaron varios compuestos. Uno de dichos compuestos fue el benceno, el cual solo sobrepaso su PRG en una de las 28 muestras (3.5%). Tomando en cuenta el hecho de que un compuesto se considera improbable de ser un riesgo para la salud si se detecta en forma no frecuente generalmente menor al 5% (Manual de Evaluación de Riesgos, U.S.EPA, 1989), el benceno en esta zona no se considera como un químico de importancia y por tanto, no requiere un PRG. Se detectaron varios hidrocarburos policíclicos aromáticos PAHs no carcinogenos, pero las concentraciones máximas del sitio se encontraron muy por debajo de los PRG de la U.S. EPA y son por lo tanto, improbables de ser de interés para la salud. Otro de los compuestos relacionados con el petróleo, descrito por el laboratorio como hidrocarburos extraíbles totales (que según el reporte tiene de quince a veinte carbonos, principalmente), fue detectado en trece de las 28 muestras. Este compuesto es probablemente diesel intemperizado o degradado; Pero ni este tipo de diesel ni el diesel fresco, tienen PRG establecido de la U.S. EPA.

Kleinfelder colectó también ocho muestras del manto freático, analizando dos muestras para metales, tres para compuestos orgánicos volátiles, y otros tres para los compuestos orgánicos semi-volátiles. Siete sustancias químicas detectadas (dos volátiles, cuatro semi-volátiles, y un metal), presentaron concentraciones máximas por

arriba de sus MCLs y PRG. Kleinfelder noto también que fueron encontrados productos del petróleo flotando en la parte superior del manto freático.

Substancias Químicas Seleccionadas para la Evaluación de Riesgo

Las sustancias químicas de interés para la salud en el suelo de la propiedad, fueron el TPH, la gasolina y el diesel. Mientras que las del manto freático fueron TPH, diesel, benceno, clorobenceno, benzo (a) antraceno, benzo (k) fluorantano, benzo (a) pireno y fluorenos. Todos estos compuestos con la posible excepción del clorobenceno, son compuestos cuya presencia puede provenir del uso y derrame de productos del petróleo.

Los productos del petróleo son mezclas complejas de cientos de diferentes compuestos de hidrocarburos. El aceite crudo refinado puede ser dividido a grosso modo en cuatro categorías, basados en el punto de ebullición (eje. la fracción de destilación) de los hidrocarburos individuales y en la longitud de las cadenas de carbono. Estas cuatro categorías son 1) Gasolina, donde la mayoría de los hidrocarburos tienen cadenas de carbono de longitudes que fluctúan entre los 5 y 10 carbonos (C_5 a C_{10}), 2) Fracciones líquidas volátiles (eje. keroseno, diesel, gas avión y aceites combustibles ligeros) que varían principalmente de C_8 a C_{18} , 3) Aceites combustibles pesados y aceites lubricantes (de C_{19} a C_{45}), y 4) Asfálticos, de treinta carbonos, en adelante (API, 1989, Sullivan y Johnson, 1993).

La gente puede estar expuesta a las sustancias químicas del suelo a través de su ingestión accidental o al respirar los químicos que se han evaporado de dicho suelo. Por lo tanto, los PRG que están basados en la ingestión o en la inhalación de estos químicos, son mediciones apropiadas de los riesgos a la salud.

Los resultados de TPH por el laboratorio local (designado por el cliente) faltaron de información acerca de la longitud de la cadena de carbono y pudiesen haber contenido cualquier de tales cadenas en su variedad de longitudes. Sin embargo, debido a la carencia de compuestos volátiles en el sitio y a las relativamente bajas concentraciones tanto de compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles, como de gasolina y de diesel, estas muestras de TPH se estimó que probablemente contenían en su mayoría, compuestos de hidrocarburos del ámbito de los combustibles pesados y los aceites lubricantes, con cadenas de longitudes de 19 carbonos y superiores (cuyo tamaño se identifica a través del uso de cromatogramas por laboratorios en EE.UU.); En adición, se encontró que los suelos del sitio no contienen hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) carcinógenos semivolátiles, los cuales generalmente son considerados como los componentes tóxicos de mezclas de hidrocarburos mas pesados. La presencia de hidrocarburos de cadenas mas pesadas es compatible con lo que se conoce acerca del destino de los productos del petróleo liberados al medio ambiente. Una vez que los hidrocarburos del petróleo son liberados hacia el suelo, los procesos ambientales de intemperización empiezan a tomar lugar cambiando la composición de la mezcla origina. Estos procesos incluyen; La volatilización de los compuestos mas ligeros (eje.

