



# REMEDIACIÓN "IN SITU" DE AGUA SUBTERRÁNEA CONTAMINADA CON CROMO HEXAVALENTE

Por: Jerjes Pantoja Irys<sup>[1]</sup>, Hugo Mújica Sanchez<sup>[1]</sup> y Mark Wagner<sup>[2]</sup>

## Resumen

En México se han publicado formalmente pocos casos de remediación de agua subterránea contaminada con compuestos antropogénicos; esto ha tenido como consecuencia el lento aprendizaje de la eficiencia e ineficiencia de los métodos y tecnologías aplicables en las condiciones hidrogeológicas que caracterizan el territorio nacional. La aplicación de la tecnología de remediación "in situ" de agua subterránea contaminada con cromo hexavalente, denominada "zonas reactivas anaeróbicas", bajo la modalidad de inyección de melaza en la zona conurbada de la Ciudad de México, representa una tecnología viable para su uso en México. La implementación de esta tecnología consistió en la aplicación controlada, mediante el conocimiento hidrogeológico del sitio, de la inyección y adición a presión de una mezcla de carbohidratos (melaza), hierro y agua a través de pozos de inyección, trincheras y zanjas en los cuerpos de agua someros contaminados por cromo hexavalente. Una extensión de 4,000 m<sup>2</sup>, con un espesor de 10 metros de zona saturada y en concentraciones de hasta 200 mg/l de Cr<sup>6+</sup>; a la que se le aplicó la solución, fue remediada a límites permisibles establecidos en la normatividad internacional en un periodo de 18 meses, a partir del primer evento de inyección de la solución.

## Remediación "in situ"

Pocos casos de experiencias exitosas de remediación "in situ" de agua subterránea contaminada con metales pesados, se han documentado y/o publicado formalmente en México. El presente artículo describe la aplicación de la tecnología de remediación "in situ" de agua subterránea denominada "zonas reactivas anaeróbicas (ZRA)" bajo la modalidad de inyección de melaza, en un sitio contaminado con cromo hexavalente correspondiente a una antigua planta industrial metalmeccánica de la zona conurbada de la Ciudad de México.

Cualquier especialista que se enfrenta a la necesidad de llevar a cabo la remediación de un cuerpo de agua subterránea contaminado con metales pesados, deberá obtener y asegurar información valiosa con respecto a las condiciones geológicas e hidrogeológicas locales y regionales; de igual forma, el entendimiento preciso de la geoquímica del cuerpo será vital para alcanzar el objetivo deseado.

Desafortunadamente, en México aún carecemos de información muy básica que permitiría un mejor desempeño, a un menor costo para las entidades o empresas que realizan y pagan la investigación y la remediación. Por ejemplo, se carece de mapas temáticos, aún en las ciudades más pobladas del país, en los que se identifiquen la profundidad y espesor aproximado de los cuerpos de agua subterránea somera, su calidad geoquímica, la litología subyacente y propiedades hidrodinámicas, entre otras. En realidad, la información disponible se enfoca en datos regionales asociados a los acuíferos profundos y su geología y geoquímica asociada; dejándose de lado los cuerpos de agua somera que generalmente son los primeros receptores de la contaminación antropogénica. La generación de estudios que aporten conocimiento es muy necesaria para mejorar nuestro desempeño en los temas ambientales del cuidado y la protección de los cuerpos de agua superficiales y los de agua subterránea.

Las ZRA tienen como ventajas su rápida respuesta y facilidad de implementación, comparada con sistemas naturales o tradicionales de remediación. La tecnología consiste en la inyección y adición a presión, de una mezcla de carbohidratos, hierro y agua, a través de pozos de inyección, trincheras y/o zanjas, en áreas contaminadas. Es importante resaltar que la melaza es un líquido viscoso, oscuro, de sabor dulce, que

[1] Corporación Ambiental de México

[2] ARCADIS.- Empresa de consultoría ambiental





queda como sub-producto de la fabricación del azúcar (grado alimenticio); por lo que en México es abundante y de bajo costo.

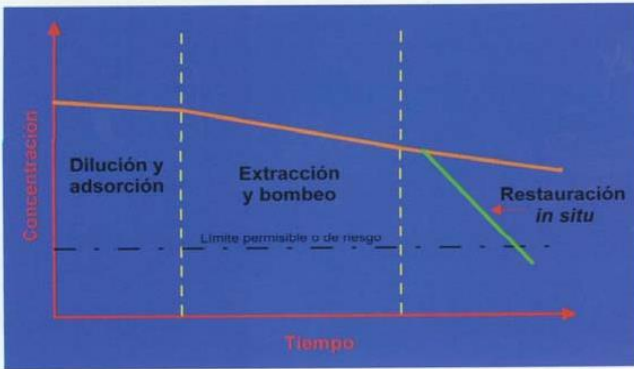


Figura 1. Representación de la eficiencia de sistemas de restauración

Los microorganismos nativos metabolizan la fuente de carbono adicional, produciendo al mismo tiempo condiciones sulfato-reductoras y metanogénicas en el medio, debido a que consumen el oxígeno disuelto. Después de la reducción del oxígeno disuelto, los microorganismos comienzan a utilizar receptores alternativos de electrones para la respiración. La secuencia general del uso de receptores alternativos de electrones y formación de subproductos de la respiración es la siguiente:

