

Nuevo equipo de desorción térmica de contaminantes en suelos

A new device for thermal desorption of soil pollutants

Pablo Pizarro Medina^{1*}, María José Sierra Herraiz^{2*}, Manuel Rodríguez Rastrero², Cristina Cabrales García², Rocío Rodríguez Pérez², Sandra Velado Renovel², Miguel Mas Jiménez², Nerea Arévalo Martín² y Rocío Millán Gómez^{2*}

Resumen

Se presentan en este artículo las características básicas de diseño y los primeros resultados operativos de un dispositivo de baja potencia para la desorción térmica de contaminantes en suelos mediante campos electromagnéticos, susceptible de utilización in situ en condiciones de baja temperatura, lo que permite preservar las características morfológicas y físico-químicas de los suelos tratados. Esto posibilita la generación de sinergias entre las técnicas de descontaminación de suelos basadas en la desorción térmica y las basadas en técnicas biológicas (biorrecuperación y fitorrecuperación). Los ensayos preliminares llevados a cabo con el prototipo diseñado han demostrado una importante capacidad de desorción de hidrocarburos en rangos de temperatura inferiores a 170 °C.

Palabras clave

Descontaminación de suelos, dispositivo de baja potencia, campos electromagnéticos, sinergias desorción-biorremediación.

Abstract

This paper presents the basic design features and first operational results of a low-power device for thermal desorption of soil pollutants by means of electromagnetic fields. Such device is susceptible of in-situ implementation under low-temperature conditions, in order to preserve the morphological and physico-chemical soil original characteristics. This enables the generation of synergies between soil decontamination techniques based on thermal desorption and biological techniques (bio and phytoremediation). The preliminary tests carried out with the prototype designed have demonstrated a significant desorption capacity for hydrocarbons in soils within temperature ranges lower than 170 °C.

Keywords

Soil decontamination, low-power device, electromagnetic fields, desorption-bioremediation synergies.

Recibido / received: 6.12.2016. Aceptado / accepted: 28.02.2017.

¹Green Oil Energy Systems SLP. Travesía de la Cruz Verde 2. 45002 Toledo.

²Unidad de conservación y recuperación de suelos. Departamento de Medio Ambiente. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat). Avda. Complutense, 40. 28040 Madrid.

*Autores para correspondencia / corresponding authors: Pablo Pizarro Medina (pablopizarro.ingenieria@gmail.com); María José Sierra Herraiz (mj.sierra@ciemat.es), y Rocío Millán Gómez (rocio.millan@ciemat.es).



Foto: Thananya Apiromyanon / Shutterstock.

Introducción

Técnicas de descontaminación de suelos por desorción térmica

La contaminación de los suelos y, específicamente, la originada por contaminantes orgánicos y por metales pesados constituye un problema ambiental de primer orden que requiere el desarrollo de estrategias de descontaminación que aúnen eficiencia, bajos costes tecnológicos y de operación y sostenibilidad ambiental.

Actualmente, el abanico de técnicas para el tratamiento de suelos contaminados es muy amplio y su aplicación depende de múltiples factores, tales como las características del suelo, contaminantes implicados, eficacia esperada, coste económico, viabilidad, generación y tratamiento de residuos generables y tiempo requerido para ello. Existen técnicas de contención, que generalmente aplican barreras físicas en el suelo, técnicas de confinamiento para reducir la movilidad de los contaminantes, así como técnicas de descontaminación, que buscan disminuir o eliminar la concentración de los contaminantes. Entre estas últimas, se encuentra la técnica de desorción térmica mediante campos electromagnéticos, objeto de estudio del presente trabajo.

La desorción térmica se fundamenta en la separación física suelo-contaminante, térmicamente inducida, ya sea por calentamiento directo o indirecto, y se puede aplicar de forma *in situ* y de forma *ex situ*. Con carácter general, las técnicas desarrolladas *in situ* actúan sobre los contaminantes en el lugar en el que se localizan los suelos afectados. Los tratamientos *ex situ*, sin embargo, requieren la excavación previa del suelo para su posterior tratamiento, ya sea en el mismo lugar (tratamiento *on site*) o en instalaciones externas que requieren, además, el transporte del suelo contaminado (tratamiento *off site*) (Ortiz, 2007). Tanto el RD 9/2005 como la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados enfatizan la prioridad de las técnicas *in situ* siempre que sean viables.

En la desorción térmica tradicional la forma *in situ* consiste en la transferencia de calor desde elementos calentadores colocados en el suelo, generalmente, a diferentes profundidades. Por otra parte, el tratamiento *ex situ* consiste en someter el suelo a diferentes rangos de temperatura de volatilización dentro de un horno, por ejemplo, a rangos de baja temperatura (90-320 °C) y/o a rangos de alta tempe-

ratura (320-560 °C) (FRTR, 2016). El calentamiento dentro del horno puede ser convectivo, conductivo o radiactivo. El suelo se calienta hasta llegar a volatilizar el agua y los contaminantes presentes son transferidos a una corriente de gas, donde puedan ser tratados más fácilmente (EPA, 2011).

La desorción térmica está enfocada principalmente a la descontaminación de suelos con compuestos orgánicos volátiles no halogenados, semivolátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCB, pesticidas, además de algunos contaminantes inorgánicos por sus especiales propiedades con respecto a la volatilidad, como mercurio, plomo, cadmio o arsénico (Marín San Pedro, 2010; Sierra *et al*, 2016).

