

Estrategia de gestión integrada de suelos contaminados en el Perú

Integrated management strategy of contaminated soil in Peru

Walter Díaz¹

RECIBIDO: 29/09/2016 - APROBADO: 25/10/2016

RESUMEN

El Perú es un país rico en recursos naturales, lo cual no está en discusión, pero cuando buscamos la riqueza del recurso suelo, encontramos que es la más baja de América Latina. La relación hombre-suelo en nuestro país, para la producción de alimentos, es baja y limitada, localizada solo en algunas regiones; por ello, es necesario desarrollar una estrategia de gestión integrada del suelo, que parta desde su potencial, su valor económico, ambiental y social, conociendo las posibilidades de uso, a partir de una adecuada zonificación, económica y ecológica, categorizando su relación de uso y ocupación para no generar un conflicto de uso o aprovechamiento, que casi siempre en nuestro país termina en conflictos socioambientales. Por ejemplo, se tienen los suelos contaminados en La Oroya, que en la actualidad es un tema de conflicto legal ambiental que se verá en el proceso de arbitraje contra el Estado peruano ante el Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones (CIADI), por no haber descontaminados los suelos de La Oroya. En el caso de La Oroya Antigua, se tiene la presencia de contaminantes en el suelo, como arsénico, cadmio, plomo, mercurio, antimonio, superando los estándares internacionales; si comparamos solamente el arsénico, supera 393 veces los estándares internacionales. Entonces, nos encontramos ante una problemática que tiene que ser atendida de una manera integral, no solamente por la presencia de los contaminantes en los suelos, sino también para atacar y disminuir, o eliminar, la fuente de generación de los contaminantes. En lo que se refiere a control de la contaminación de agua y aire hemos avanzado, pero se ha descuidado una atención específica a la problemática de suelos contaminados, lo que se aprecia en la falta de una legislación ambiental con relación al suelo y subsuelo, que comprenda desde su fase rocosa a la parte orgánica de los componentes del suelo. Hasta el momento no se ha podido resolver la pregunta: ¿Con qué valores nacionales comparo un suelo para saber si está contaminado?, porque no existen los valores ni límites máximos permisibles ni estándares de calidad ambiental, tal vacío requiere una pronta solución de parte del Ministerio del Ambiente; entonces todo ello nos obliga a pensar en una gestión integrada de suelos, que abarque desde su evaluación, planificación de uso, ordenamiento territorial y estrategia de descontaminación que se deberá aplicar para un ambiente seguro de calidad ambiental en nuestro país.

Palabras clave: Contaminación de suelos, gestión de suelos, evaluación de riesgo, descontaminación de suelos, estándar de calidad ambiental de suelo.

ABSTRACT

Peru is a country rich in natural resources, which is not at issue but when we seek the richness of the soil resource is found that the lowest in Latin America, the relationship between man and land in our country for food production is low and limited, located only in some regions, so it is necessary to develop a strategy for integrated management of land, which starts from the ground potential, its economic, environmental and social knowledge of the possibilities, from a proper zoning, economic and ecological, categorizing their relationship to occupancy to avoid a conflict of use or benefit to our country almost always ends in socio-environmental conflicts. For example, it has contaminated soils in La Oroya, which is now a matter of legal dispute will be environmental in the arbitration against the Peruvian government before the International Centre for Settlement of Investment Disputes (ICSID) for failing to decontaminate soils of La Oroya. In the case of La Oroya Antigua, is the presence of soil contaminants such as arsenic, cadmium, lead, mercury, antimony, surpassing international standards, if we compare only 393 times the arsenic exceeds international standards, then we are faced a problem that has to be addressed in a comprehensive way, not only by the presence of contaminants in soil, but also to attack and reduce or eliminate the source of generation of pollutants. In regard to pollution control of water and air have come, but has been neglected specific attention to the problem of

¹ Docente del Departamento de Ciencias Geográficas de la UNMSM - Instituto de Investigación II GEO. E-mail: iigeo.2010@gmail.com

contaminated soil, which can be seen in the lack of environmental legislation in relation to the soil and subsoil which understand from the rocky phase organic soil components. Far failed to resolve the question: What values compare national soil to see if this contaminated? Because there are no values or maximum allowable limits or standards of environmental quality, such a vacuum requires a prompt settlement of the Ministry of Environment, then all this forces us to thin in an integrated management of soils, ranging from assessment, land use planning, land management and remediation strategy to be applied to a safe environmental quality in our country.

Keywords: Contamination of soil, soil management, risk assessment, soil decontamination, environmental quality standard soil.

I. INTRODUCCIÓN

En nuestro país, el tema de contaminación de suelos todavía no ha sido tratado adecuadamente, a pesar de los diferentes problemas de contaminación de suelos que existen en nuestro país. No se tiene todavía toda la conciencia de los problemas ambientales que causan los suelos contaminados; no olvidemos que todos los contaminantes vertidos al ambiente se depositan finalmente en el suelo y permanecen mucho tiempo depositados, hasta que sean eliminados, extraídos o neutralizados (Álvarez, 2001).