Nitrato (NO <sub>3</sub> ).....	Nitrito (NO <sub>2</sub> )
Hierro Férrico (Fe <sup>3+</sup> ).....	Hierro Ferroso (Fe <sup>2+</sup> )
Manganeso (Mn <sup>4+</sup> ).....	Manganeso (Mn <sup>2+</sup> )
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ).....	Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S)
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ).....	Metano (CH <sub>4</sub> )

El espacio físico que se crea, es una zona reactiva anaeróbica que se caracteriza por presentar:

- Concentración de Oxígeno disuelto menor a 0,5 mg/L
- Potencial de Oxido Reducción máximo de -250 milivolts
- Relación de carbono orgánico disuelto y el compuesto contaminante de 50:1

La reducción del sulfato y la desnitrificación por los microorganismos endémicos del suelo, sirven como catalizador para la precipitación de

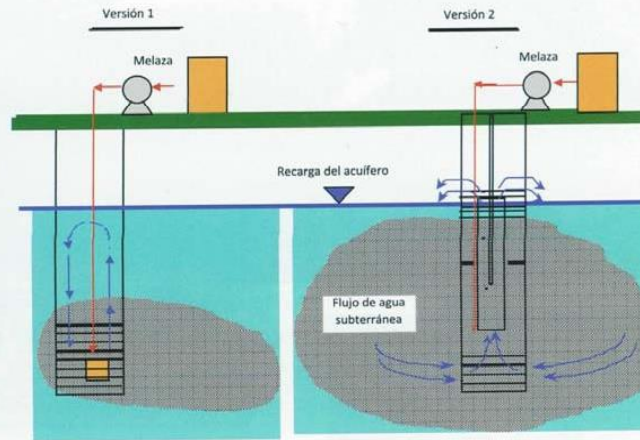
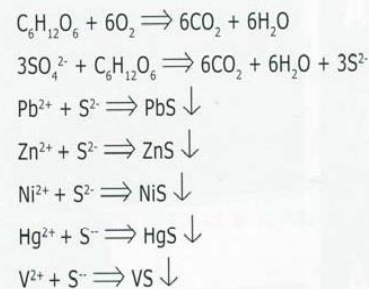


Figura 2. Sección-transversal del equipo de inyección para la zona reactiva anaeróbica "in situ"

metales y para la dechlorinación reductiva de los compuestos orgánicos clorados.

Bajo condiciones metanogénicas, los sulfatos presentes son reducidos hasta formar iones sulfuro, que pueden reaccionar con los metales precipitados disueltos para formar un precipitado sólido, el cual es eventualmente filtrado por la matriz del suelo. No hay necesidad de remover el precipitado del suelo saturado, ya que es insoluble y no dañino.

Las siguientes reacciones son indicadoras del proceso, utilizando azúcar o melaza con nutrientes naturales para precipitar metales disueltos del subsuelo.



Los efectos de una inyección de melaza pueden ser observados a través de factores fisicoquímicos en el agua como: a) Incremento temporal en los niveles de agua; b) Incremento en la conductividad o en Sólidos Totales Disueltos (TDS); c) Incremento en Carbón Orgánico Total; d) Incremento en hierro ferroso disuelto; e) Incremento en Manganeseo insoluble; f) Incremento en alcalinidad; g) Incremento en sulfuros; Declinación en la concentración de metales disueltos; h) Declinación del pH; i) Declinación en el Potencial de Oxido-Reducción (REDOX); y j) Declinación de Oxígeno Disuelto (DO).

Además de la remediación de los metales, las citadas condiciones de reducción de sulfato y metanogénicas, causadas por la inyección de melaza, permiten la reducción de hidrocarburos clorados como: Tetracloroetileno (PCE), Tricloroetileno (TCE), Dicloroetileno (DCE), y Cloruro de Vinilo (VC). Como se muestra a continuación, la inyección de melaza y hierro en la zona saturada, permite la reducción de PCE a TCE a DCE a VC y eventualmente a etileno, un gas no dañino e inerte. Como resultado, el método referido a esta tecnología, remueve la contaminación por PCE, TCE, DCE, VC disueltos en el agua del subsuelo.