BETX) hacia la atmósfera y hacia los espacios de los poros del suelo (gas del suelo); El lixiviado descendiente de componentes solubles en agua a través de la columna del suelo hacia el manto freático; Y la degradación por la acción microbiana (Custance et al., 1992). La información acerca del decano (C_{10}), uno de los componentes mas ligeros de los hidrocarburos del diesel, indica que la volatilización es extremadamente rápida, con una vida media de uno o dos día aproximadamente (Howard, 1990). La biodegradación de la vida media del diesel (como mezcla), estima ser de cerca de un año (Custance et al., 1992). Lo resultante de estas acciones a lo largo del tiempo, es la perdida de componentes volátiles y solubles en agua, absorbidos en las partículas del suelo a los componentes de cadenas de carbono mas largas y relativamente inmóviles (eje. el "mas pesado"). Los compuestos con veinte carbonos o mas (del ámbito de los aceites pesados), son menos móviles en el medio ambiente que el diesel o la gasolina y no podría esperarse que de manera significativa, volatilicen o se vayan hacia mantos freáticos, el principal proceso de destino en el medio ambiente que se encuentra actuando en estos compuestos es la biodegradación microbiana.

Los PRG de la US EPA y los MCLs fueron desarrollados para proteger la salud de la gente que usa y toma el agua en sus casas, basados en el consumo diario. Sin embargo, el agua del manto freático somero que esta presente bajo el taller, no era potable debido a su alto contenido de sales (salobres) y aguas negras. De acuerdo a una entrevista con las autoridades en cargo del suministro agua potable (JUMAPAM), se nos informo que la Ciudad (cercana al sitio) recibía su agua de consumo de un a fuente localizada a 20 km. hacia el sudeste de la ciudad (arriba gradiente del sitio). Dado que el agua del manto freático que se encuentra por debajo del taller no podía ser utilizar como fuente agua potable sin pasar antes por algún tipo de tratamiento de agua, una remediacion en base a riesgo no era aplicable. Los niveles de remediacion basados en la salud humana pueden ser calculados solamente si la gente utiliza el agua de algún modo si nadie se pone en contacto con el agua, no hay exposición y por lo tanto no existe riesgo para la salud.

Sin embargo, además del uso del agua para beber, el agua del manto freático podía ser potencialmente utilizada ya sea en operaciones industriales, donde el contacto humano pudiese ocurrir de manera directa con la piel, o bien, a través de la descarga del manto freático hacia algún cuerpo de agua superficial. La gente pudiese entonces también estar expuesta a las sustancias químicas en el agua a través de las actividades recreativas en y dentro del agua superficial, tales como la natación o el paseo en bote. Si el manto freático descarga en su cuerpo de agua superficial que apoya la pesca y a la colecta de crustáceos para consumo humano, es entonces posible que la vida acuática pueda absorber las sustancias químicas en sus tejidos. La gente estaría entonces expuesta a las sustancias químicas del manto freático a través del consumo de tales peces y crustáceos provenientes de un cuerpo de agua superficial impactado.