En los últimos años, la sensibilización y la concientización ambiental ha ido en aumento, armándose un marco legal muy exigente en calidad de agua y aire; sin embargo, el recurso suelo ha sido dejado de lado, no habiéndose tratado el problema que ocasiona los suelos contaminados en los ecosistemas y si no limpiamos y cuidamos el suelo, tanto el aire y el agua -superficial y subterránea- corren el riesgo de contaminarse. Por ello, es importante diseñar una estrategia de gestión integrada del recurso suelo, teniendo en cuenta los factores siguientes: calidad del suelo, ocupación y ordenamiento del suelo, para optimizar su manejo y planificación para aprovechar al máximo las propiedades y producción del recurso edáfico (Arnaiz, 2001).

La problemática de contaminación de suelos es debido a la actividad industrial y minera, la generación de residuos sólidos y líquidos urbanos, la mala ocupación, el uso del suelo y los diferentes productos humanos. El suelo es muy susceptible de contaminarse, perdiendo sus propiedades; se comporta como un filtro a través del cual se producen y regulan los flujos de energía y materia, por lo que retiene a los contaminantes que se sedimentan o que son transportados por el agua (Berg, 2013).

La rica variedad geológica que tiene el Perú y que sirve para la formación del suelo por los diferentes procesos complejos que transforman los materiales originales o parentales, y que se origina por meteorización, erosión, transporte y deposición, tiene su origen en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Nuestra cordillera, formada por roca ígnea, contiene una gran mineralización de nuestra riqueza; por ello, en algunas partes de nuestro territorio nacional podemos tener alto contenido de metales pesados que provienen de la roca madre y, al ser catalogados, son considerados como suelos contaminados.

La gestión estratégica del suelo parte del potencial natural del suelo y subsuelo para efectuar su caracterización y lograr un adecuado ordenamiento territorial que permita un uso sostenible del recurso suelo y maximizar su manejo y planificación para potenciar al máximo el beneficio de aprovechamiento del suelo, sin ocasionar conflictos de

orden por el uso de los recursos naturales que tiene el territorio (Capo, 2002) (Díaz, 1999).

1.1. La problemática de contaminación de suelos en el Perú

El Perú es un país pobre en suelos. Solamente el 6 % tiene un potencial para el desarrollo agrícola, mientras que el 13.94 % para pastos naturales; solo contamos con 25,525,000 ha aptas para la producción agrícola y ganadera; por ello, el alto valor de los suelos con potencial agrícola. En comparación con otros países de Sudamérica, nuestro país presenta la relación más baja de suelo productivo como sustento alimentario. Los tipos de suelo que tenemos se han clasificado en siete regiones geoedáficas: Yermosólica, Litosólica, Paramosólica o Andonsólica, Kastanosólica, Lito-Cambisólica, Acrisólica y Ferrasólica, con variedades de grupos en cada región, determinando en total 36 grupos de suelos en nuestro territorio.

El suelo es un sistema abierto, complejo, autoorganizativo, estructural y polifuncional; se comporta como un filtro y es un soporte material de las plantas; por lo tanto, debe proporcionar un medio adecuado para la germinación de las semillas y el desarrollo de las raíces; buena aeración, buena capacidad de retención del agua y un régimen de circulación adecuado de las fases líquida y gaseosa dentro de los espacios porosos de la fase sólida. Un buen suelo tiene 45 % de materiales inorgánicos en su composición, 5 % materiales orgánicos, 50 % de espacio poroso, 25 % ocupado por el aire y 25 % por el agua; por las propiedades que presenta el suelo, los contaminantes que estén en el aire o en agua ocupan los espacios y modifican su composición.

Existen muchas definiciones de suelos contaminados, desde la existencia de un agente o agentes químicos en una concentración, de modo que genera un efecto fisiológico desfavorable en los organismos, o la que considera que la contaminación del suelo es un proceso o conjunto que disminuye su capacidad y potencial para producir bienes. En conclusión, un suelo contaminado es aquel que funciona mal como componente ambiental. Los residuos también son otro problema y, tal vez, la principal causa de contaminación de suelos, porque al estar abandonados presentan diferentes características físicas, químicas y biológicas, y sufriendo transformaciones por los diferentes procesos naturales, formándose contaminantes primarios y secundarios.

