

RESTAURACIÓN AMBIENTAL DE TERRENOS CONTAMINADOS EN ESCOMBRERAS MINERAS CON PLANTAS HERBÁCEAS PERENNES DE RAÍCES PROFUNDAS.

Prati Armati srl, Via del Cavaliere 18 - 20090 Opera (MI), Italia
e-mail: info@pratiarmati.it

Centro Ricerche Ecotec Loc. Macchiareddu 6ª Strada Ovest - 09010 Uta (CA), Italia.

RESUMEN.

La restauración ambiental de terrenos contaminados (escombreras mineras, canteras y antiguos vertederos) es un problema complejo, principalmente debido a la dificultad de enraizamiento de las especies de plantas inadecuadas utilizadas hasta la fecha para la renaturalización de estos suelos estériles y/o contaminados. A lo largo de los años se han desarrollado varias técnicas para la estabilización, protección de estos terrenos y su posterior renaturalización con resultados muy diferentes.

Prati Armati® ha desarrollado recientemente técnicas innovadoras que utilizan exclusivamente plantas herbáceas perennes de raíces profundas que han mostrado un alto índice de tolerancia a los terrenos contaminados y son capaces de sobrevivir y prosperar en zonas donde las condiciones climáticas eran consideradas prohibitivas hasta hace unos pocos años para el desarrollo de la vegetación en terrenos difíciles tales como, suelos contaminados, zonas baldías, terrenos salinos, materiales estériles procedentes del excavado de túneles y rocas alteradas por meteorización o fracturadas, incluso con la presencia de material calcáreo en concentraciones de hasta el 5%. Así como en terrenos contaminados con residuos de hidrocarburos y metales pesados en concentraciones 10 veces superiores a los límites permitidas por la legislación vigente. Además, estas plantas herbáceas no necesitan mantenimiento ni riegos ni ningún tipo de mallas y son además capaces de soportar las altas temperaturas que se generan en los vertederos debido a la fermentación de residuos orgánicos.

Palabras clave: erosión, plantas herbáceas, raíces profundas, efectos hidráulicos y mecánicos, estabilización de taludes, tolerancia a suelos contaminados.

LOS PROCESOS EROSIVOS Y LA RESTAURACIÓN AMBIENTAL.

La erosión en la Unión Europea y especialmente en los países del sur de Europa, está muy generalizada y estrechamente relacionada con las características climáticas de estas latitudes, donde las precipitaciones pluvio-meteorológicas representan el factor más importante debido a la erosión hídrica.

La intensidad de la erosión también depende de otros factores, tales como la intensidad y la duración de las lluvias, la longitud y el ángulo de la pendiente, la permeabilidad del suelo, el grado de saturación, la presencia de vegetación y el grado de erosionabilidad del terreno per se.

La intensa erosión impide la formación de humus en el suelo y acelera la lixiviación de nutrientes haciendo que sea muy difícil el desarrollo de la vegetación. Incluso algunas especies pioneras, especialmente resistentes, puede que no lleguen a prosperar en laderas erosionables debido a que sus raíces no pueden profundizar ante la acción de un evento meteorológico más intenso de lo habitual.

Estudios recientes han puesto de relieve la capacidad de arraigo de especies herbáceas de raíces profundas seleccionadas en el sistema de revegetación Prati Armati® mostrando un alto índice de tolerancia a terrenos contaminados y la capacidad de prosperar en condiciones climáticas muy difíciles en las que otras especies de plantas que se utilizan generalmente para este tipo de intervenciones, no logran desarrollarse y por lo tanto no son eficaces para prevenir la erosión.

Estas especies herbáceas de raíces profundas se comportan como plantas pioneras, fijando firmemente la estructura de estos terrenos tan problemáticos con una alta concentración de residuos y contaminación. Estas plantas herbáceas logran desarrollar una densa vegetación de extensa cobertura que mejora la estructura y fertilidad del suelo, preparando y colonizando estos terrenos para las plantas endémicas así como las especies más exigentes (como los arbustos y árboles) acelerando así el proceso de naturalización y restauración ambiental en terrenos complejos.