Esta tecnología, especialmente la desarrollada a altas temperaturas, tiene una gran eficacia de eliminación del contaminante y los tiempos requeridos para la remediación del suelo son muy cortos, lo que justifica su empleo en determinados casos. Sin embargo, los costes energéticos para su aplicación de forma tradicional pueden llegar a ser muy altos (Falciglia *et al*, 2011; Yu *et al*, 2016). Los procesos a altas temperaturas implican la combustión de los contaminantes orgánicos en el me-

dio edáfico, lo que provoca, a su vez, la combustión de la materia orgánica, dificultando y retardando la regeneración del suelo.

En condiciones de baja temperatura, el suelo tratado mantiene, una vez finalizado el tratamiento de desorción, la capacidad de soportar una futura actividad biológica (FRTR, 2016).

En el caso de la desorción térmica de suelos contaminados por mercurio, los rangos de baja temperatura presentan especial interés; distintas experiencias indican una importante volatilización en los suelos y residuos para temperaturas de trabajo del orden de 160-180 °C (Mendoza *et al*, 2005). Ensayos de desorción térmica de mercurio, utilizando un horno solar a escala piloto, han sido aplicados a diferentes tipos de suelos, estableciendo la temperatura necesaria para asegurar la funcionalidad de estos suelos y evitar el intercambio de este metal con los otros compartimentos ambientales (Sierra *et al*, 2016).

Adicionalmente, en el caso de la desorción térmica *ex situ*, a los costes energéticos han de sumarse los derivados de las labores de excavación y transporte del suelo contaminado y los potenciales riesgos de una contaminación no deseada en caso de accidente en el traslado. Todo ello puede limitar notablemente la sostenibilidad económica de dichas técnicas, lo que puede implicar el aplazamiento de la descontaminación de los suelos afectados, a la espera de nuevas técnicas y procesos más económicos.

La excavación de los suelos implica, además, la pérdida de su morfología original, incompatible con el mantenimiento de las funciones y servicios ambientales que proporciona este recurso natural.

La sostenibilidad, tanto económica como ambiental, constituye, por tanto, un objetivo básico de las tecnologías que aplicar en la descontaminación de suelos.

Distintos investigadores en los últimos años están estudiando, a escala de laboratorio, el calentamiento mediante campos electromagnéticos para la desorción de contaminantes en suelos, en concreto en el rango de las microondas, consiguiendo altos rendimientos para la remediación de matrices contaminadas por orgánicos (Pereira *et al*, 2014; Falciglia *et al*, 2016a).

Microondas es un término aplicado de forma general a aquellas longitudes de onda comprendidas entre las de la radiación infrarroja y las ondas de radio (de entre 30 centímetros a 1 milímetro), y en el rango de frecuencias de 300 MHz a 300 GHz. En el caso de la radiación por microondas, la penetración, dentro del suelo contaminado, del campo eléctrico alterno generado, induce la rotación de los dipolos de sustancias polares o semipolares que constituyen los minerales del suelo o que están presentes en su superficie o en el espacio circundante, como el agua y los contaminantes de hidrocarburos (Falciglia *et al*, 2016a).

Las principales ventajas del empleo de microondas son la rapidez con la que el tratamiento por microondas calienta las matrices contaminadas, en comparación con la remediación térmica convencional (Robinson *et al*, 2009), así como la posibilidad de alcanzar un calentamiento homogéneo (Tyagi y Lo, 2013). Una descontaminación completa de los suelos es posible con altas potencias de microondas o tiempos de residencia largos (Robinson *et al*, 2009).

El principal interés en la aplicación ambiental es la mayor capacidad de las microondas para calentar muy rápidamente la matriz contaminada (es decir, suelos) en comparación con la remediación térmica convencional (Falciglia *et al*, 2016a), lo que puede permitir ahorros significativos de energía, así como emplear equipos más manejables, susceptibles de ser utilizados *in situ*.

Con carácter general, se trata de una tecnología innovadora, que requiere estudios específicos y ensayos experimentales destinados a optimizar su posterior aplicación práctica de la forma más económica y sostenible posible.

En este sentido surge este proyecto, fruto del convenio de colaboración de la empresa Green Oil Energy Systems SLP, y la Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos del Departamento de Medio Ambiente del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), que presenta el diseño y la construcción del prototipo de un equipo de desorción térmica de contaminantes volátiles en suelos mediante campos electromagnéticos.

Sus principales condicionantes de diseño responden a los siguientes criterios básicos:

–Desarrollo tecnológico de bajo coste.

–Tratamiento en rangos de baja temperatura, con bajo consumo energético.

–Susceptible de alimentación por energías renovables (solar, eólica, biomasa residual, y otras).

–Posibilidad de tratamiento *in situ* del suelo contaminado, lo que permite:

- Limitar los costes operativos.
- Minimizar el impacto ambiental sobre el suelo, conservando su estructura original y sus propiedades fisicoquímicas.

–Posibilidad de establecer sinergias mediante la aplicación, posterior a la desorción, de técnicas biológicas de remediación de suelos: biorrecuperación y fitorrecuperación.

Como paso preliminar para valorar la eficiencia del equipo, se han llevado a cabo diversos ensayos de desorción de contaminantes orgánicos (fuel) sobre la base de un suelo arenoso artificialmente contaminado. La Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos del Departamento de Medio Ambiente del Ciemat dispone de amplia experiencia en el estudio y evaluación de suelos con contaminantes orgánicos tales como hidrocarburos e inorgánicos tales como el mercurio.