Figura 3. Proceso de dechloración reductiva de compuestos orgánicos clorados

Existen tres dominios de sistemas de flujo, que son el núcleo del manejo del proceso de transporte hidráulico. Estos tres dominios controlan la eficacia de una remediación pro activa, así como el rango y la extensión de los procesos de atenuación natural. Los tres dominios de flujo son los siguientes:

- Transporte advectivo a lo largo del núcleo de los canales de flujo dominantes;
- Difusión dentro de los canales de flujo remanentes,
- Flujo y difusión entre las porciones remanentes relativamente de bajo flujo, de la matriz geológica impactada.

Las manipulaciones hidrogeológicas utilizadas en esta tecnología para provocar una zona reactiva homogénea "in-situ", en tres dimensiones, así como el uso de la matriz del suelo para que por ella misma filtren los precipitados de metales insolubles y el gas inerte, son algo único.

### Aplicación en un sitio contaminado en el Estado de México

En un terreno ubicado en el Estado de México se derramaron al suelo a través de los años, soluciones conteniendo cromo hexavalente, este metal soluble migró también hacia el agua subterránea somera que subyace la propiedad. La contaminación en el suelo y agua subterránea se extendió en un área de aproximadamente 4,000 m<sup>2</sup> en concentraciones máximas de hasta 40,000 mg/kg en suelo (límite máximo permisible 510 mg/kg) y en agua subterránea de 200 mg/l (límite máximo permisible 0,11 mg/l) de cromo hexavalente.





El suelo subyacente en el terreno presenta capas de arena fina, ceniza volcánica, arcilla y limo que varían en espesor y en proporción a lo largo de los 4,000 m<sup>2</sup> y hasta una profundidad de 10 m con respecto a la superficie, lo cual genera una significativa heterogeneidad tridimensional. El agua subterránea somera oscila en profundidad entre 1.8 y 3 m en época de estiaje; aunque en época de lluvias se llegan a observar niveles prácticamente al nivel de superficie. El agua subterránea somera contaminada se encuentra en un intervalo que va desde la superficie, hasta los 10 metros de profundidad, en donde estratos arcillosos de alta plasticidad y alto contenido de materia orgánica limitan los movimientos verticales del agua y de los contaminantes.







Las capas de arena de varios espesores, representan los canales de flujo dominantes en el sitio. Las capacidades específicas de inyección para cada uno de los tres dominios han sido determinados durante la prueba piloto implementada en el 2008 en el transcurso de 8 meses, y son usados como base para la definición de los volúmenes de inyección del fluido de melaza, hierro y agua en toda el área impactada. El aspecto más crítico respecto al tiempo requerido para la remediación es la dinámica de la porción difusora del sistema.

Dada la relativa poca profundidad del agua subterránea, las presiones de inyección en los pozos estuvieron limitadas a un máximo de 0.5 kg/cm<sup>2</sup> y en las trincheras se vertió directamente el fluido.

La secuencia y volúmenes de inyección / infiltración son diseñados cuidadosamente para ayudar a mantener la pluma de cromo hexavalente en el sitio y en la zona de tratamiento creada; este diseño consideró 5 trincheras y 8 pozos de inyección; con 3 eventos de inyección en intervalos de 6 meses, con los volúmenes mostrados en la tabla 1 (un solo evento).

ID	Litros Totales de Mezcla (litros)	Melaza (litros)	Sulfato Fe (kg)	Agua (litros)	Agua Adicional
Trinchera A	34,000	1,700		32,300	10,000
Trinchera B	34,000	1,700		32,300	1,0000
Pozo Iny 1	100,000	2,500	100	97,500	
Pozo Iny 2	100,000	2,500	100	97,500	
Pozo Iny 3	100,000	2,500	100	97,500	
Pozo Iny 4	100,000	2,500	100	97,500	
Trinchera C	136,000	6,800		129,200	20,000
Pozo Iny 5	100,000	5,000		95,000	
Trinchera D	136,000	6,800		129,200	20,000
Trinchera E	102,000	5,100		96,900	20,000
Pozo Iny 6	100,000	5,000		95,000	
Pozo Iny 7	100,000	5,000		95,000	
Pozo Iny 8	100,000	5,000		95,000	
<b>Total</b>	<b>1,242,000</b>	<b>52,100</b>	<b>400</b>	<b>1,189,900</b>	<b>80,000</b>

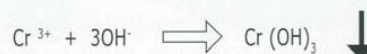
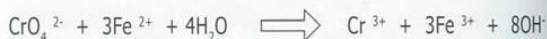
Nota: El agua adicional ayuda a evitar que proliferen el olor en las trincheras, pues profundiza el fluido y limpia la superficie que contiene la mezcla con melaza y hierro.