Existen varios métodos para la estimación cuantitativa de la erosión (pérdida de suelo), tales como los basados en modelos teóricos, modelos físicos y modelos empíricos a escala reducida. Entre estos últimos se encuentra la Fórmula Universal para el Cálculo de la Pérdida de Suelo o Universal Soil Loss Equation - USLE (Wishmeier y Smith, 1965, 1978). Esta fórmula empírica que también ha sido adoptada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos para estimar la erosión hídrica, puede generalizarse de la siguiente forma:

$$A = R \times K \times LS \times P \times C$$

donde:

- A: Pérdida específica de suelo [t/ha año], asociada a los fenómenos de erosión en surcos y entre surcos;
- R: Factor de erosividad de las lluvias: factor climático sobre la intensidad y duración de la precipitación [MJ mm / ha h año];
- K: Factor que expresa la erosionabilidad del suelo [t h / MJ mm];

- LS: Factor geométrico relacionado con la longitud y la inclinación de la pendiente;
- P: Factor de prácticas de conservación de suelos: dependiente de las medidas de protección, control y conservación;
- C: Factor gestión de la cobertura: factor de reducción relacionado con la vegetación.

Las técnicas de control de la erosión comenzaron a desarrollarse en el periodo de 1950-60. La mayoría de ellas utilizan productos sintéticos tales como geoceldas, geomantas, geored o biomateria, mimbre, etc. Sin embargo, estos materiales pueden deteriorarse a lo largo del tiempo y más rápidamente en condiciones climáticas extremas, y por lo tanto no siempre pueden solucionar el problema de la erosión y permitir la renaturalización.

Recientemente, hemos instalado revegetaciones antierosivas de carácter innovador que promueven el uso de los sistemas naturales, tales como ciertos tipos de especies herbáceas perennes de raíces profundas, que combinan una gran resistencia a condiciones de alta fito-toxicidad y buenas propiedades geotécnicas, lo que contribuye a reducir los factores de P y C que aparecen en la ecuación USLE [1] y por lo tanto reducen la pérdida específica de suelo.

El papel de la vegetación en la protección de laderas por la erosión ha sido estudiado y documentado extensamente en la investigación experimental.

Para disminuir la erosión hídrica, y reducir así la pérdida de la escorrentía del suelo, las plantas herbáceas de raíces profundas seleccionadas por Prati Armati® a lo largo de más de 30 años, parecen muy prometedoras por las siguientes razones:

- La vegetación disminuye la energía cinética de las gotas de lluvia, mitigando así los efectos de la erosión (erosión por salpicadura – “splash erosion”);
- Aún en casos de fuertes lluvias, una fracción importante de agua meteórica se desliza sobre las partes superiores de las plantas, impermeabilizando así la pendiente (efecto tejado), reduciendo sustancialmente la infiltración del agua y mejorando su calidad (agua sin sedimentos en disolución);
- La presencia de vegetación reduce la tasa del agua de escorrentía en el suelo y la intensidad de la erosión;
- Debido a la capacidad de evapo-transpiración, las plantas reducen y retrasan la saturación total del suelo. Las plantas absorben el agua disponible en el terreno (incluso en zonas profundas del subsuelo) debido a las extensas raíces, así como la parte aérea, realizando la transferencia de agua a la atmósfera en forma de vapor;
- El sistema radicular refuerza firmemente el terreno en proporción directa a la densidad y profundidad de las raíces. Esta capacidad se acrecienta con la presencia de raíces finas y homogéneas y con la formación de mallas intrincadas de raíces;
- Las plantas mantienen fijamente las partículas del suelo, actuando como un filtro que aumenta la resistencia a la erosión de las partículas del terreno, mejorando así la capacidad de contención;
- Las plantas aumentan el contenido de materia orgánica en el suelo y esto, a su vez, conduce a una reducción de la erosión del terreno facilitando que los agregados estructurales sean más estables;

- El aumento de la cantidad materia orgánica del suelo proporciona un aumento significativo de la capacidad de retención de agua;
- El aumento de la materia orgánica, a través de los procesos químicos del humus, facilita también un aumento en la retención de nutrientes disponibles para la absorción biológica.