Para este sitio, no se conocen usos beneficios del manto freático en la inmediaciones de la propiedad (JUMAPAM, 1995). La dirección del flujo del manto freático bajo el sitio es hacia el oeste en dirección del océano, el cual se encuentra aproximadamente a

5 km. de la propiedad. La configuración geológica del área, indica que el manto freático bajo el sitio puede eventualmente alcanzar el océano; aunque se conoce que los mantos freáticos someros tienen la posibilidad de poder llegar a la superficie antes que el océano en un manantial, lago o corriente intermedia. El agua superficial mas cercana al sitio, en dirección probable del flujo del manto freático (hacia el oeste), es el Estero del Infiernillo a aproximadamente 1 a 1 1/2 km. de distancia. Las sustancias químicas en el manto freático de acuerdo a modelos de migración se movían lentamente y se estimó un periodo considerable de tiempo para desplazarse hasta el estero (10 a 15 años), y aun mas tiempo para alcanzar el océano (desde décadas hasta cientos de años). Durante este desplazamiento en el tiempo, sus concentraciones pueden decrecer a causa de la dilución, la volatilización, y la degradación microbiana. Dado que las concentraciones de los seis químicos que excedieron los estándares de salud basados en el agua para beber, fueron claramente bajos para comenzar en el ámbito de los ppb (partes por billón, eje. microgramos por litro ug/Lt), es improbable que estos pudiesen haber representado riesgos la salud cuando alcanzasen al estuario. En ese punto las concentraciones serian probablemente muy bajas para ser de interés, o las sustancias químicas no serian ya detectables. Por lo tanto, aunque las seis sustancias químicas en el manto freático del sitio exceden sus concentraciones selectivas para TPH y diesel (también detectado en el manto freático) y en caso de que el agua no este siendo usada por los humanos, se aplica también el mismo argumento para estos químicos, por lo que sus concentraciones no serian de interés para la salud.

Evaluación de Toxicidad

Un principio fundamental de toxicología es que la dosis dérmica de un químico es tóxico, y que por lo tanto, cualquier químico puede ser tóxico. La toxicidad es dependiente también de la ruta por la cual la sustancia química entra en el cuerpo, eje. a través de la boca (ingestión oral), a través de los pulmones (inhalación) o absorbido a través de la piel (vía dérmica o cutánea). Los criterios de toxicidad desarrollados por la U.S. EPA, describen la relación numérica entre la dosis de un químico y la magnitud del efecto tóxico; y están basados en una ruta específica de exposición (oral o por inhalación). La siguiente sección presenta los criterios relevantes de toxicidad oral, los cuales fueron usados para estimar las concentraciones de los químicos de interés en el suelo que son protectores de la salud humana, vía ingestión potencial e incidental del suelo. Se presenta a continuación una breve discusión de los temas circundantes al desarrollo de los criterios de toxicidad para los productos del petróleo.

Los procedimientos de evaluación de la salud no habían sido usados para las mezclas de hidrocarburos del petróleo hasta últimas fechas debido a la indisponibilidad de los criterios de toxicidad, uno de los componentes requeridos para la determinación del riesgo. La toxicidad de varios hidrocarburos del petróleo, tales como la gasolina o el diesel, ha sido estimados tradicionalmente, a través de escoger el componente más tóxico como una medida substituta de riesgo y peligro (eje. benceno para gasolina, naftaleno y PAHs para diesel). El peligro o los riesgos han sido evaluados asumiendo que es una mezcla fresca y no intemperizada de hidrocarburos, y que contiene un

porcentaje estimado de los constituyentes más tóxicos (Koblis et al, 1992). Como complicación adicional, la composición de una mezcla de petróleo puede variar dependiendo de la fuente de aceite crudo y del proceso de refinamiento. Por ejemplo, el contenido de PAHs del diesel varía substancialmente entre los diferentes productos del diesel, afectando potencialmente la toxicidad de la mezcla (Heath et al, 1993).

En 1992, la EPA emitió los criterios provisionales de toxicidad para gasolina, diesel y gas-avión. Estos criterios están dirigidos más hacia las mezclas antes que hacia la estimación de la toxicidad basada en unos pocos constituyentes tóxicos, pero no toman en consideración los cambios que ocurren en dichas mezclas de petróleo una vez que éstas han sido liberadas hacia el medio ambiente (tales como la evaporación de los compuestos volátiles más tóxicos). Ambos tipos de criterios sobrestiman conservadoramente la toxicidad y así, los riesgos a la salud.