## Conclusiones

El objetivo de limpieza para el programa de remediación fue de 0.11 miligramos por litro (mg/L) de cromo hexavalente en agua subterránea el cual se basa en los límites máximos permisibles (de acuerdo con la EPA).

Dicho objetivo fue alcanzado en el transcurso de 18 meses, a partir de la primera inyección del fluido. Un fenómeno muy importante que se identificó en esta región del Estado de México fue que debido a las fuertes lluvias del año en el que se implementó, los niveles del agua subterránea se mantuvieron casi a nivel de la superficie por un intervalo de tiempo largo; lo que trajo como consecuencia que esos estratos de suelo saturado también se remediaron y finalmente los niveles de cromo hexavalente, tanto en agua como en suelo, estuvieron por debajo de los límites de cuantificación del método analítico utilizado.

La bioremediación anaeróbica del cromo hexavalente soluble distribuido en el agua subterránea somera del terreno puede ser explicada como un proceso físico, químico y biológico en donde por mecanismos físicos de inyección de un fluido, se estimula la generación de una población microbacteriana en un ambiente reductor (la melaza es el alimento de la población microbacteriana); que ante la presencia de sulfato ferroso en la mezcla subterránea precipita en forma de hidróxido crómico, el cual es insoluble, precipita y es de baja toxicidad.



## Bibliografía

- Nyer, Evan K. et.al., 2001, In Situ Treatment Technology, Second Edition. CRC Press Inc., 536 p.
- Suthersan, Suthan, 1997, Remediation Engineering, CRC Press Inc., 362 p.
- Suthersan, Suthan, 2002, Natural Enhance Remediation Systems. CRC Press Inc., 419

### INDICE DE ANUNCIANTES

ADS MEXICANA	77
AKZO NOBEL	69
AMECO	73
AMSU	23
ASTRALLOY	1
AUSTIN BACIS	79
BOART LONGYEAR	49
CITLAND	77
COMINSA	13
CUMMINS CD POWER RENT	56-57
CONSTRUMAC	69
CORPORACION AMBIENTAL	59
DEUTZ REFACCIONES	55
DRILAR CO	34-35
DYNO NOBEL	4A. DE FORROS
EAGLE BURGMANN	31
EMERSON PROCESS MANAGEMENT	47
ENERGOLD	67
FLSMIDTH	39
GOLD CORP. MEXICO	63
GOODYEAR	53
GRAINGER	19
GRUPO CONDUMEX	29
GRUPO MEXICO	33
ITT WATER	88
MARTIN ENGINEERING	75
METSO MINERALS	2
MULTILANTAS GRIMALDI	45
NEUMATICOS ESPECIALES	55
ORICORP COMERCIAL	2A. FORROS
OTTOMOTORES	41
OUTOTEC	65
PANALYTICAL	37
PARTS SERVICE SUPPLY	13
PROVEEDORA MINERA IMG	41
QUIMICA TEUTON	27
SANDVIK MINING	3A. FORROS
SCHULUMBERGER	6
SHERWIN WILLIAMS	43
SEW EURODRIVE	21
SM CYCLO	15
SULLIVAN	17
TECHINT	71
TRIASO	37
VALLEN	24-25
VYSISIA	61
WATSON MARLOW	51
XPLOR	73

## 07

XXIX Convención Internacional de Minería

### A Profundidad

## 12

Cinética de lixiviación en la extracción de hierro en una arcilla caolinitica usando ácido gálico.

Por: *Claudia Verónica Reyes Guzman, Francisco Raúl Carrillo Pedroza y Antonia Martínez Luevanos*

## 26

Cinética de recuperación de oro y plata por medio de cianuración oxidante a presión y temperaturas moderadas.

Por *Dr. José R. Parga Torres, Dr. Guillermo González Muzquiz, M.C. Gabriela Figueroa V., M.C. Hayde Góngora y Dr. Jesús L. Valenzuela G.*

## 44

Remediación "In situ" de agua subterránea contaminada con cromo hexavalente.

Por: *Jerjes Pantoja I., Hugo Mújica Sánchez y Mark Wagner*

## 54

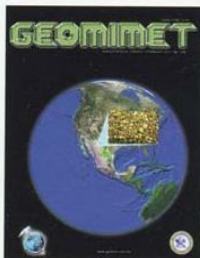
### Notas Geomimet

- *GeoInfoMex, nuevo sistema de información y consulta del SGM*
- *Día del Geólogo*
- *El Comité de Damas de la AIMMGGM acude a asilo de ancianos*
- *Comida de los 70's Plus*

## 68

### Nuestra Asociación

- *Cuarta Reunión CDN bienio 2010-2012*
- *Nuestros Distritos*



Imágenes del Servicio Geológico Mexicano



# GEOMIMET

XXXVIII ÉPOCA, ENERO / FEBRERO 2011. No. 289