1.1 Mejora de la fertilidad, de la estructura y de la capacidad de retención hídrica del terreno debido a la presencia de la vegetación.

La presencia de vegetación provoca un aumento significativo de la materia orgánica del suelo y esto, a su vez, conduce a la mejora de la estructura, la fertilidad y retención de agua. La materia orgánica del suelo puede ser considerada como una mezcla de compuestos derivados de plantas y microorganismos en diferentes etapas de degradación, a partir de los compuestos orgánicos residuales en disolución hasta llegar casi transformado en humus. El humus es la fracción más activa en términos físico-químicos de la materia orgánica que se derivan de su descomposición y su reelaboración. El contenido de materia orgánica varía de menos del 1% en los suelos del desierto, entre el 1% y un 15% en los suelos forestales de más del 90% en la turba.

La presencia de materia orgánica en el suelo provoca un aumento significativo de la capacidad de retención de agua y su capacidad nutritiva: el humus es capaz de mantener grandes cantidades de agua hasta 20 veces su propio peso y generar una retención de los nutrientes químicos, como potasio, calcio, magnesio, fósforo. Proporciona también un retardo del proceso de retrogradación del fósforo, facilita la disolución de los oligo-elementos y aumenta la capacidad de amortiguación.

La presencia de materia orgánica en el suelo reduce su susceptibilidad a la erosión, ya que favorece su formación, contribuye a la estabilidad de los agregados de partículas que mejoran la estructura del suelo. También fomenta el desarrollo de la fauna del suelo y los microorganismos, puesto que estos serán utilizados como sustrato alimenticio.

La materia orgánica también juega un papel importante en la inactivación, por absorción de diversos compuestos orgánicos biotóxicos, ya sea de origen biológico (polifenoles) o sintéticos (herbicidas y pesticidas en general). El suelo rico en materia orgánica, es por tanto importante en la eliminación de compuestos orgánicos biotóxicos, reduciendo así la contaminación de las aguas subterráneas.

2. PRUEBAS DE GERMINACIÓN Y DE PROFUNDIDAD DE LAS RAÍCES EN ZONAS CONTAMINADAS DE ESCOMBRERAS MINERAS.

Para analizar la capacidad de fito-estabilización en suelos contaminados, se realizaron pruebas de germinación en las muestras de las escombreras del distrito minero de Montevecchio en el suroeste de Cerdeña, Italia. Estos materiales están formados por la acumulación de desechos estériles (ganga) procedentes de minerales como galena (sulfuro de plomo), blenda o esfalerita (sulfuro de cinc) y otros. El análisis cuantitativo de los contaminantes en la muestras de material se realizó utilizando la metodología de Espectrometría Óptica de Emisión de Plasma, ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometer). Los

principales contaminantes detectados fueron: arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, antimonio y selenio, las concentraciones de zinc en algunos casos fueron más de diez veces superiores a los límites de la normativa vigente. A modo de ejemplo indicamos a continuación las concentraciones detectadas en las muestras de suelo N^o 14:

Elemento específico de la muestra	Fecha del análisis	Concentración (Unid.)	Resultado	Referencia media
As	01/06/10	mg/Kg	544,4	50
Cd	01/06/10	mg/Kg	140,3	15
Pb	01/06/10	mg/Kg	9263,0	1000
Zn	01/06/10	mg/Kg	20216,5	1500

Figura 1. Resultados del análisis en muestras de terreno contaminados utilizadas para probar la germinación de las herbáceas Prati Armati.

2.1. Pruebas de Germinación.

Para analizar la germinación de las especies de herbáceas de raíces profundas, se utilizaron muestras de terrenos procedentes de siete (7) escombreras diferentes del distrito minero de Montevecchio. Para este análisis se utilizaron las semillas de nueve (9) especies de herbáceas que forman parte del sistema de revegetación Prati Armati®. Con cada muestra de terrenos contaminados se rellenaron nueve (9) macetas de 16 cm de diámetro (una maceta para cada especie de herbáceas).