Características del equipo de desorción térmica y descripción básica de su funcionamiento

El equipo generador de campos electromagnéticos, presentado en este trabajo, corresponde a un diseño original cuyas características técnicas básicas se presentan a continuación:

–Rango de trabajo a 2,54 GHz.

–Potencia máxima 750 W (ampliable).

–Magnetrón de antena recta.

–Refrigeración forzada por aire.

–Regulación de potencia de 50 a 230 V.

–Cuerno de distribución de tronco piramidal (pendiente altura y relación de superficies).

–Distribución de ondas por choque sobre distribuidor fijo.

–Profundidad inicial de trabajo 25-30 cm (ampliable).

–Superficie de contacto (de tratamiento) 35 x 35 cm (ampliable).

–Cámara móvil adyacente de amplificación de ondas.

En el diseño del equipo, se ha hecho especial hincapié en la optimización y dimensionamiento del cuerno transmisor de microondas. Este cuenta con una cámara móvil adyacente para su amplificación, lo que se prevé genere importantes ahorros energéticos.

El equipo cuenta con las siguientes unidades, tal como se recoge en la figura 1:

1. Unidad de regulación de potencia, para la optimización del consumo eléctrico y del rendimiento.

2. Unidad transformadora de generación de alto voltaje.

3. Unidad generadora, emisora y distribuidora de campos electromagnéticos en forma de microondas.

4. Unidad generadora de aspiración / vacío.

5. Unidades de filtración (carbón activo, resinas intercambiadoras, otros).

6. Unidad de condensación.

7. Unidad de adquisición de datos y control.

A los anteriores elementos, se añade, en esta fase inicial de trabajo y tal como se indica en la figura 1, un depósito para la realización de ensayos preliminares *ex situ*, monitorizado para un seguimiento preciso de la temperatura, tanto respecto a su evolución temporal como a su distribución espacial dentro de la masa del suelo.

Por ello, se han adaptado las características técnicas de acuerdo a la penetración de las ondas electromagnéticas dentro del suelo, analizando la variación espacio-temporal de la temperatura generada, ya que los patrones desiguales de la temperatura en el suelo son otra problemática importante que tratar.

El equipo está, por tanto, diseñado para trabajar tanto *in situ* como *ex situ*.

Una vez seleccionada la potencia de trabajo en función de las condiciones ambientales, tipo de suelo y contaminante, se activa el equipo, y la emisión de microondas comienza a distribuirse a través de cuerno o campana de distribución. Esta posee una cámara móvil adyacente que permite la amplificación de las ondas ajustando el volumen de la cámara, con objeto de favorecer el ahorro energético.

Las microondas penetran en la masa del suelo contaminado elevando su temperatura, lo que se pretende que

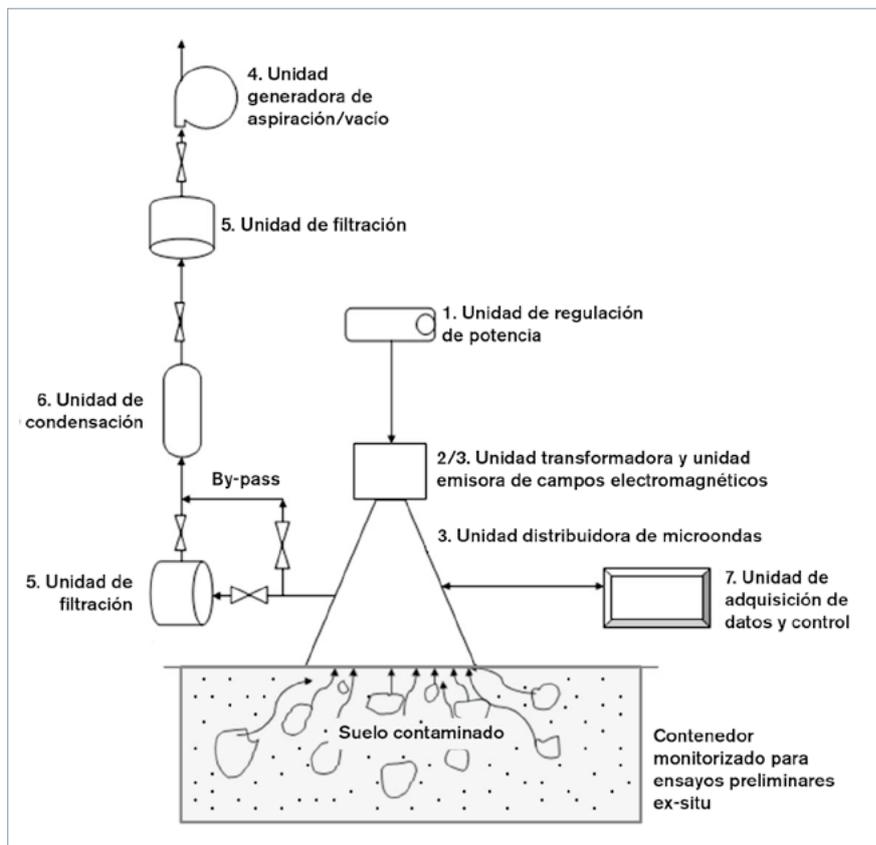


Figura 1. Esquema básico del equipo de desorción.