Una vez que los contaminantes entran al suelo, se dispersan y pueden llegar por aire, agua o depósitos de residuos; tener un suelo contaminado es tener un depósito donde se dispersarán los contaminantes por la acción del

aire y del agua, convirtiéndose en un foco de contaminación. La movilidad de tales contaminantes depende de condiciones ambientales como tipo de suelo, estructura, nivel de la napa freática, temperatura, composición del suelo, y de los procesos del suelo que finalmente regulan la contaminación, como el pH que tiene una capacidad de amortiguamiento, materia orgánica que influye en las propiedades físicas y químicas, precipitación y disolución, volatilización, oxidación – reducción, que se produce en los electrones libres en el agua oxidando los elementos metálicos y formando sulfitos con los sulfatos, cambio iónico, y el proceso de adsorción y desorción.

Los contaminantes en el suelo, dependiendo de sus características, si son residuos sólidos se mantienen formando parte de él, degradándose de acuerdo a su composición material. Los contaminantes que estén en líquido o en estado gaseoso serán transportados por el agua y el aire; en el primer caso, el agua transporta los contaminantes solubles presentes en el suelo, superficialmente, por la acción de las lluvias, ríos, lagos y mar, o se infiltran llegando hasta el acuífero subterráneo; mientras que los contaminantes en estado gaseoso, debido a su peso molecular, pueden ser transportados por el viento, por ejemplo los hidrocarburos que son muy volátiles, los compuestos orgánicos aromáticos, aminas, etc.

La falta adecuada de uso, manejo y planificación de suelo en el Perú ha ocasionado la pérdida de este recurso, y cada día es mayor, principalmente el que sirve para el desarrollo agrícola y ganadero. La problemática es diferente en cada región geográfica, por ejemplo, en la costa se presenta la salinización de suelos, erosión eólica, erosión fluvial, erosión hídrica, desertificación; en la sierra y selva alta la erosión hídrica es grave, así como el sobrepastoreo, la quema de pajonales y la cobertura forestal, mientras que en la selva baja, se suma a los problemas señalados la pérdida de fertilidad de los suelos una vez que se pierde la cobertura forestal.

I.2. Salinización de suelos

Se presenta debido al excesivo sistema de riego que todavía practicamos en el Perú. El riego por gravedad que inunda el suelo y las malas condiciones de drenaje ocasionan que el agua se evapore y se queden las sales en el suelo, causando su pérdida por el alto contenido de sal; es el principal problema de contaminación de suelo en la costa peruana (EPA, 1996), (Eyser, 1995), (Gómez, 1994).

I.3. Erosión eólica

Causada por la acción del viento. Este transporta partículas que, cuando chocan con el terreno, lo van desgastando; es un proceso lento y afecta al suelo cuando ha perdido la cobertura vegetal.

I.4. Erosión pluvial

Los ríos tienen un potencial erosivo por la energía que genera la acción del agua, determinada por su caudal, ocasionando el arrastre de suelos de las orillas en los diferentes valles de la costa, sierra y selva.

I.5. El sobrepastoreo y la quema de pajonales

El pastoreo mal manejado por parte de algunas comunidades campesinas ocasiona que el ganado divague sin ningún control en busca de alimento, erosionando el suelo y, a la vez, exterminando las especies vegetales. El pastoreo en forma simultánea y por tiempo prolongado anula la capacidad de regeneración natural. Otro problema asociado a la pérdida del suelo es la quema de pajonales compuestos por ichu, iro ichu, kachi, acsha, etc; una práctica muy común cuando los pastos alcanzan gran tamaño y no son consumidos por el ganado. Después de la quema, los rebrotes de los pastos son más suaves y succulentos, pero la continuidad de la quema afecta la regeneración natural de los pajonales y el suelo pierde propiedades básicas y está expuesto a la erosión hídrica y eólica.

Como también se tienen los suelos contaminados por las actividades industriales, incluidas la minería, la expansión urbana y el mal manejo de residuos sólidos, que son colocados en el suelo o subsuelo, causando la contaminación de suelos (Holman, 2000), (Montgomery, 1993), (Parent, 2013).

II. MATERIAL Y MÉTODO

Para la realización de la presente investigación se analiza el ciclo de los contaminantes en el suelo para poder comprender y determinar una caracterización de los suelos y así poder aplicar la tecnología más recomendada técnicamente y económicamente viable para la descontaminación de suelos en el Perú y cumplir con los estándares de calidad ambiental ECAS, fijados por el Ministerio del Ambiente del Perú.

Las fases fueron:

- Un análisis de la entrada y salida de un contaminante en el suelo.
- Gestión de suelos contaminados.
- Tecnología disponible en descontaminación de suelos.
- Valorización y descontaminación de suelos de La Oroya.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Entrada y salida de un contaminante

El suelo tiene las siguientes propiedades cuando algunas sustancias contaminantes entran en contacto con él.

- Neutralizar al contaminante.
- Degradar al contaminante
- Adsorber al contaminante.
- Precipitar al contaminante.

Estas propiedades se pierden y se saturan si el contaminante es abundante, ocasionando la contaminación del suelo. La salida de un contaminante puede ser por:

- Volatilización.
- Extracción por cosechas.
- Drenaje.
- Erosión.