Un total de 63 macetas fueron sometidas al análisis de germinación a las que le suministraron varios ciclos de riego para simular la lluvia. Un mes después de la siembra se obtuvieron los siguientes resultados: De las nueve (9) especies de herbáceas utilizadas, un mínimo de cinco (5) de ellas fueron capaces de germinar en todas las muestras de suelo utilizadas, junto con el desarrollo de un extenso sistema radicular en todo el volumen de suelo contenido en cada maceta.



a)



b)

Figura 2. Resultados de la germinación un mes después de la siembra. a) Macetas con germinación de herbáceas. b) Desarrollo del sistema radicular en las macetas.

Este experimento ha revelado que las especies herbáceas utilizadas en la pruebas, han sido capaces de adaptarse a este medio tan complejo de terrenos contaminados de escombreras mineras mostrando una alta tolerancia. Por lo tanto proporcionan resultados esperanzadores en el tratamiento de terrenos contaminados por arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, antimonio, selenio, zinc.

Esta primera etapa de las pruebas de germinación fue seguida por una segunda fase para analizar la capacidad de desarrollar raíces profundas de estas herbáceas en estos terrenos contaminados de escombreras mineras.

2.2 Pruebas de desarrollo de raíces.

Los cepellones de las cinco especies de herbáceas que lograron germinar en todas las muestras de las escombreras, fueron transplantadas a tubos alargados de plástico de 2 m de longitud y 20 cm de diámetro (Fig.3), rellenos con el mismo tipo de material contaminado de escombreras mineras que contenía la maceta de procedencia. Los tubos de ensayo fueron equipados con sistema de riego por goteo.

Debido a la transparencia del plástico, fue posible realizar el seguimiento del desarrollo de las raíces de estas cinco (5) especies herbáceas a lo largo del tiempo. Después de un año de la operación de transplante, se pudo observar el vigoroso desarrollo de las raíces en las cinco especies analizadas. En el 50% de los casos, las raíces alcanzaron un desarrollo superior al metro de profundidad, alcanzando una de las especies más de 1,80 m de profundidad de enraizamiento.

Estos análisis prueban por tanto que las especies herbáceas seleccionadas no sólo son capaces de germinar en suelos contaminados, sino que alcanzan un buen desarrollo vegetativo y adquieren una densa malla de profundas raíces.

El experimento reveló que las especies herbáceas seleccionadas fueron capaces de desarrollarse en suelos contaminados por compuestos estériles y metales pesados. Siendo por tanto posible la revegetación de escombreras mineras utilizando estas plantas herbáceas perennes, así como en terrenos contaminados por arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, antimonio, selenio y zinc, haciendo posible, además su restauración por fitorremediación.



a)



b)

Figura 3: a) Tubo alargado de plástico, cubierto para proporcionar oscuridad, utilizado para las pruebas de enraizamiento. b) Detalle de las raíces mostrando un desarrollo extenso de raíces finas y homogéneas cuyo entramado fija firmemente el terreno.

3 APLICACIONES DE PLANTAS HERBÁCEAS DE RAÍCES PROFUNDAS EN LA RESTAURACIÓN DE CANTERAS, ESCOMBRERAS MINERAS Y VERTEDEROS.

El campo de aplicaciones de las técnicas desarrolladas en Italia por Prati Armati® es bastante amplio, puesto que se han obtenido muy buenos resultados en la fitoestabilización de taludes de carreteras y ferrocarriles, presas, canteras, escombreras mineras, vertederos, acantilados litorales, así como en la protección de las riberas de ríos, arroyos, cauces y canales.