En 1994, el Estado de Massachusetts desarrolló un criterio de toxicidad para cuatro diferentes longitudes de cadenas de carbono, que varía desde C_5 hasta C_{32} (Departamento de Protección Ambiental de Massachusetts; MDEP, 1994). El MDEP recomienda el evaluar los componentes carcinógenos tales como el benceno y los PAHs de forma separada del resto de los compuestos presentes en una fracción particular de petróleo, y han escogido compuestos sustitutos para representar la toxicidad de diferentes agrupaciones de longitudes de cadena. Los especialistas del riesgo pueden escoger los criterios de toxicidad a partir de la agrupación de longitudes de cadena que semeje, de manera más cercana las condiciones en un sitio específico, tomando en cuenta así a los cambios ambientales (eje. intemperización). La U.S. EPA está recomendando ahora el uso de los valores del MDEP. Los valores de toxicidad de los hidrocarburos del petróleo de cadenas pesadas que tienen cadenas mayores a 32 carbonos, siguen siendo "no disponibles", sin embargo, dichos compuestos parecen tener baja toxicidad.

Cálculos de Niveles Preliminares de Remediación

Los niveles de remediación basados en la salud fueron calculados mediante una definición del nivel enfocado de riesgo a la salud y posteriormente en la resolución de las ecuaciones básicas de evaluación de riesgo en la concentración del suelo. Los objetivos enfocados del riesgo, difieren dependiendo en si existen efectos carcinógenos o no carcinógenos en las sustancias químicas de interés. El potencial para los efectos no carcinógenos de las sustancias químicas es típicamente examinado en una evaluación de riesgo por medio del cálculo del "cociente de peligro". El cociente de peligro es la relación entre la toma o dosis estimada de una sustancia química y la referencia de la dosis de una sustancia química específica. Para un cociente de peligro de 1.0, la dosis estimada iguala a la dosis superior asociada con los efectos no adversos a la salud (eje. el RfD).

El riesgo carcinogeno representa el límite superior de la probabilidad de desarrollar cáncer en el curso de la vida, adicionalmente al antecedente de riesgo de cáncer para el país de interés (en USA el antecedente de riesgo es de una probabilidad entre 3 o de 3×10^{-1}). Debido a que las sustancias químicas cancerígenas no fueron indicadas como de interés para éste sitio, no se han establecido los PRG basados en los objetivos enfocados de riesgo de cáncer.

El nivel específico de remediación del suelo para una sustancia química en particular, depende del objetivo enfocado de riesgo, de la toxicidad de la sustancia química (estimada por su RfD para sustancias químicas con efectos solo no cancerígenos, sección 3), y de la magnitud de exposición potencial.

La ingestión del suelo es la vía de mayor interés para las sustancias químicas del sitio, basados en sus características de transporte y en su destino o disposición en el medio ambiente. La inhalación no se considero como una vía significativa debido a que los compuestos volátiles y semi-volátiles eran bajos o no detectados. De igual manera, los riesgos por inhalación de polvo se consideran probablemente insignificantes comparados con los riesgos por vía oral. Por lo tanto, las concentraciones enfocadas del suelo fueron calculadas para ser protectoras de los residentes hipotéticos, incluyendo a los niños que pudieran estar expuestos a la ingestión del suelo mientras que posiblemente jugaban en el sitio, lo cual resulta mas protector que las condiciones industriales actuales del sitio (trabajadores adultos sanos). Las suposiciones estándar de la U.S. EPA omitidas para los receptores residenciales fueron usadas en los cálculos (U.S. EPA 1989, 1991). Las suposiciones a continuación mencionadas, son consideradas por la U.S. EPA para representar la exposición razonable máxima posible para los residentes:

- Los residentes permanecen en el sitio 350 días al año, por 30 años
- Los residentes adultos ingieren 100 mg/día de suelo por 24 años, los niños ingieren 200 mg/día de suelo por 6 años.
- Los adultos tienen un peso corporal promedio de 70 kg. y los niños tienen un peso promedio de 16 kg. (niños de 0-6 años de edad).