3.2. Gestión de suelos contaminados

La gestión integrada de suelos contaminados es una necesidad que cada día está en aumento por la importancia de contar con suelos libres de contaminación, por lo que para diseñar un plan de manejo y recuperación de suelos contaminados se deberán realizar los pasos siguientes:

1. Estudio histórico de las actividades económicas y productivas.
2. Diagnóstico del medio físico en donde se sitúa la fuente de contaminación.
3. Análisis de riesgos y la vulnerabilidad del entorno.
4. Identificación de las técnicas de descontaminación en áreas urbanas y rurales afectadas.
5. Elaboración del plan de remediación de suelos contaminados.

3.3. Tecnología en descontaminación de suelos

Existen variadas tecnologías disponibles para la descontaminación de suelos y seleccionar la más adecuada depende del tipo de contaminante y el costo de la tecnología. Se dividen en dos grandes grupos:

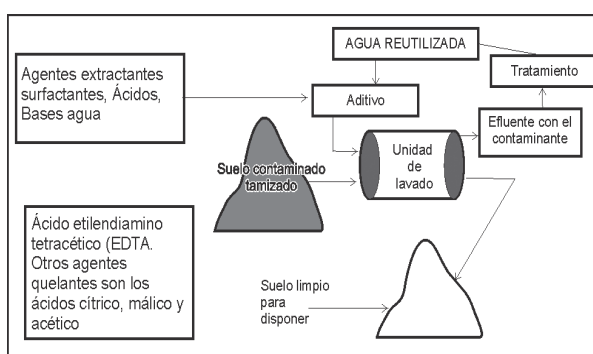
- Tecnologías *in situ*.
- Tecnologías *ex situ*.

La tecnología *in situ* se ejecuta en el mismo sitio donde se encuentra la contaminación o el desecho sólido que ha causado la contaminación del suelo. Se encuentra en este grupo la solificación, la biorremediación (Tabla N° 1). En la tecnología *ex situ*, el suelo contaminado es recogido y transportado a un lugar distinto para recibir el tratamiento y extraer el contaminante. Este grupo de tecnología es mucho más cara que la anterior; mayormente se realiza en un centro de manejo o tratamiento. En algunos casos, de acuerdo a los tipos de contaminante, se pueden combinar tecnologías; en este grupo se encuentra la incineración, biorremediación, solificación - estabilización, desorción térmica, lavado - extracción con solventes (Figura N° 1), (Tabla N° 2).

Tabla N° 1. Tecnologías para descontaminar suelos.

Físico-químicas	Biológicas
INCINERACIÓN: Destrucción de la materia orgánica por oxidación térmica.	BIORREMEDIACIÓN
DESORCIÓN TÉRMICA: Calentamiento del suelo para volatilizar contaminantes y recuperarlos.	<ul style="list-style-type: none"> • Landfarming • Composting
LAVADO EXTRACCIÓN CON SOLVENTES: Separar contaminantes del suelo a un fluido extractante. La corriente líquida debe ser luego tratada para remover o "destruir" el contaminante.	<ul style="list-style-type: none"> • Biopilas • Reactores • Fitorremediación

Figura N° 1. Proceso de lavado de suelos.



Referencia. US-EPA, 1996.

Tabla N° 2. Costos de tecnologías para descontaminar suelos.

Tecnologías	\$ toneladas de material a tratar	\$ m³
Incineración	250 - 500 400 - 1000	325 - 650
Excavación y disposición relleno de seguridad	100 - 150	130 - 185
Solidificación / Estabilización	100 - 250	130 - 325
Desorción térmica	150 - 350	195 - 455
Bioremediación	25 - 152	32 - 197

3.4. Contaminación y descontaminación de suelos en La Oroya

La actividad industrial del complejo metalúrgico ha hecho que la ciudad de La Oroya esté considerada entre las diez ciudades más contaminadas del mundo, según el Instituto Blacksmith, con altos índices de contaminación en el suelo. La causa de tal contaminación es el complejo metalúrgico de la empresa Doe Run Perú. Se estima

que cuando estaba en operación se producían diariamente 1.070 metros cúbicos de humo, con contenido de 15 metales diferentes al ambiente. La principal emisión era por las chimeneas, así como también la existencia de fuentes fugitivas de humos por los conductos de ventilación, construcciones abiertas de ventilación, con contenido de flujos de polvo y gases del proceso metalúrgico. Las chimeneas representaban el 93 % de las emisiones de SO_2 y 66 % de plomo.

Los suelos han recibido contaminación desde que el complejo metalúrgico inicio sus operaciones, 1922, hasta el año 2007. Se calcula que se ha vertido la cantidad siguiente de los compuestos de dióxido de azufre, arsénico y plomo (Tabla N° 3).

Tabla N° 3. Principales contaminantes en el suelo de La Oroya.