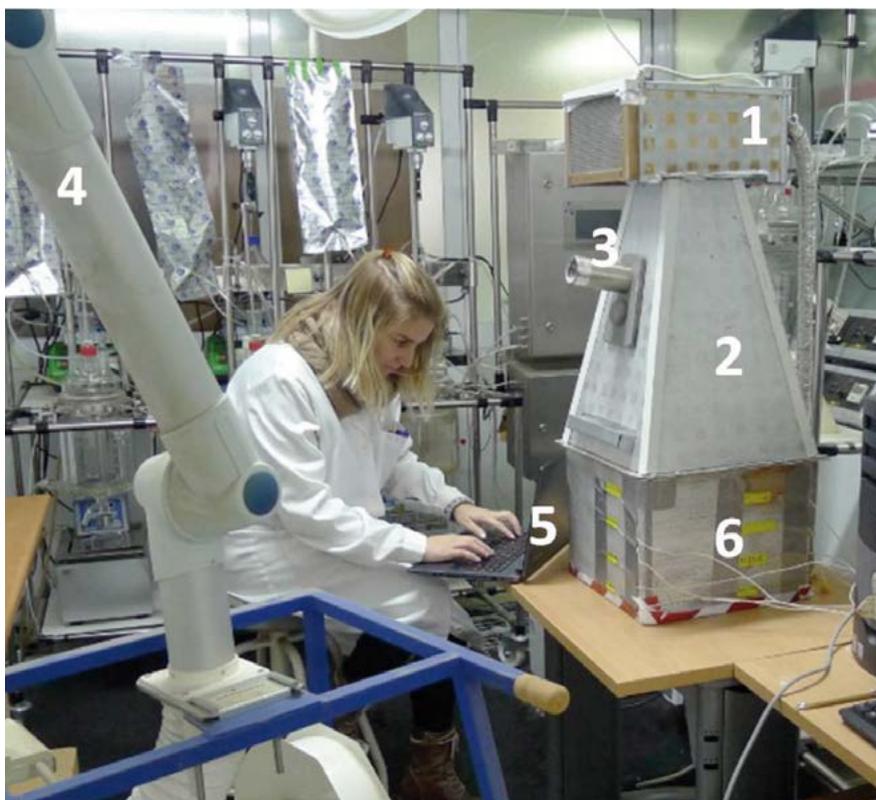


Figura 2. Fase de montaje del prototipo en los laboratorios de la Unidad de Conservación y Recuperación de suelos del Ciemat: 1) regulador de potencia y tubo de conexión al emisor; 2) cuerno distribuidor de ondas; 3) cámara móvil adyacente de amplificación de ondas; 4) equipo de aspiración y filtros; 5) unidad de adquisición de datos y control, y 6) contenedor monitorizado para ensayo preliminar *ex situ*.

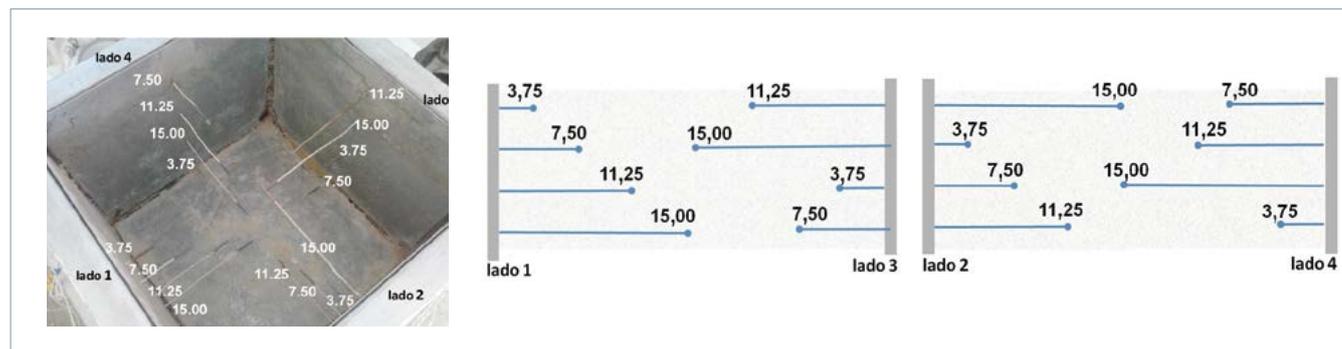


Figura 3. Imagen de la instalación de monitorización de temperatura en el depósito, previa al relleno con suelo contaminado y esquema de su distribución espacial. Las cifras reflejan la distancia en cm desde la punta del termopar hasta la pared del depósito.



Figura 4. Llenado del depósito monitorizado con el suelo arenoso artificialmente contaminado.

tenga lugar de la manera más homogénea posible. Una vez alcanzada la temperatura de volatilización, se activa la unidad de aspiración generando un vacío en la cámara de distribución, que está en contacto con el terreno, lo que provoca una caída de presión y favorece la desorción a menores temperaturas.

La campana posee una rejilla regulable que permite la generación de una corriente ascendente y el barrido de los compuestos volatilizados, que son transferidos al filtro para su inmovilización o al condensador para su recuperación. La figura 2 muestra una imagen del prototipo del equipo de desorción.

Ensayo preliminar de desorción térmica de hidrocarburos: descripción y resultados

El ensayo de desorción térmica realizado mediante el prototipo descrito se ha llevado a cabo sobre una muestra de suelo artificialmente contaminado por hidrocarburos (gasóleo) en condiciones de ensayo *ex situ*, y atendiendo a dos factores de control: por un lado, la evolución térmica de la masa de suelo contaminado, y, por otra, la variación de la concentración del contaminante

(hidrocarburos totales del petróleo, o TPH) en relación con el calentamiento y el tiempo de operación.

La monitorización de la temperatura se ha llevado a cabo mediante una distribución de un total de 16 termopares, que permiten el control de la masa del suelo tanto en profundidad como en distancia con respecto a las paredes del depósito.