La ecuación para estimar los objetivos de remediación del suelo para TPH, gasolina y diesel, considerando como protectores los efectos carcinogenos es :

Nivel de Limpieza del suelo (mg/kg) =

$$\text{RfD} \times \text{UFC} \times \left[\frac{(\text{PISn} \times \text{FE} \times \text{Den})}{\text{Pcn} \times 365 \text{ días}} + \frac{(\text{PISa} \times \text{FE} \times \text{Dea})}{\text{Pca} \times 365 \text{ días}} \right] / 30 \text{ años}$$

Donde:

RfD = Dosis de referencia (ver sección 3)
 Pca/n= Peso corporal del adulto/niño (70/16 Kg)
 UFC = Unidad de factor de conversión (1,000,000 mg/kg.)

CP =	Coefficiente de peligro (1.0)
PISa/n=	Promedio de ingestión de suelo por adulto o niño (100/200 mg/día)
FE =	Frecuencia de Exposición (350 días por año)
Dea/n =	Duración de la Exposición por adulto o niño (24/6 años)

Basados en las condiciones de exposición razonables máximas para los residentes expuestos a las sustancias químicas del suelo, los niveles de limpieza del suelo para la gasolina podría ser de 16,000 mg/kg, para diesel podría ser de 160,000 mg/kg y para TPH podría ser de 1,600,000 mg/kg³. Las concentraciones mas elevadas de gasolina, diesel y TPH detectadas en el sitio fueron de 2.8 mg/kg, 1029 mg/kg, 64,158 mg/kg, respectivamente. Ninguna de las concentraciones del sitio exceden éstos niveles de PRG. El PRG del TPH se deriva de compuestos de longitud de cadena de C₁₉ y mayores, asumiendo además que los compuestos de PAHs son generalmente bajos o ausentes. No fue disponible la información para verificar la longitud de cadena de carbono de los resultados de TPH a partir de los datos de IDOM-TEMA. Por lo tanto, se uso una suposición peor de los casos, de manera que todos los resultados de TPH estén dentro del intervalo de cadenas de carbono de la gasolina, con un nivel de remediación del sitio de 16,000 mg/kg.

Remediación de Sitio

Kleinfelder utilizo los resultados del estudio de riesgo para diseñar e instalar un sistema de bioremediación in-situ y ex-situ. Kleinfelder realizo la bioremediación in situ del sitio con pozos de extracción (ventilación) e inyección de aire al manto freático. Esta es una tecnología regularmente utilizada por Kleinfelder para remover mediante bombas de vacío ambos CO₂ y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) del suelo no saturado y manto freático. La tecnología emplea pozos de extracción en la zona no-saturada, con una tubería ranurada que coincide con los intervalos contaminados, para crear un flujo el aire del subsuelo a través de las zonas contaminadas hacia una bomba de succión de alto vacío. Pozos de inyección de aire son posteriormente localizados alrededor de los pozos de extracción para ayudar a ventilar el subsuelo y crear condiciones aerobicas. Los pozos de inyección son instalados aproximadamente entre 10 y 30 pies bajo el nivel freático y crean un cono de aire que convierte la zona saturada aerobica acelerando la bioremediación y como acción secundario volatiliza contaminantes volátiles el la zona saturada hacia la zona no saturada donde se encuentran los pozos de extracción. Los pozos de inyección también se encuentran interconectados a un compresor ubicado centralmente. Kleinfelder utilizo la información recolectada durante el muestreo inicial y pruebas de vacío para localizar e instalar pozos extracción e inyección de aire. Kleinfelder instalo 60 pozos de extracción y 30 pozos de inyección en el sitio.

Los suelos en el sitio eran de baja permeabilidad de aire, reduciendo la efectividad de la bioremediación in-situ via pozos de extracción e inyección. Kleinfelder utilizo fracturación neumática para incrementar la permeabilidad del aire y así mismo

incrementar la efectividad de la bioremediación. Por medio del impulso de aire a alta presión dentro de líneas conectadas a pozos de fracturación; los suelos arcillosos y finos se fracturan para crear vías de acceso para el aire y los vapores volátiles.