Contaminante	Cantidad emitida (Mt)	Cantidad de residuos en el suelo
Dióxido de azufre	7.51	--
Plomo	0.39	0.36
Arsénico	0.14	0.19

En el presente cálculo establecido en el cuadro anterior, se debe estimar el factor de error de cálculo de las cantidades estimadas; por otro lado, existen otras fuentes que han originado también la contaminación de suelo en La Oroya: la operación minera en el distrito de Yauli, la planta concentradora de Huari, las operaciones mineras al oeste, las emisiones vehiculares de operaciones y vehículos de tránsito en la zona.

Hace tres o cuatro décadas atrás casi nadie hablaba de contaminación de suelos en La Oroya ni en el Perú. Los suelos contaminados se convierten en un mayor problema ahora por efecto de la globalización, la firma de tratados de libre comercio (TLC), incluyendo con los EE.UU., y la toma de conciencia de nuestra sociedad sobre la importancia del tema ambiental y sus efectos de riesgo en la salud humana por causa de la contaminación ambiental. Los suelos contaminados de La Oroya se han convertido en un problema para el Estado peruano, debido a que la compañía de origen estadounidense Doe Run Perú inició un proceso de arbitraje en contra de nuestro país, amparado en el tratado de libre comercio (TLC). La empresa acusa al Gobierno peruano de no cumplir con la remediación de suelos contaminados por las operaciones del Complejo Metalúrgico de La Oroya, antes de su privatización, pues era responsabilidad del Estado la limpieza de los suelos y del impacto ambiental negativo producido desde 1974, cuando la empresa fue nacionalizada, hasta 1997, que fue privatizada. Además, la empresa pide al Estado que asuma la responsabilidad de todas las demandas por contaminación existente en su contra, tanto en el Perú como en los EE.UU. El caso será visto en el Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas e Inversiones (Ciadi). La empresa está demandando al Estado peruano por ochocientos millones de dólares americanos, una cantidad millonaria y excesiva, supuestamente por no haber cumplido con la remediación de suelos de La Oroya.

3.5. Calidad de suelos de La Oroya

Debido a la cantidad de emisión de gases y material particulado del Complejo Metalúrgico de La Oroya, cuando estaba en operación, y la velocidad del viento, se calcula una extensión de entre 2,400 y 2,800 km^2 los suelos afectados con metales pesados. La zona con mayor impacto está 2 kilómetros al sur del complejo metalúrgico, es decir, viento abajo de la chimenea principal y al costado de la zona de escorias. Al efectuarse un corte de los perfiles del suelo para analizar el tiempo de acumulación de los contaminantes en el estrato de este, se aprecia que no han alcanzado el agua subterránea, actuando el suelo como un filtro y un depósito de los contaminantes. Tal situación se ha verificado en los diferentes resultados del monitoreo de las aguas subterráneas, que indican niveles bajos de metales pesados, a diferencia de los encontrados en el suelo, donde han sido asimilados y, en algunos casos, precipitados por la capacidad natural de neutralización del suelo.

En la distribución del contaminante, en los perfiles del suelo, considerando al plomo entre 0 y 10 centímetros en los perfiles "O" y "A", se encuentra en concentraciones hasta 1.6 % peso en fracción de 2 mm. La concentración es mayor en la zona de las chimeneas y el depósito de escoria y ferritas de zinc; en relación al arsénico, hasta la profundidad de 10 centímetros, las concentraciones alcanzan hasta 0.8 % peso en fracción de 2 mm; la concentración de metales como plomo, arsénico en la capa de 0 a 2 centímetros, es 15% mayor de niveles en la capa de 2 a 10 centímetros, presentado pH bajo en suelos superficiales 0 a 10 centímetros cercanos al complejo metalúrgico, que es debido a la deposición de ácido sulfúrico. En algunas partes de los suelos de La Oroya se encuentra carbonato de calcio, que sirve para reducir la movilidad de los metales verticalmente, siendo un agente que hace precipitar a los metales pesados; cuando se realiza un análisis del área impactada, se tiene pH bajos, menores de 5. Las zonas donde existen mayores concentraciones de metales pesados abarcan un área de 2.9 km^2 ; la extensión tan baja es debido a las rocas calcáreas que forman parte de la geología local y que han servido como reactivo natural para precipitar a los metales. En conclusión, el mayor contenido de metales se encuentra dentro de 0 a 50 centímetros de profundidad; en otras zonas, la acumulación de contaminantes como plomo y arsénico alcanza promedios muy altos, entre 1000 y 2000 mg/kg, típico de zonas de refinerías sin adecuado control ambiental.