El esquema de monitorización de la temperatura se muestra seguidamente (figura 3).

Características del suelo objeto de desorción

Los ensayos experimentales mostrados en este trabajo han tenido en cuenta los factores clave en esta tecnología, de forma que distintas características del suelo, como la textura y la humedad, pueden resultar determinantes en los rendimientos de desorción térmica. Así, se ha considerado que los suelos arcillosos de plasticidad alta tienen menor rendimiento, debido a que la adsorción de los contaminantes es mayor por su tendencia a agregarse y, en los tratamientos *ex situ*, por su mayor adherencia sobre las paredes del horno de desorción; el contenido de humedad y la presencia de materia orgánica también pueden reducir el rendimiento del proceso por su alta afinidad con los contaminantes (Marín San Pedro, 2010).

De acuerdo con Falciglia *et al* (2016a), en general, el suelo arenoso resulta más permeable al calentamiento por microondas que el de carácter arcilloso, y se encuentran mayores valores de campo eléctrico y temperatura del suelo para el suelo arenoso con menor contenido de agua.

Respecto a la relación hidrocarburo/suelo establecida para obtener el material artificialmente contaminado, se ha

considerado que la concentración de hidrocarburos en el suelo que tratar no ha de superar el denominado *límite menor de explosividad* (LEL) asociado a las emisiones de gases durante tratamientos *ex situ* (Harries *et al*, 2004), lo que implica que la concentración máxima de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) oscilará entre el 1% y el 3%.

Por tanto, en esta primera fase experimental del proyecto, se ha seleccionado una masa de suelo de textura arenosa, suficiente para completar el depósito monitorizado hasta una profundidad de unos 25 cm, con muy escaso contenido en materia orgánica, y a la que se ha añadido una proporción de gasóleo no superior a 5.000 mg.kg⁻¹ (equivalente al 0,5% en relación peso/peso).

El suelo modelo empleado corresponde a un material de textura gruesa comúnmente denominado “arena de río lavada”, con porcentajes de arena, limo y arcilla del 91%, 6% y el 3%, respectivamente. El porcentaje de materia orgánica es del 0,2%.

El pH es ligeramente básico (7,9) y la conductividad eléctrica, baja (25 µS.cm⁻¹, en relación 1:5), lo que excluye la presencia significativa de sales solubles. La densidad aparente del suelo objeto de ensayo es de 1,46 g.cm⁻³, y alcanza su capacidad de campo con un 16% de humedad.

El ensayo se ha llevado a cabo con dos condiciones extremas de humedad: suelo seco (0,2%) y suelo a capacidad de campo.

Tras la caracterización del suelo, se llevó a cabo la adición del contaminante sobre una masa de unos 35 kg de suelo, en una proporción que garantizara un contenido en TPH no inferior a 3.000 mg.kg⁻¹. Inmediatamente, se procedió a un muestreo por triplicado con objeto de realizar la medición de

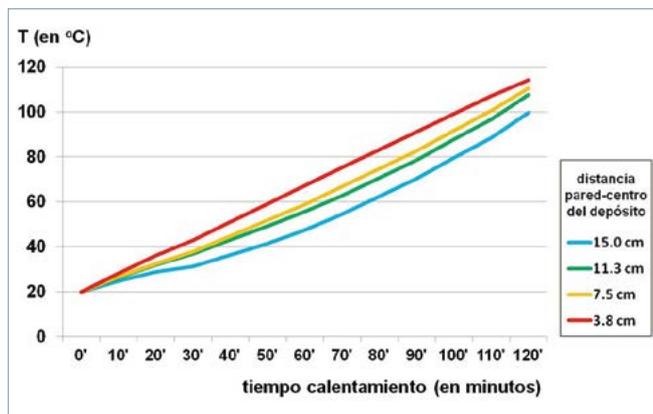


Figura 5. Evolución de la temperatura en la masa de suelo seco, según distancias horizontales desde las paredes del depósito.

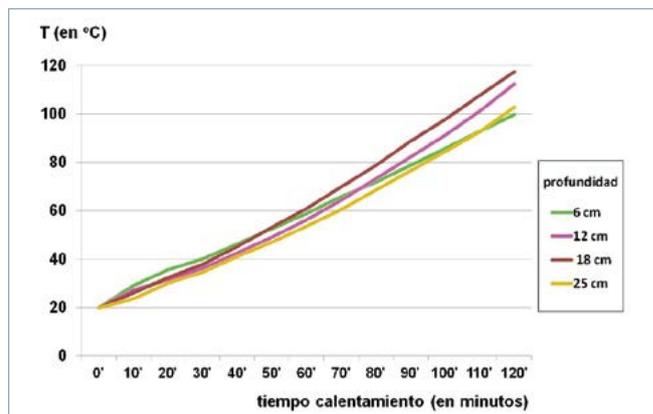


Figura 6. Evolución de la temperatura en la masa de suelo seco, según cuatro niveles de profundidad.

TPH en la masa de suelo (como valor inicial del ensayo) y, por otra parte, se rellenó el depósito para iniciar el ensayo *ex situ* (figura 4).

El valor de TPH promedio medido en la masa de suelo fue 3.193 ± 153 mg.kg⁻¹, y se ha considerado el valor inicial de hidrocarburos en suelo en los posteriores ensayos de desorción.

