

Aplicación de Tecnosoles para la mitigación de efectos ambientales por construcción civil en zonas de pizarras

Bolaños, D.¹; Macías-García, F.²; Verde, J. R.³; Macías, F.¹

¹Laboratorio de Tecnología Ambiental, Universidad de Santiago de Compostela, LTA-USC

²Centro de Valorización Ambiental del Norte, CVAN

³EDAFOTEC S.L.

Santiago de Compostela, España

darioroberto84@hotmail.com

Resumen— Se estudian los impactos ambientales generados por la construcción de un proyecto de Ingeniería Civil, en una zona caracterizada por la presencia de materiales pizarreños, al Noroccidente de España, en la Comunidad Autónoma de Galicia. En específico se estudia la Autovía A8 del Cantábrico, sentido San Sebastián a Santiago de Compostela, en el tramo de Vilamar – Barreiros. Se incluyen los resultados de un ensayo piloto que forma parte de una propuesta de actuación para la recuperación de los focos de acidificación por medio de la aplicación de Tecnosoles "a la carta", así como también la formación de humedales reactivos.

Palabras clave: Tecnosoles "a la carta", recuperación ambiental

Abstract— Environmental impacts caused by the construction of a civil engineering project were studied. This research was conducted in an area characterized by the presence of materials pizarreños located northwest of Spain, in the Autonomous Community of Galicia. Specifically the Cantabrian highway A8 is studied. Direction San Sebastián to Santiago de Compostela, on the stretch of Vilamar - Barreiros. The results of a pilot trial for the recovery of the focuses of acidification by applying Technosols "a la carte" as well as the formation of reactive wetlands is also included.

Palabras clave: Tehcnosols "a la carte", environmental restoration

I. INTRODUCCIÓN

El presente es un análisis de las afectaciones ambientales que derivan en la acidificación de las aguas, producida por la ejecución de proyectos de Obra Civil, específicamente para la Autovía A8 del Cantábrico, de San Sebastián a Santiago de Compostela, tramo de Vilamar – Barreiros. Esta obra de construcción civil expone materiales ricos en sulfuros, que al oxidarse pueden producir aguas ácidas y la movilización de sulfatos, metales pesados y metaloides tóxicos. En Galicia, Noroccidente de España, esto se ha producido en muchas zonas en las que se han excavado y expuesto a la intemperie materiales como pizarras y anfíbolitas ricas en sulfuros metálicos. Inicialmente sus efectos son poco aparentes pero el paso del tiempo permite observar la acidificación de las aguas

de escorrentía y sobre todo la formación de precipitados ferruginosos.

El estado del arte al respecto de este problema de contaminación ambiental es nuevo, debido a que las construcciones cuentan con licencias ambientales de construcción durante su etapa, más no se realiza seguimiento de los riesgos de contaminación ni de las afectaciones.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

A. Geología de Galicia

La geología de Galicia tiene gran presencia de pizarras con muchas variantes debido a la composición de los distintos estratos. Entre los diferentes tipos de elementos que pueden llegar a ser movilizados con las explotaciones de pizarras se encuentran algunos potencialmente muy peligrosos, entre los cuales podemos destacar el Arsénico, Selenio, Vanadio, Níquel, Manganeso, Aluminio o Cromo, entre otros.

En la zona del proyecto, los materiales dominantes atravesados son pizarras, ampelitas y cuarcitas apareciendo en todos ellos minerales opacos como accesorios. Por tanto, llevan piritas con contenido alto de sulfuros metálicos que son susceptibles de oxidación. Estos minerales, una vez que son expuestos a la intemperie, experimentan rápidos procesos de oxidación, con una importante liberación de acidez que no es neutralizada por los minerales acompañantes.

B. Metodología

Se realizó un recorrido por la zona con observación visual, así como también una caracterización físico-química de muestras de aguas en la zona.

Como parte de la metodología se desarrolló una técnica para determinar el pH de oxidación y Cinética de acidificación en condiciones de oxidación forzada. Se utiliza el método propuesto por Urrutia et al., (1992) adaptado por Macías para los estudios de predicción del riesgo de acidificación en minas, obras civiles, etc. Se trata de una oxidación forzada con H₂O₂ al 30% (pH 5,5) midiendo el pH resultante a los 2 y 30 minutos y a 1, 2, 3, 4 y 6 horas estableciendo una cinética de oxidación.

El aparato empleado es de marca Crison, modelo micropH 2001.