Kleinfelder también excavó y remedió ex-situ los suelos impactados. Este método es eficiente y no costoso para la remediación de suelos con contaminación no muy profunda (menos de 7 metros). Los suelos impactados no profundos fueron excavados y depositados en celdas de tierra sobre láminas de plástico. Una sección de PVC ranurada fue enterrada al interior, y a lo largo de la celda de tierra. Una bomba de aire unida a la sección enterada de PVC, proporciona la ventilación por fuerza. La ventilación mantiene la parte interna de la fila de tierra aeróbica. Macro nutrientes (nitrógeno y fósforo) fueron agregados como eran necesarios. El volumen de nutrientes necesarios como también el tamaño de la bomba de aire fueron calculados usando la masa de la contaminación y la permeabilidad de la tierra. La celda de tierra fue cubierta con plástico para mantener el 20% de humedad, y para prevenir migración de la contaminación por viento o lluvia. Muestras de la fila de tierra fueron analizadas por concentraciones de TPH y humedad para evaluar el progreso de la bioremediación aeróbica. Las concentraciones de TPH se graficaron en papel semi logarítmico (TPH / tiempo). La remediación se logró cuando los niveles de TPH llegaron a los PRGs recomendados en el estudio de riesgo a la salud.

En ambos métodos, las bacterias naturales del suelo son estimuladas por la adición de oxígeno, agua y macronutrientes. Esta estimulación da como resultado un gran incremento de bacteria (1000 veces) y la bio-oxidación de los contaminantes para formar subproductos inofensivos (principalmente CO₂ y agua).

CONCLUSIONES

El manto freático y los suelos de sitio contenían productos del petróleo que excedían potencialmente las concentraciones límite basadas en la salud. Sin embargo, el manto freático en las inmediaciones del sitio no era potable, de ahí el prevenir las exposiciones de ingestión de ésta agua y la necesidad de remediación para proteger esta fuente de agua. No obstante las sustancias químicas presentes en el manto freático bajo el sitio pudieran migrar potencialmente del área y alcanzar el agua superficial utilizada por los humanos para beber y/o para recreación y pesca. El cuerpo de agua superficial más cercano es un estero (Estero del Infiernillo) a 1/2 Km. de distancia, el cual se encuentra en la trayectoria del flujo del manto freático. Las sustancias químicas pudieran alcanzar el estero en concentraciones que pudieran poner en riesgo la salud, sin embargo, tales sustancias irán decreciendo en cantidad a causa de la disminución de las concentraciones, esta disminución se va dando a medida que las sustancias químicas se mueven de la fuente de contaminación por medio de procesos de atenuación, degradación o adhesión al suelo. Considerando el potencial de las sustancias químicas para alcanzar el estero, fue prudente el remediar el producto libre y los suelos con las más altas concentraciones de TPH, dado que tales sustancias

químicas están funcionando como una fuente continua y concentrada de productos del petróleo hacia el manto freático.

La remoción del producto libre y la remediación limitada del suelo eliminó la fuente que llevaba las sustancias químicas hacia el manto freático y previno posibles incrementos en las concentraciones de dichas sustancias químicas en el manto freático.

Los suelos del sitio contenían TPHs en concentraciones excedentes al PRG basado en la ingestión de suelo que contenga gasolina. La mezcla de TPH presente en la propiedad probablemente contiene compuestos de cadenas de hidrocarburos mayores de 20 carbonos. Los suelos del sitio no contenían compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles en concentraciones que excedían los PRG individuales y conservadores de la U.S. EPA. Los compuestos volátiles y semi-volátiles son generalmente considerados como los constituyentes más tóxicos del TPH. De manera adicional, la información de salud acerca de los compuestos de cadena pesada del TPH es limitada en la literatura científica, donde indican una baja toxicidad en la ausencia de PAHs. Sin embargo, en ausencia de la información específica acerca de la longitud de la cadena para las muestras de TPH del sitio, se asumió que el TPH está en el intervalo más tóxico de longitud de cadena, entre los 5 y los 8 carbonos. Por lo tanto, Kleinfelder recomendó un PRG de TPH para los suelos del sitio de 16,000 mg/kg.