Resultados

Ensayo preliminar de desorción de hidrocarburos en el suelo contaminado

El suelo objeto de desorción ha sido sometido a calentamiento a través de diversos ensayos de dos horas de duración. Se procedió, en primer lugar a evaluar el incremento de temperatura de la masa de suelo monitorizada en dos aspectos: analizando la influencia del propio diseño del depósito donde queda confinada la masa del suelo (figura 5) y la eficacia de la penetración de las microondas en dicha masa, comparando el calentamiento en cuatro distintas profundidades (figura 6).

Esta fase de ensayos ha permitido cuantificar los tiempos requeridos para alcanzar determinadas temperaturas y su grado de homogeneidad en la masa del suelo.

De acuerdo con la figura, es apreciable, con carácter general en la masa del suelo, un incremento de temperatura notablemente regular en función del tiempo de operación del emisor de microondas, así como cierta influencia en dicho calentamiento por parte de las paredes del depósito, lo que se asocia a un aumento de la temperatura inicialmente más rápido en la parte del suelo más próxima a dichas paredes (datos a 3,8 cm y 7,5 cm) efecto que, sin

embargo, tiende a anularse al final del ensayo.

Un aspecto relevante de los ensayos consistió en evaluar la homogeneidad del calentamiento de la masa del suelo tratado en diferentes profundidades, lo que ha permitido evaluar la capacidad del equipo para ofrecer un calentamiento profundo y homogéneo de la masa del suelo, factor clave en su aplicabilidad para posteriores tratamientos *in situ*. Los resultados del ensayo se muestran en la figura 6.

Los datos obtenidos reflejan que en el entorno de dos horas de operación del equipo, en condiciones de suelo seco, se alcanzan temperaturas superiores a los 100°C.

La futura aplicación en condiciones de campo del equipo de desorción diseñado ha exigido la realización de ensayos en condiciones de mayor humedad. Para ello, se saturó el suelo en las proporciones citadas (16% de humedad) y se realizaron ensayos de evolución térmica equivalentes a los anteriores, y se obtuvieron los resultados que se muestran en las figuras 7 y 8.

En ambos casos, y en relación con los resultados obtenidos sobre suelo seco, son evidentes las diferencias en las temperaturas alcanzadas en las dos horas de tratamiento, así como una mayor heterogeneidad en el calentamiento de la masa del suelo, tanto en relación con las diferentes distancias a las paredes del depósito, como en las diferentes profundidades. El ensayo fue continuado hasta alcanzar de forma general temperaturas próximas a los 100 °C, para lo que fueron necesarias en total 4 horas de tratamiento.

La eficacia del calentamiento alcanzado en la desorción del contaminante fue evaluada mediante la realización de muestreos de seguimiento sobre la masa de suelo contenida en el depósito. Los muestreos fueron llevados a cabo cada 2 horas de operación del equipo, mediante mezcla compuesta de 3 puntos tomados con sonda a una profundidad de 15-25 cm (figura 9a). Inmediatamente, y previa molienda de la muestra, fue realizada la medición de TPH mediante un equipo de infrarrojos (figura 9b).

Sobre la masa de suelo seco se llevó a cabo un tratamiento de desorción térmica más prolongado (8 horas), con medición, cada 2 horas, de la concentración de TPH (mg.kg⁻¹) para un valor promedio de tres muestras, así como de la temperatura de la masa del suelo, para un promedio de 16 valores termométricos. La figura 10 muestra la correlación entre ambas variables.

El contraste de regresión realizado muestra que el 74% de la variabilidad del contenido de TPH puede atribuirse a una relación lineal negativa con la temperatura. Esto indica una elevada capacidad de desorción del equipo en condiciones de baja temperatura. En promedio, la desorción obtenida en las condiciones del ensayo (8 horas de tratamiento hasta alcanzar una temperatura promedio de 163 °C) ha supuesto una disminución del 69% con respecto a la carga contaminante inicial, siendo, en las dos primeras horas de tratamiento (temperatura promedio de 90 °C), del 20% con respecto a la situación inicial.

Cabe señalar que el conjunto de ensayos realizados corresponde a tem-

peraturas inferiores al rango de ebullición de un diésel estándar (200-338 °C) (Harries *et al*, 2004).

Conclusiones y previsiones de desarrollo del equipo y futuros ensayos

El prototipo de equipo de desorción térmica presentado en este estudio ha sido diseñado y construido para desarrollar tratamientos de bajo coste tecnológico y energético, y es susceptible de alimentación por energías renovables y apto para tratamientos *in situ*.

A la vista de los resultados preliminares obtenidos, el prototipo ensayado ha demostrado una importante capacidad de desorción de hidrocarburos en rangos de baja temperatura, inferiores a 170 °C. Cabe esperar, sin embargo, que la eficacia relativa de la desorción disminuya al aumentar los tiempos de tratamiento, como consecuencia de la presencia relativamente mayor en el suelo de compuestos orgánicos recalcitrantes. En este aspecto, es en el que

el tratamiento propuesto plantea diferencias clave con los habitualmente desarrollados: estos últimos, con objeto de avanzar en la descontaminación, pasan por someter a la matriz (suelo) a rangos de temperatura más elevados, obteniendo una descontaminación completa del suelo; no obstante, tales tratamientos exigen altos costes energéticos y conllevan una completa alteración morfológica (por excavación) y fisicoquímica (por combustión de la materia orgánica y alteraciones mineralógicas) respecto a las condiciones originales del suelo tratado.