Se determinó el Potencial de Acidificación Neto (PAN) a distintos valores de pH. Este procedimiento se fundamenta en la cuantificación del potencial de acidificación de residuos neto (PAN) de los residuos de rocas. Se realizaron disoluciones de equilibrio, en relación 1:20. A la roca se le añaden 20 ml HCl de 10 concentraciones diferentes, se deja en reposo para que se alcance el equilibrio durante 5 días y posteriormente, se valora la cantidad de sosa necesaria para alcanzar los valores de referencia pH de 3,5; 5 y 7. También se midió el porcentaje de S total y C en las muestras del material a ser tratado (roca), realizando un análisis elemental, por medio de la combustión catalizada a alta temperatura ($\geq 1000^{\circ}\text{C}$) y, la detección por infrarrojos del CO_2 resultante. El instrumento empleado fue de marca LECO, modelo SCDR-144.

Se registraron también la concentración de elementos potencialmente peligrosos en la muestra total, así como en lixiviado de equilibrio en condiciones de oxidación forzada. En el material con pizarras, se empleó el método de Absorción Atómica (AA), se distinguen dos grupos de medida: i) A la llama: Al, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn, con un instrumento de marca Perkin Elmer, modelo 1100B. ii) Cámara de Grafito: As, Cd y Sb. Para lo que se empleó un espectrofotómetro de marca Perkin Elmer, modelo 4110 ZL.

Los parámetros para la caracterización físico-química fueron el pH Según CEE (1991) en aguas y Guitián y Carballas (1976) en suelos. El aparato empleado es de marca Crison, modelo micropH 2001. Eh, con un instrumento de medida marca Hanna, modelo HI 9025. Mientras que para la CE se empleó Método (ASTM, 1994b), con un instrumento marca Crison modelo GLP 31.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo del proyecto se identificaron los siguientes procesos que afectan a la calidad ambiental del entorno.

A. Fase Oxidativa 1. Oxidación por O_2

La oxidación de los sulfuros se inicia a pH alto ($> 6,0$) por la acción del oxígeno disuelto en el agua.

- Se produce una oxidación, con liberación de protones que acidifican ligeramente el medio y producen una solubilización y pequeña movilización del Fe y del Al.
- Descenso lento del pH acelerándose la reacción. Se forman iones sulfato y se incrementa la conductividad eléctrica del agua que se carga en otros iones como Ca, Mg, etc.
- En esta fase en la que el agente oxidante es el O_2 del aire, los impactos son muchas veces apenas perceptibles, excepto por indicios como la coloración del fondo de las zonas por las que discurre el agua, tanto en cunetas y arroyos como en paredes laterales de las rocas (Fotografía 1).

B. Fase Oxidativa 2. Oxidación por Fe^{3+}

El pH sigue descendiendo, así cuando lo hace por debajo de 4,0 la reacción se acelera mucho (proceso no lineal, evolución

temporal exponencial) y comienzan a participar organismos biocatalizadores (Thiobacillus). Se forma Fe^{3+} catiónico pasando este elemento a ser al oxidante principal de la reacción. No se necesita el O_2 , de forma que aunque se cubran los materiales expuestos, la reacción no se paraliza al ser esta continuada por el Fe^{3+} y acelerada por los organismos catalizadores.



Fotografía 1.- Coloraciones típicas de la oxidación de materiales con sulfuros expuestos a la intemperie.

Se observan también precipitados de yeso y formación de compuestos de Aluminio (sulfatos hidroxisulfato y hidróxidos). Previo a la formación de Gibbsita se originan polímeros hidroxialumínicos de elevada toxicidad y adherencia (Fotografía 2).

Cinco características hacen de esta fase de la reacción extraordinariamente peligrosa para el medio ambiente:

1. Enorme liberación de ácidos que desestabiliza a todos los minerales, liberando sus componentes a la disolución en formas biodisponibles y de elevada movilidad.
2. Extraordinaria velocidad del proceso oxidativo, del orden de un millón de veces más rápida que la oxidación por O_2 .
3. Imposibilidad de pararla por enterramiento.
4. Tendencia al descenso del pH a valores entre 2 y 3 estabilizados por medio del tampón férrico (sólo organismos extremófilos pueden sobrevivir en tanto existan sulfuros en el sistema).
5. Reacción autosostenible.