Las concentraciones estimadas del suelo, protectoras de la salud humana basadas en la gasolina son improbables de subestimar riesgos a la salud. El PRG está basado en la exposición de los residentes al suelo del sitio. En la actualidad, el sitio es industrial para el cual, sus exposiciones serán menores que para una zona residencial. Para la evaluación de riesgo en un sitio industrial se consideran personas de mediana edad, fuertes y de bien salud (en contraste a sitios residenciales donde se consideran niños que son más receptivos y ancianos de pobre salud). En adición, el tipo de TPH presente en el sitio es significativamente menos tóxico que la gasolina.

La combinación del sistema de remediación in-situ y ex-situ con PRGs específicos al sitio en base a riesgo a la salud representó un ahorro al cliente de aproximadamente \$2.5 millones de dólares. El cliente presentó esta metodología al gobierno y la adaptó para la remediación de sus demás propiedades. El cliente posteriormente utilizó los recursos para iniciar remediaciones en otros sitios igualmente contaminados y implementar un programa de capacitación ambiental y prevención.

REFERENCIAS

- API. 1994. Transport and Fate of Non-BTEX Petroleum Chemicals in Soils and Groundwater. American Petroleum Institute, Washington, DC.

- ATSDR. 1993. Toxicological Profile for Fuel Oils. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA.
- Barrientos A, Ortuno MT, Morales JM, et al. 1977. Acute Renal Failure After Use of Diesel Fuel as a Shampoo. *Arch Intern Med* 137:1217-1219.
- Beck LS, Hepler KI, Hansen KL. 1982. The Acute Toxicology of Selected Petroleum Hydrocarbons. In: Proceedings of the symposium on the Toxicology of Petroleum Hydrocarbons. HN MacFarland et al., eds. American Petroleum Institute, Washington, DC.
- Beliles RP, Mecler FJ. 1982. Inhalation Teratology of Jet Fuel, Fuel Oil, and Petroleum Naphtha in Rats. In: Proceedings of the symposium on the Toxicology of Petroleum Hydrocarbons. HN MacFarland et al., eds. American Petroleum Institute, Washington, DC.
- Brainard J, Beck BD. 1992. A Review of the Bioavailability of Petroleum Constituents. *J Soil Contam* 1(3):273-307.
- Carpenter CP, Geary DL, Meyers RC, et al. 1976. Petroleum Hydrocarbon Toxicity Studies XI. Animal and Human Response to Vapors of Deodorized Kerosene. *Tox Appl Pharmacol* 36:443-456.
- Crisp AJ, Bhalia AK, Hoffbrand BI. 1979. Acute tubular necrosis after exposure to diesel oil. *Brit Med J* 2:177-178.
- Dalbey W, Henry M, Holmberg R, et al. 1987. role of exposure parameters in the toxicity of aerosolized diesel fuel in the rat. *J Appl Toxicol* 7:265-275.

EPA. 1989a. Exposure Factors Handbook. Office of Health and Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA 600/8-89/043.

EPA. 1989b. Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume I, Human Health Evaluation Manual, Part A. Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA 540/1-89/002.

EPA. 1992. Dermal Exposure Assessment: Principles and Applications. Office of Health and Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA 600/8-91/011B.

Gosselin RE, Smith RP, Hodge HC. 1984. Clinical Toxicology of Commercial Products. 5th Ed. Williams & Wilkins, Baltimore, MD.

Hawley JK. 1985. Assessment of health risk from exposure to contaminated soil. *Risk Analysis* 5:289-302.

HSDB. 1991. Hazardous Substances Data Bank. National Library of Medicine, Washington, DC.

IARC. 1989. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Occupational Exposures in Petroleum Refining; Crude Oil and Major Petroleum Fuels. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France. Volume 45.

IARC. 1982. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. Some Aromatic Amines, Anthraquinones and Nitroso Compounds, and Inorganic Fluorides Used in Drinking-Water and Dental Preparations. World Health Organization, Lyon, France. Vol. 27

Jackson, Jerimiah D., PhD, Kleinfelder Inc. Advanced Remediation Technology and Design, October 1993, University of California San Diego

Kainz RJ, White, LE. 1982. Consequences Associated with the Inhalation of Uncombusted Diesel Vapor. In: Proceedings of the symposium on the Toxicology of Petroleum Hydrocarbons. HN MacFarland et al., eds. American Petroleum Institute, Washington, DC.