En el caso de terrenos contaminados y antiguos vertederos, se obtienen los siguientes beneficios:

- Rápido desarrollo de la cobertura vegetal en corto tiempo y eliminación de la erosión hídrica;
- Eliminación de la erosión eólica que produce nubes de polvo del material contaminado;
- Fijación y aislamiento de los residuos contaminados por la cobertura vegetal mejorando al mismo tiempo el impacto visual de la zona tratada.
- Considerable reducción de la contaminación en disolución (producida por percolación), debido a la intensa transpiración de estas plantas y la extensa superficie ocupada, así como la disminución de la infiltración del agua de lluvia debido a la impermeabilización de la ladera, ya que con la lluvia intensa, las plantas se inclinan hacia la base de la ladera y el agua se desliza por encima de las plantas con un “efecto tejado” (Fig. 3c); Disminución de la fricción y erosión en los afloramientos de los sedimentos en los taludes, puesto que quedan cubiertos por desarrollo de esta nueva masa vegetal también por el “efecto tejado”.

Slope Impermeabilization with Prati Armati

The dense mass of deep-rooted herbaceous plants of Prati Armati behaves like the framework of a green roof on a hut: it allows water to flow down the outer roof during heavy rain, but the hut remains waterproofed inside.



Figura 3c “Efecto tejado”. Con la lluvia intensa las plantas se inclinan hacia la base del talud de tal forma que el agua se desliza por encima de ellas impermeabilizando el talud.

El tratamiento de terrenos contaminados con plantas herbáceas de raíces profundas contribuye a la recuperación de estos terrenos y proporciona una solución rápida y económica para asegurar la estabilidad de la pendiente de los vertederos, eliminando la erosión y el transporte del material contaminado aguas abajo. Estas intervenciones (ver DM 471/99), entran dentro de la categoría de técnicas "in situ", es decir, tratamiento y restauración de suelos y residuos contaminados sin manipulación.

3.1 Ejemplo de renaturalización de vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU).

El siguiente ejemplo muestra no solamente el arraigo de plantas herbáceas de raíces profundas en un vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU) en la Isla de Cerdeña, sino la renaturalización posterior de la zona llevada a cabo por las especies endémicas (Figs. 4a y 4b). Las plantas herbáceas actuaron como especies pioneras y a los pocos meses los taludes estaban completamente renaturalizados por las especies endémicas cuyas semillas fueron transportadas por el viento. El arraigo de las herbáceas fue realizado con éxito a pesar de que la intervención tuvo lugar en condiciones climáticas desfavorables. Las herbáceas de raíces profundas protegieron la capa superficial de los taludes, eliminaron la erosión y evitaron la percolación que habría producido la acumulación de materiales lixiviados aguas abajo (Fig. 4b).



a)



b)

Figura 4. El vertedero RSU de Ozieri, Cerdeña: a) Situación en Noviembre 2005, antes de la intervención, b) Después de la intervención con Prati Armati mostrando también la renaturalización por las especies endémicas de la zona (Mayo 2006).

3.2 Ejemplo de revegetación para la renaturalización de una cantera en desuso.

Este ejemplo de renaturalización de una cantera en desuso también se realizó mediante herbáceas perennes de raíces profundas en los alrededores de Catania, Sicilia en las proximidades de una zona actualmente utilizada para el aprovechamiento industrial de residuos sólidos urbanos. La comparación antes y después de la intervención puede observarse en las Figuras 5a y 5b

Pocos meses después de la intervención, las especies herbáceas de raíces profundas habían eliminado la erosión y renaturalizado completamente el talud (Fig. 5b).



a)



b)

Figura 5. La cantera en desuso cerca de Catania, utilizada actualmente para la obtención de gas de vertederos restaurados. a) Situación en Febrero 2010, antes de la intervención b) Después de la intervención mostrando ya signos evidentes de renaturalización (Abril 2011)

3.3 Otro ejemplo de revegetación para la naturalización de una cantera de roca caliza.

Como ejemplo de renaturalización en una cantera de rocas calizas, presentamos la revegetación con plantas herbáceas de raíces profundas que tuvo lugar en Spoleto, Umbria (Figs. 6a y 6b).