C. Afectaciones al medio hídrico

Todas las aguas afectadas por estos procesos de acidificación originados en esta construcción, desembocan al río Masma, siendo esta zona de protección especial ambiental al estar catalogada como LIC (Lugar de Interés Comunitario) y ZEPA (Zona de Especial Protección para las Aves). Se encontraron aguas de carácter hiperácido ($\text{pH} < 3.5$), que de no realizar una actuación correctora, produciría un incremento exponencial del problema con consecuencias catastróficas para el medio:



Fotografía 2.- Precipitados con pH en torno a 5,0

D. Evolución de la acidificación en el tiempo

La forma en que se desarrolla y evoluciona el proceso de acidificación en un entorno depende de varios factores, entre ellos: meteorológico, edáfico e hídrico. Cuando existe escasez de agua seguida por un periodo de lluvia excesiva, se produce un fenómeno de lavado de la oxidación producida, de manera que el drenaje ácido de escorrentía se dirige hacia los cauces, lo que genera una sobrecarga de acidificación. Este proceso es el que genera grandes impactos en los sistemas acuáticos.

Para determinar cómo será el proceso de evolución de la acidificación, es importante determinar la fase en la que se encuentra el proceso de oxidación. Cuando el oxidante es el O_2 , el proceso y daños de desarrollan de forma relativamente lenta, sin embargo cuando el oxidante pasa a ser el Fe^{3+} , la velocidad de afectación se incrementa y llega a ser imparable. Sin importar el punto de evolución en el que se encuentre el proceso, la acidificación se desarrollará por alguna de las opciones intermedias entre ambos procesos oxidativos (Figura 1).

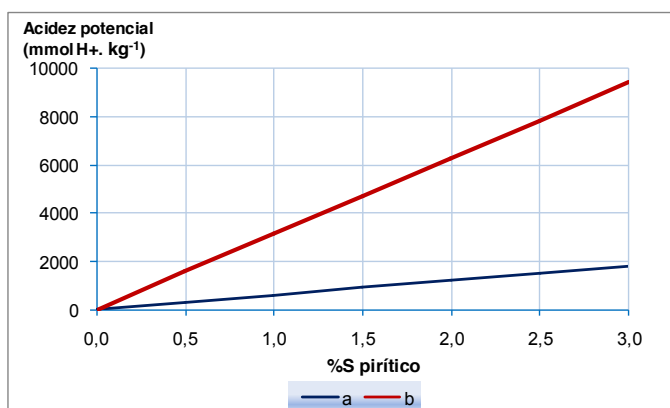
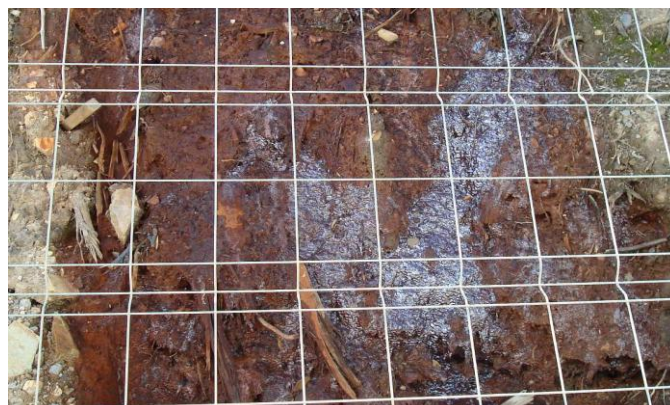


Figura 1.- Alternativas de evolución de oxidación

Por ello el problema debe ser abordado previo a que el oxidante sea el Fe^{3+} , porque este proceso no se detendrá hasta que la totalidad del S pirítico sea consumida o se elimine el oxidante. En este punto, la alternativa de cubrir el material para impedir el paso del O_2 del aire, sería inútil porque el agente de oxidación es parte de la composición del material.

E. Vertedero de Rechazos

El depósito de rechazos de las obras libera Fe por medio de los lixiviados ácidos, lo más probable es que la mayor parte se presente como Fe^{2+} o incluso complejos organoferrosos, los cuales en presencia de aire oxidan y forman precipitados de ferrihidrita. En los márgenes del vertedero existen precipitados de Fe, acompañados por arqueobacterias (Fotografía 3). Estas colonias son las que oxidan el Fe y el S.