El tratamiento *in situ* a baja temperatura que este proyecto persigue permite minimizar el impacto de la descontaminación sobre el medio edáfico tratado; en concreto, sobre sus condiciones morfológicas y fisicoquímicas originales, posibilitando la generación de sinergias entre la técnica de desorción térmica y las técnicas biológicas de remediación de suelos. Dichas sinergias se basan, fundamentalmente,

en que la desorción térmica a baja temperatura permite la eliminación rápida de gran parte del contaminante sin alterar significativamente las características morfológicas y fisicoquímicas del suelo, de forma que los posteriores tratamientos biológicos (biorremediación y/o fitorremediación) puedan ser aplicados en óptimas condiciones.

En la actualidad, el equipo de trabajo de Green Oil Energy Systems SLP y la Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos del Departamento de Medio Ambiente del Ciemat desarrollan diversas tareas destinadas a la optimización técnica del prototipo en desarrollo, a incrementar el conocimiento de los procesos de desorción de suelos a baja temperatura y al análisis de las sinergias de este tipo de desorción térmica con técnicas de biorremediación y fitorremediación.

En concreto, las tareas de optimización de los parámetros de diseño del equipo van dirigidas a los siguientes objetivos:

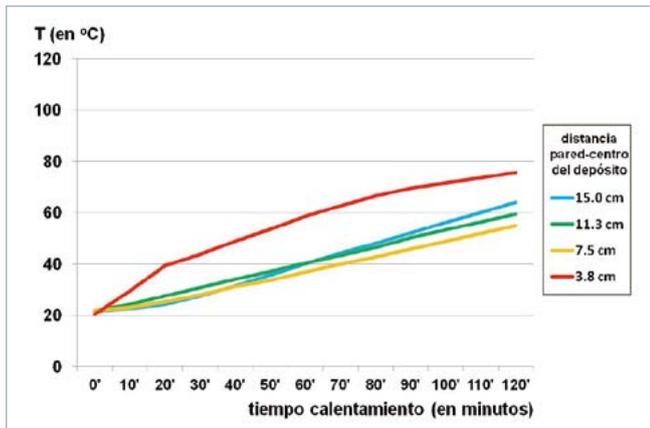


Figura 7. Evolución de la temperatura en la masa de suelo a capacidad de campo, según distancias horizontales desde las paredes del depósito.

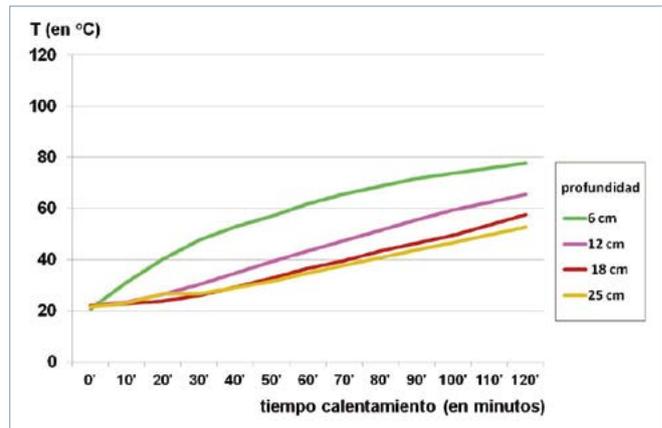


Figura 8. Evolución de la temperatura en la masa de suelo a capacidad de campo, según cuatro niveles de profundidad.



Figura 9. Muestreo mediante barrena del suelo tratado y medición de TPH (analizador de infrarrojos, modelo Wilks/InfraCal2).

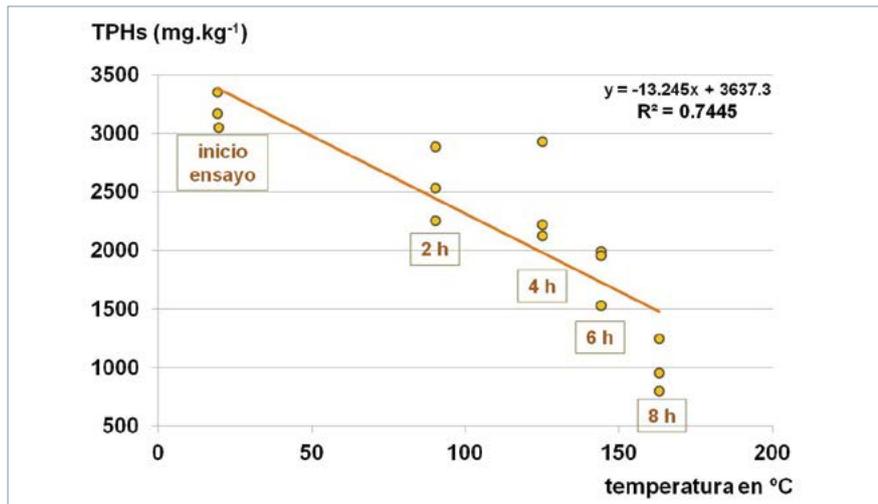


Figura 10. Evolución del contenido en TPH a lo largo del ensayo de 8 horas, en función de la temperatura alcanzada y según tiempos de tratamiento.

- Optimización de la amplificación de ondas mediante la cámara móvil adyacente, de modo que se alcance un adecuado calentamiento del suelo con menores tiempos y costes.

- Mejora de las técnicas de generación de vacío, lo que permitiría desorber los contaminantes a menores temperaturas.

- Diversos trabajos para el desarrollo de un equipo a mayor escala, portable, para tratamiento *in situ* de suelos contaminados y para el desarrollo de soluciones técnicas para su conexión a fuentes de energía renovables. El modelo en desarrollo para tratamientos en campo permitirá establecer con precisión los costes por unidad de suelo descontaminado.