Kirk-Othmer. 1984. Diesel Fuel. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. F. Mark, M. Grayson, and D. Eckroth et al., Eds. 3rd Ed. John Wiley & Sons, New York.

Kryzanovskij NV. 1971. Occupational health conditions associated with the cleaning of oil tankers and their effect on worker's health. *Gig Tr Prof Zabol* 15:14-17.

Lee T, Seymour W. 1979. Pneumonitis caused by petrol siphoning. (Letter). *The Lancet* 8134:149.

MDEP. 1994. Development of a Health-based Alternative to the TPH Parameter. Massachusetts Department of Environmental Protection, Boston, MA. August 1994.

Quering, Sharon, Kleinfelder Inc., Human Health Risk Assessments Report, 1995

CURRICULUM RESUMIDO DEL AUTOR

Kleinfelder es un consultorio de ingeniería multi-diciplinario que se especializa en ciencias de tierra, agua, y aire. Desde su inicio en 1961, ha completado miles de proyectos relacionados a la ingeniería ambiental, geotécnica, y pruebas de construcción tanto para clientes privados como para el gobierno. Kleinfelder cuenta con mas de 1,000 ingenieros ambientales, toxicólogos, biólogos, químicos, geólogos e hidrólogos con tecnología nueva para cumplir metas ambientales de una manera económica. Hoy día, Kleinfelder es un lider en el campo de la ingeniería ambiental en el Oeste de los Estados Unidos, y goza de una excelente reputación basada en el compromiso por alcanzar la excelencia en todos los aspectos de nuestro trabajo.

El Sr. Leslie es un asesor ambiental registrado por la EPA de EE.UU. con mas de trece años de experiencia en el manejo de proyectos técnicos y tiene el puesto de vicepresidente con Kleinfelder. Sus bases incluyen estudios de evaluación de sitio, remediación de suelos y mantos freáticos, evaluación de riesgo a la salud y ecología, y higiene industrial. Experiencia específica incluye la evaluación y remediación in-situ y ex-situ de suelos y agua subterránea contaminada por hidrocarburos. El Sr. Leslie vice presidente de Kleinfelder, Inc. y dirige las operaciones de Kleinfelder en Mexico que consisten en 5 sucursales con mas de 65 profesionales. El Sr. Leslie es bilingüe (Inglés- Español).

Este trabajo intenta transmitir la experiencia acumulada en el proceso de implementación y certificación de la norma ISO 14000 en la Planta de lubricantes de Shell CAPSA.

1.- INTRODUCCION

La preocupación de la comunidad con respecto al medio ambiente crece día a día. Para las empresas ya no es suficiente con producir productos de muy buena calidad a un precio cada vez más competitivo, sino que resulta fundamental que todo el ciclo productivo se desarrolle dentro de un ámbito de respeto y armonía con el medio ambiente.

Recordamos que la serie de las normas ISO 9000 reglamentan la gestión para asegurar que un producto cumpla con la calidad requerida por el cliente, mientras que las ISO 14000, dan los lineamientos para evidenciar que las empresas cumplen, de manera voluntaria, con la calidad requerida por el medio ambiente. En particular, las normas ISO 14000, por tratarse de normas más nuevas, han dado un paso más con respecto a las normas ISO 9000, ya que requieren de la organización su compromiso para el mejoramiento continuo.

Esta norma comparte principios comunes al Sistema de Calidad ISO 9002 tales como:

- a) Fijar responsabilidades y recursos adecuados.
- b) Control de la documentación.
- c) Realización de auditorías.
- d) Revisiones periódicas de la Gerencia, etc.

En particular, la norma ISO 14001, establece que las compañías que deseen cumplir con dicha norma y eventualmente certificarse, deben:

- Establecer la política ambiental de la organización.
- Implementar mecanismos para identificar la legislación aplicable y dar evidencia de su total cumplimiento.
- Identificar y evaluar los aspectos ambientales asociados con las actividades.