Fotografía 3.- Lixiviados ácidos del vertedero y colonias de arqueobacterias extremófilas

En el extremo Suroeste del vertedero existe un cauce de agua que tiene precipitados de Fe. Estos precipitados tienen el color típico de la Ferrihidrita y Goethita, lo que muestra la movilización de Fe, que indica que el agua tiene $pH < 3.5$. Existen tuberías para drenaje transversal, las cuales también presentan precipitaciones de Fe en sus desembocaduras (Fotografía 4). El punto de vertido del vertedero se observa en la Fotografía 5.



Fotografía 4.- Desembocadura de drenaje transversal

F. Taludes y terraplenes

En las aproximaciones hacia la cimentación de los viaductos se han realizado terraplenes con material removido en la zona, al parecer no se ha contemplado que son pizarras y al estar expuestas al aire son de fácil acidificación, llegando a encontrarse precipitados de Fe, drenajes ácidos y signos de la oxidación de sulfuros.

Las zonas que presentan este tipo de afectación son: Terraplén (Fotografía 6), canalización de terraplén (Fotografía 7), Terraplén, donde también se observan precipitados con

formación de jarositas, conocidos como Yellow boys, indicadores de fuerte acidificación (Fotografía 8).



Fotografía 5.- Lixiviados ácidos del vertedero y colonias de arqueobacterias extremófilas



Fotografía 6.- Vista de terraplén con materiales de oxidación



Fotografía 7.- Vista de terraplén con materiales de oxidación

Existen también taludes que se dejaron con material expuesto, el cual tiene alto contenido de S, identificable por las pizarras negras los cuales son visibles. Se observa material que está en proceso de oxidación. Se debe mencionar que existen aguas de escorrentía a través de taludes con proceso de acidificación, las cuales se dirigen hacia un drenaje transversal, donde son visibles los efectos, como por ejemplo la ausencia de vegetación en la zona de descarga del drenaje transversal.

En la zona también se puede observar la formación de algas extremófilas, resistentes a estas condiciones de acidez.



Fotografía 8.- Yellow boys en terraplén

G. Afección a hormigón

El hormigón está compuesto por una mezcla de roca, arena, agua y cemento, este último contiene componentes de tipo alcalino como la Calcita o Portlandita, los cuales en un medio ácido son afectados por procesos de disolución debido a la acción de los protones. Este tipo de afección hace que se presenten poros en la superficie del hormigón, lo que facilita la degradación de su calidad.

La solubilización del Calcio hace que éste pase a Ca^{2+} que se puede movilizar con agua. Si en un entorno se tiene acidez y, debido a la oxidación de sulfuros, presencia de sulfatos la velocidad de reacción se incrementa debido a que el contenido cálcico de los hormigones reacciona con los sulfatos dando origen al $CaSO_4$ hidratado (yeso). Esta sal es más soluble que la calcita y fácil de movilizar por el agua de escorrentía, contribuyendo aún más a la degradación de la calidad del hormigón.

El efecto del yeso no queda ahí, debido a que en época seca se cristaliza y puede rehidratarse posteriormente, llegando incluso a aumentar su volumen anterior. Este proceso se realiza de forma cíclica y con disoluciones de elevada conductividad. La acción de acidez y ataque de sulfatos formados por el yeso tienen un efecto sinérgico que degrada cualquier material alcalino que tenga contacto con su disolución.

Los efectos de los drenajes ácidos son visibles en la cimentación del viaducto de Coira (Fotografía 9).



Fotografía 9.- Yellow boys en terraplén

En la Fotografía 10 se observan las pizarras con alto contenido de S pirítico, sin ningún tipo de recubrimiento ni separación respecto al hormigón que se encuentra a su lado. Este alto contenido de S representa un problema debido a que la cimentación está en la parte más baja de un corte y hacia ella llegarán aguas ácidas debido a la oxidación.



Fotografía 10.- Afectación al hormigón de cimentación

H. Plan de actuación recomendado y ensayo piloto

A continuación se describe un plan de acciones para la posible recuperación o mitigación de las afectaciones producidas por las obras de la Autovía A8 del. El procedimiento que se recomienda contempla el uso de Tecnosoles "a la carta" que contempla 4 etapas.

Se plantea la proyección y fijación de Tecnosol sobre la superficie del talud incluyendo la parte superior al ras de suelo natural. Un Tecnosol alu-ándico, con capacidad de neutralización de ácidos muy elevada, que se proyectó, en conjunto con semillas y un sistema de sostenimiento, esto en conjunto con la conducción de las aguas hacia zonas de mejoramiento de aguas solucionará el problema generado por los taludes. La instalación del Tecnosol se puede observar en la Fotografía 11 y los resultados de este ensayo de aplicación de Tecnosoles 6 meses después se muestran en la Fotografía 12 en la que la zona protegida sostuvo vegetación y no experimentó procesos de oxidación acidificante.