La capacidad agropecuaria de los suelos en La Oroya en la mayor área afectada representa 687 km^2 , la que se puede dividir en cuatro sectores. El primero está más cercano a la fundición donde se concentra la mayor contaminación de suelo por plomo, arsénico y dióxido de azufre; en ese lugar, por el alto contenido de contaminantes, no se pueden realizar tareas de rehabilitación del suelo que permitan el uso agropecuario, a diferencia del sector 2, donde es posible rehabilitar ciertas zonas con fines agropecuarios, esta zona representa 2068 hectáreas; en el sector 3, es factible realizar rehabilitación de suelos en 8215 hectáreas para fines agropecuarios; en el sector 4 no es necesario realizar rehabilitación.

La relación suelo contaminado y agua es directa, y en el caso de La Oroya no es la excepción. La calidad del río

Mantaro ha mejorado pero todavía no lo suficiente, si se tiene en cuenta el río Yauli. Existen todavía niveles altos de sulfatos, aluminio, manganeso, fierro, plomo, que sobrepasan los estándares de calidad ambiental del agua establecidos por la regulación ambiental peruana.

3.6. Evaluación de riesgo (Pendas, 2015)

La evaluación de riesgo es una herramienta importante para definir el riesgo existente, para el ecosistema, de tener suelos contaminados y sus efectos a la salud humana, debido a la exposición de los residuos vertidos en el suelo, resultado de las operaciones del complejo metalúrgico de La Oroya. Tal evaluación nos sirve para justificar las actuaciones de saneamiento del área contaminada; por ello, es importante para la gestión de espacios contaminados realizar su manejo y proceso de descontaminación basándose en la multifuncionalidad, hasta lograr la limpieza de los suelos afectados hasta niveles aceptables que garanticen el uso seguro del suelo, sin ser un riesgo para la salud humana.

El análisis de riesgo debe comprender a las comunidades afectadas directamente como Paacha, La Oroya Antigua, La Oroya Nueva, Chulec, Marcavalle y Chuchis. El primer paso fue la identificación del riesgo de los principales elementos, que son el plomo, arsénico, cadmio y antimonio, que se encuentran presentes en los suelos. El análisis de la exposición de los contaminantes para distintas comunidades mencionadas es variado, pero su riesgo de exposición es variante y los efectos adversos dependen de varios factores que pueden tener para la salud los metales antes mencionados (Parry, 2014).

El riesgo para la salud humana está en las tres rutas de exposición de los contaminantes como arsénico, antimonio, plomo, cadmio, para quienes estén expuestos en los emplazamientos que presentan suelos contaminados. El ingreso a los organismos de las personas se realiza de la forma siguiente:

- Inhalación directa de metales por los polvos fugitivos menores de PM 10, causados por la fuerza del viento que levanta polvo.
- La ingesta incidental de metales.
- Contacto dérmico con metales en suelos superficiales.
- Inhalación de polvo suspendido en el aire.

3.7. Plomo, arsénico, antimonio, cadmio y sus efectos en la salud humana

La presencia del plomo en la superficie del suelo es un alto riesgo para la salud humana, porque existe una alta probabilidad, entre 24 % y 96 %, de que un niño presente niveles de plomo en la sangre por encima de 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$ en toda la zona donde la acumulación de plomo en el suelo es alta. El estado nutricional y la higiene personal son factores importantes para la menor o mayor absorción de plomo. La intoxicación por plomo es una de las más importantes preocupaciones ambientales en La Oroya, porque es biodisponible en todas sus formas químicas.

El plomo metálico puede pasar a su forma iónica al ingerirse, debido al contacto con el ácido gástrico; también puede ser absorbido por la piel en contacto con una superficie contaminada.

Las concentraciones de arsénico en el suelo de La Oroya varía, aumentando si está más cercano al complejo metalúrgico. Se ha detectado también arsénico en el aire por acción del viento, mientras que en el suelo las concentraciones varían de 3 a 40 mg/kg . El ingreso al organismo es a través del aire y el suelo, pero, a diferencia del plomo, su ingreso por contacto con el suelo es mucho menor, debido a que su adsorción por vía dérmica es baja y alcanza solamente el 2 %. En las poblaciones que han estado expuestas a dosis de suelos contaminados, se ha determinado que los riesgos incrementales de cáncer en el periodo de vida estimados fluctúan entre 2.5 casos de cáncer en 10,000 personas y 2.2 casos de cáncer por 1,000 persona como resultado de la exposición a arsénico orgánico en el suelo. En el caso de los niños, se estima que la ingesta accidental fluctúa entre 31 y 91 $\text{mg}/\text{día}$; se puede saber los niveles de concentración de arsénico con un análisis de orina, sangre, cabello y uñas, que son considerados como marcadores de exposición, siendo el análisis de orina el mejor indicador.