El seguimiento de los procesos de desorción de suelos a baja temperatura se desarrollará y ampliará en los siguientes aspectos:

- En paralelo al seguimiento de la evolución de la desorción de hidrocarburos en suelos, se llevarán a cabo ensayos equivalentes de desorción de suelos contaminados por mercurio.

- Los factores limitantes de humedad y textura serán estudiados específicamente: dado que han sido patentes las diferencias en el calentamiento según el contenido en humedad del suelo, se llevarán a cabo series de seguimiento de la evolución térmica en condiciones distintas de humedad. Por otra parte, se están realizando ensayos preliminares de evolución térmica con suelos de texturas más finas y contenidos mayores en materia orgánica, así

como otros parámetros fisicoquímicos.

Las tareas en desarrollo destinadas a favorecer las sinergias con las técnicas biológicas de remediación van dirigidas a la determinación de la temperatura de tratamiento en la que se consigue la máxima desorción de contaminantes con la menor afección a bioestimulación, evaluada mediante el seguimiento respirométrico y microbiológico de series de muestras obtenidas en diversos tiempos y temperaturas de tratamiento.

Específicamente, en el caso de la desorción de mercurio en suelos, la aplicación posterior de plantas fitoextractoras se presenta como la técnica complementaria de mayor interés, tal como se propone en un reciente trabajo de la Unidad de Conservación y Recuperación de Suelos del Departamento de Medio Ambiente del Ciemat (Sierra *et al*, 2016).

Queda patente que el buen desarrollo del conjunto de actividades anteriormente expuesto implica la creación y el mantenimiento de equipos de trabajo multidisciplinarios, y es, asimismo, clave la colaboración con instituciones públicas y privadas.

Bibliografía

Anderson W (1993). Innovative site remediation technology. Thermal Desorption, Volume 6. Washington, D.C. U.S Academy of Environmental Engineers.

Barba A, Aciero D, D'Amore M (2011). Use of microwaves for in-situ removal of pollutant compounds from solid matrices. Journal of hazardous materials 207-208:128-35.

EPA-Environmental Protection Agency (2011). Thermal Treatment Technologies, Information Bulletin, Publication 1402. <http://www.epa.vic.gov.au/~media/publications/1402.pdf> [7-11-2016].

Falciglia PP, Scandura P, Vagliasindi F (2016a). Modelling of in situ microwave heating of hydrocarbon-polluted soils: Influence of soil properties and operating conditions on electric field variation and temperature profiles. Journal of Geochemical Exploration, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.005>.

Falciglia PP, Maddalena R, Mancuso G, Vagliasindi F (2016b). Lab-scale investigation on remediation of diesel-contaminated aquifer using microwave energy. Journal of Environmental Management 167:196-205.

Falciglia PP, Bonifacio A, Federico GA, Vagliasindi (2016). An Overview on Microwave Heating Application for Hydrocarbon-contaminated Soil and Groundwater Remediation. Oil Gas Res 2:110. doi:10.4172/ogr.1000110.

Falciglia PP, Giustra MC, Vagliasindi FGA (2011). Influence of soil texture on contaminant adsorption capacity and removal efficiency in ex situ remediation of diesel polluted soil by thermal desorption. Chem. Ecol. 27 (1), 119-130.

FRTR/Federal Remediation Technologies Roundtable (2016). Remediation Technologies, Screening Matrix and Reference Guide; Version 4.0. Web activa: última modificación 17/05/2016. <https://frtr.gov>.

Harries N, Beck P, Sweeney R (2004). Remediation trial using low temperature thermal desorption to treat hydrocarbon contaminated soil. Technology Demonstration Project Report: TDP1. Contaminated Land: Applications in Real Environments (CL:AIRE), London UK.

Marín San Pedro AF (2010). Tesis doctoral: Optimización de los tratamientos de desorción térmica de suelos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Mendoza JL, Navarro A, Viladevall M, Doménech LM (2005). Caracterización y tratamiento térmico de suelos contaminados por mercurio. En: J.A. López-Geta, J. C. Rubio y M. Martín Machuca (Eds.), VI Simposio del Agua en Andalucía. IGME, pp. 1077-1088.

Ortiz I, Sanz J, Dorado M, Villar S (2007). Técnicas de Recuperación de Suelos Contaminados. Informe de Vigilancia Tecnológica, 6. Universidad de Alcalá - Dirección General de Universidades e Investigación. Consejería de Educación. Comunidad de Madrid.

Pereira MS, de Ávila Panisset CM, Martins AL, de Sá CHM, de Souza Barrozo MA, Ataíde CH (2014). Microwave treatment of drilled cuttings contaminated by synthetic drilling fluid. Separation and Purification Technologies, 124, 68-73.

Robinson JP, Kingman S, Snape C, Saeid B (2009). Separation of polyaromatic hydrocarbons from contaminated soils using microwave heating. Separation and Purification Technology, 69(3):249-254.

Sierra MJ, Millán R, López FA, Alguacil FJ, Cañadas, I (2016). Sustainable remediation of mercury contaminated soils by thermal desorption. Environ. Sci. Pollut. Res. 23(5): 4898-4907.

Tyagi VK, Lo SL (2013). Microwave irradiation: a sustainable way for sludge treatment and resource recovery. Renew. Sust. Energ. Rev. 18, 288-305.

Yu Y, Liu L, Shao Z, Ju T, Sun B, Benadda B (2016). A soil-column gas chromatography (SCGC) approach to explore the thermal desorption behaviour of hydrocarbons from soils. Environ. Sci. Pollut. Res. 23, 683-690.