Fotografía 11.- Instalación del Tecnosol



Fotografía 12.- Tecnosol proyectado con semillas 6 meses después

Como se puede observar los resultados de la aplicación de Tecnosoles son evidentes, debido a que la superficie del talud que fue recubierta con Tecnosol tiene revegetación y ha neutralizado el proceso de acidificación y reducido la oxidación, mientras que junto a ella se puede observar una zona sin recubrimiento, sobre la cual no crece nada y en la que el proceso de oxidación se intensifica.

Los lixiviados del vertedero son una fuente de liberación de Fe, razón por la que se debe impermeabilizar, estabilizar y cuya superficie debe regenerarse, para lo cual se propone:

1. Retirar capa superior del material de vertedero y aplicar una capa de impermeabilización.
2. Instalar tuberías de difusión que contengan Tecnosol o provengan de agua que tenga contacto con Tecnosol, de forma que se neutralice la acidez producida.
3. Recubrir las paredes superficiales laterales con Tecnosol rico en nutrientes, en conjunto con semillas para revegetación.
4. Recogida y conducción de las aguas de escorrentía hacia un humedal para control, previo a su vertido hacia cauce natural.

Aquellas aguas que pasan por el vertedero o por los taludes con material expuesto, deben ser canalizadas hacia humedales de pequeñas dimensiones, en los que se pueda controlar la acidez por medio de la monitorización de sus condiciones rédox y el contacto con Tecnosoles diseñados para el efecto. Los humedales deben tener un Tecnosol hiperalcalino, en la zona de ingreso del agua, a continuación se acompañará de un Tecnosol reductor y otro rico en nutrientes. El tipo de vegetación que ayude al sistema serán los Juncos y Typhas. Se debe tener presente que el dimensionamiento del humedal permita que el tiempo de residencia del agua en el sistema sea el suficiente para permitir la precipitación del material en suspensión.

Se propone realizar obras de acondicionamiento para la protección de las zapatas de cimentación de aquellos viaductos en los que se evidencia la oxidación de sulfuros, estas obras deben evitar la acumulación de agua junto al hormigón. También se debe proteger las zapatas y pilares con un material

encalante y poco soluble, de manera que impida el paso de aguas ácidas hacia la estructura.

Los resultados encontrados reflejan que la falta de control sobre los procesos de oxidación de los materiales sueltos o no recubiertos, dan lugar a generación de aguas ácidas que pueden presentar concentraciones de riesgo en elementos potencialmente peligrosos

IV. CONCLUSIONES

Los proyectos de construcción de obra civil que conlleven movimiento de materiales con sulfuros, como el aquí estudiado, requieren de actuaciones urgentes y preventivas para controlar en sus fases iniciales la oxidación de los sulfuros, así como las condiciones que generan acidez y otros problemas ambientales.

La no actuación sobre los procesos de oxidación generan drenajes ácidos, que afectan al agua superficial que atraviesa por ellos y, que por canalización se lleva hacia cauces naturales, lo que genera impactos en todo el entorno edáfico, hidrológico y biota, tal como evidencian las fotografías mostradas.

AGRADECIMIENTOS

A SENESCYT Ecuador por mi beca predoctoral, al LTA-USC por el apoyo para el desarrollo del proyecto. A Carmen Pérez Llaguno por su trabajo en laboratorio.

REFERENCES

Calvo de Anta, R.; Macías, F. 1992 Procesos de alteración inducidos por actividades humanas en materiales con sulfuros de Galicia. 2.- Composición de las fases fluidas y tendencias de neoformación mineral. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología. Tomo 1: 262-271.

Macías, F.; Calvo de Anta, R. 1992. Procesos de alteración inducidos por actividades humanas en materiales con sulfuros de Galicia. 1.- Caracterización de los materiales originales y de los ambientes de alteración. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología. Tomo 1: 253-261.

Macías, F.; Calvo de Anta, R. 1992. Construcción de infraestructuras lineales en materiales con sulfuros. Un ejemplo de impacto ambiental sobre el medio acuático. II Simposio Nacional sobre Carreteras y Medio Ambiente. M.O.P.T. Las Palmas de Gran Canaria. pp. 53-61.