Es común encontrar cadmio en complejos metalúrgicos como el de La Oroya, debido a que es liberado durante la refinación de zinc, plomo o cobre, afectando a los suelos y a los pobladores con la emisión de partículas. En los reportes de calidad de aire de La Oroya, no se toma en cuenta, entre las partículas suspendidas totales, la presencia de cadmio, que es liberado como fuente fugitiva, mayormente solo se toman en consideración los contaminantes gaseosos. El cadmio representa un alto riesgo para nuestra salud debido a su similitud con el zinc. Cuando ingresa a nuestro organismo por vía oral y respiratoria, este se confunde y lo absorbe; luego, el cadmio es transportado por la sangre a los diversos órganos y tejidos, principalmente riñones e hígado, donde se retiene cerca del 50 % del cadmio, almacenado en varios órganos por muchos años.

3.8. Remediación de suelos en La Oroya

El plan de remediación de suelos de La Oroya debe realizarse considerando el uso de suelo, tanto urbano y agrícola, e identificado las técnicas más viables desde el punto de vista de resultados y economía. Se debe efectuar una valorización de las diferentes técnicas aplicables para el saneamiento o descontaminación y un análisis de los costos y beneficio ambiental. La remediación deberá comprender lo siguiente: gestión, obras civiles, medidas de seguridad e higiene, transporte, tratamiento, seguimiento y control ambiental.

Las alternativas de remediación a considerar serían las siguientes:

- Obras civiles para prevenir o rellenar zonas de erosión o control de polvo.
- Excavación y remoción de suelos.
- Aislamiento del suelo contaminado para prevenir contacto de la población.

- Tratamiento del suelo y revegetación, empleo de fitorremediación.
- Obras para renovar y mejorar el sistema de abastecimiento de agua potable.

Se tendrá que efectuar una remoción de los suelos contaminados reemplazando la capa superficial del suelo, de 0 a 10 centímetros, perdiéndose la materia orgánica del suelo y el perfil "A" del suelo, que son el principal sustento de las plantas, lo cual deberá ser necesariamente reemplazado por suelo orgánico. En las zonas de mayor contaminación, la remoción deberá llegar hasta los 20 centímetros de profundidad.

Los suelos removidos deberán ser colocados en un depósito seguro y debidamente encapsulados para evitar problemas de contaminación ambiental en el área donde sean colocados.

En la técnica de tratamiento para remediación de los suelos de La Oroya, no se necesita que se apliquen altas cantidades de cal, debido a la geología local, sino mayor cantidad de materia orgánica, con nutrientes. En las zonas de fuertes pendientes se deberán colocar matos de fibra como madera, posteriormente el vertimiento de biosólidos manualmente o en forma líquida, con una mezcla de semillas y cal, con desechos de pulpa de papel o guano, para la fertilidad del suelo.

La revegetación se deberá enfocar en el uso del suelo para pastoreo, área con cobertura forestal con una adecuada zonificación ecológica y económica que permita la mejor utilización futura del suelo desde el potencial deseado. Una vez recuperado, las especies nativas deberán incluir una variedad de pastos y otras que son comunes en las zonas, como: waire, warako, pulla, puna yareta, pinco, garbancillo, turpa, wiswi, entre los principales, sin descartar otras especies vegetales menores, entre especies nativas e introducidas en la zona; en algunas áreas solo se deben realizar enmiendas, en otras sí necesitan una revegetación total.

La fitorremediación es otra técnica a utilizar que se puede aplicar en grandes extensiones. Su aplicación debe ser muy bien controlada y monitoreada, porque se tiene una serie de variedades de plantas que sirven para remover metales, como la mostaza, que absorbe altas cantidades de arsénico en suelos contaminados con este metal; para el plomo se puede usar mirasol, como otras variedades de hierbas, pastos y arboles. Es importante indicar que las primeras cosechas de hierbas y pastos no pueden ser consumidos por animales, ni los arboles ser utilizados para elaborar productos como muebles o sillas; se tendrá que incinerar cosechas, transportar los residuos y sembrar en varios periodos de cosechas, hasta que los análisis bromatológicos den como resultado que los productos no contienen metales pesados y el suelo presente una reducción de metales pesados a niveles aceptables.

En cuanto a la remediación en las aéreas urbanas, el programa a ejecutar deberá tener como principal objetivo reducir, eliminar o minimizar el riesgo a la salud de la población de La Oroya. Se tendrá que utilizar encapsulamiento de suelos con cemento, como medida de seguridad para que queden sellados y evitar contacto con la superficie. Por tal motivo, los caminos de tierra, los patios esco-

lares, las canchas deportivas, etc., deberán ser totalmente cementadas. En zonas para jardines o que tengan cobertura vegetal, el suelo deberá ser removido y reemplazado por uno de buenas condiciones para efectuar la siembra de vegetación. El objetivo es eliminar los focos de suelos contaminados existentes en las zonas urbanas.

Toda la ciudad debe modernizar y tener un abastecimiento de agua; además, las autoridades de salud deben concienciar a la población sobre la importancia de una adecuada higiene para la prevención de la salud, principalmente en los niños. Las instituciones educativas también pueden colaborar en esta tarea.