Aproximadamente siete meses después de la revegetación y a pesar de las difíciles condiciones climáticas, las especies herbáceas prosperaron y comenzaron a colonizar la pendiente desarrollando el proceso de naturalización. Este proceso todavía está en curso y en la figura 6b pueden observarse los primeros resultados del proceso de naturalización.



a)



b)

Figura 6. La cantera de roca caliza cantera en desuso en Spoleto (PG). a) Situación en Octubre de 2010, antes de la intervención. b) Primeros resultados de la renaturalización (Mayo de 2011).

4 CONCLUSIONES.

El uso de herbáceas perennes de raíces profundas seleccionadas ha conseguido excelentes resultados para eliminar la erosión y conseguir la renaturalización de terrenos complejos de difícil restauración (escombreras, canteras, vertederos, zonas baldías, etc.) en condiciones climáticas adversas (escasa humedad y altas temperaturas) que eran hasta hace unos pocos años considerados muy difíciles para el desarrollo de la vegetación. Las pruebas realizadas con estas especies de herbáceas han mostrado un alto grado de tolerancia en los terrenos contaminados de antiguas escombreras mineras con contenidos en cal de hasta un 5% en peso y suelos contaminados por los desechos de hidrocarburos y metales pesados. Por lo tanto, el uso de estas plantas ha resultado prometedor para la restauración ambiental de áreas contaminadas y antiguos vertederos abandonados.

Como se muestra en los ejemplos descritos en este artículo, la alta tolerancia a este tipo de terrenos difíciles para el arraigo, mostrada por esta selección de plantas herbáceas, ha sido probada satisfactoriamente. También debe subrayarse no solo el arraigo, sino la rápida naturalización de canteras y vertederos donde generalmente este proceso es particularmente lento y difícil.

Las intervenciones con este tipo de herbáceas también reducen drásticamente la generación de lixiviados en los vertederos y terrenos contaminados debido a la evapotranspiración desde zonas profundas, así como a la impermeabilización de las zonas tratadas debidas al “efecto tejado”. Por lo tanto estas actuaciones pueden realizar la restauración ambiental de taludes de escombreras mineras, vertederos y suelos contaminados de pendiente pronunciada, de forma rápida y económica allí donde las limitaciones de tiempo y los altos costos impiden, frecuentemente, los métodos de remediación tradicionales.

5 BIBLIOGRAFIA.

- Bischetti G.B., Bonfanti F., Greppi M., 2001. *Misura della resistenza a trazione delle radici: apparato sperimentale e metodologia d'analisi*. Quaderni di Idronomia Montana, 21/1, 349-360.
- Bischetti G.B., Chiaradia E. A., Epis T., 2009. *Prove di trazione su radici di esemplari di piante PRATI ARMATI®. Rapporto conclusivo*. Dipartimento di Ingegneria Agraria, Università degli Studi di Milano.
- Bonfanti F., Bischetti G., 2001. *Resistenza a trazione delle radici e modello di interazione terreno – radici*. Istituto di Idraulica Agraria, Milano – Rapporto interno.
- Celi L., *La sostanza organica del suolo*. Environment, Ambiente e Territorio in Valle d'Aosta.
- Prati Armati srl, archivio fotografico e banca dati.
- Rassam D.W., Cook F., 2002. *Predicting the shear strength envelope of unsaturated soils*. Geotechnical Testing Journal, Technical Note, 25: 215-220.
- Rettori A., Cecconi M., Pane V., Zarotti C. 2010. *Stabilizzazione superficiale di versanti con la tecnologia Prati Armati®: implementazione di un modello di calcolo per la valutazione del coefficiente di sicurezza*. Accademia Nazionale dei Lincei – X Giornata Mondiale dell'Acqua, Convegno: Frane e Dissesto Idrogeologico, marzo 2010.
- Richards, L.A., 1931. *Capillary conduction of liquids through porous medium*. Physics, Vol. 1.
- Waldron LJ, 1977. *The shear stress resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil*. Soil Journal.
- W.H. Wishmeier, D.D. Smith, 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain. Agr. Handbook, n. 282, U.S. Dept. of Agr.