En la remediación de áreas rurales, se deberá buscar minimizar la erosión y evitar la generación de polvo, y mejorar los suelos para su uso agropecuario con pasturas mejoradas, dando al ecosistema de la zona un valor ecológico y estético.

En promedio, la aplicación de un plan de remediación de suelos contaminados en La Oroya tardará entre seis y diez años, la inversión puede alcanzar, con técnicas adecuadas, la cantidad de hasta 15 millones de dólares, sin descartar que sea menor el monto, según las técnicas y acciones a ejecutar, pero no será menor de 10 millones de dólares; por ejemplo, para 10,500 ha que comprendan enmiendas de suelos y revegetación, se estima un costo de 7 millones de dólares en la zona rural, tal vez de mayor extensión donde se encuentran suelos contaminados, mientras que para fitorremediación el costo es de 300,000 a 400,000 dólares, aproximadamente. En consecuencia, la mayor inversión se efectuará en el área rural, donde se gastará entre 8 y 10 millones de dólares, en un promedio máximo de siete años. En la zona urbana, el gasto será menor, calculándose como máximo 3 millones de dólares para estudios de factibilidad de las obras civiles a efectuar: asfaltado y pavimentación, construcción de un depósito seguro, remoción y reemplazo de suelo. El mayor monto en esta zona está en el asfaltado y la pavimentación, que puede llegar, por la extensión del suelo contaminado, a 700 mil dólares aproximadamente.

IV. CONCLUSIONES

1. En nuestro país, es necesario efectuar una estrategia integral de suelos contaminados. La experiencia de La Oroya es la primera en descontaminación de suelos. Existen en nuestro país otras zonas en estado crítico que también deberán ser saneadas y rehabilitadas, así mismo es importante el reforzamiento de la legislación ambiental en relación con el suelo y subsuelo y establecer los límites máximos permisibles y estándares de calidad ambiental, realistas y que respondan a nuestra condiciones edáficas, geomorfológicas y geográficas, que son muy particulares y diferentes a otros países.
2. La gestión integrada de los suelos contaminados deberá, entonces, abarcar la evaluación, la planificación de uso, el ordenamiento del territorio y la descontaminación para el aprovechamiento óptimo del suelo y así tener ecosistemas limpios libres de contaminantes, que permanecen en el suelo por mucho tiempo, afectando el ambiente y la salud de las personas que están expuestas a sus dosis.

V. AGRADECIMIENTOS

Al departamento de Ciencias Geográficas y al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Álvarez-Campana Gallo, J.M. (2001). Suelos contaminados: problemática, metodología y normativa. Curso de Gestión Ambiental en la Empresa. Escuela de Organización Industrial. Fondo Social Europeo. ETSICCP. Universidad de A Coruña, p. 107.
- [2] Arnaiz, J.A. & Benito, J. (2001). Suelos contaminados y su saneamiento. *Ingeniería Química*, junio.
- [3] Berg, Van Den R., Denneman, C.A.J. y Riels, J.M (2013). Risk assessment of contaminated soil: Proposals for adjusted, toxicologically bases Dutch soil clean-up criteria. In: Contaminated Soil '93, Eds. Kluwer Academic Publisher. Netherlands, p. 349-364.
- [4] Capo Martí, M. (2002). *Principios de ecotoxicología*. Editorial McGraw-Hill Profesional.
- [5] Díaz Cartagena, W. J. (1999). Minería, petróleo y medio ambiente. Ediciones La Esperanza. Auspiciado por MARSÁ y OXI.
- [6] EPA - EE.UU. (1996). Guías del ciudadano. Programa de residuos sólidos y respuesta en situaciones de emergencia. Environmental Protection Agency.
- [7] EYSER (1995). Contaminación de suelos. Nota interior 1/95. Departamento de Medio Ambiente. EYSER, Estudios y Servicios, S.A.
- [8] Gómez, J.M., Rodríguez, R.A., García, R.A. & García, F. (1994). Limpieza de suelos contaminados mediante aireación in situ (características de los contaminantes). *Ingeniería Química*.
- [9] Holman, I.P., Palmer, R.C. y Leonaviciute, N. (2000). Using soil and Quaternary geological information to assess the intrinsic groundwater vulnerability of shallow aquifers: an example from Lithuania. *Hydrogeology Journal*, vol. 8, num 6 December 2000, p. 636-645.
- [10] Montgomery, R. (1993). Investigación y corrección de suelos contaminados. *TecnoAmbiente*.
- [11] Parent, X. (2013). Le Traitement des sols contaminés. *Travaux mai*.
- [12] Parry, J. (2014). Cultivos que eliminan la contaminación por metales. *TecnoAmbiente*.
- [13] Pendás, F. (2015). Las nuevas tecnologías para la caracterización y control de la contaminación en el suelo y subsuelo. En: Curso sobre caracterización y control de la contaminación del suelo y subsuelo por vertidos urbanos e industriales. Universidad de Oviedo.