Párrafos Geográficos
ISSN 1853-9424

EFECTOS DE UNA ESCOMBRERA POLIMETÁLICA SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS ALEDAÑOS, LAGO FONTANA, CHUBUT.

Vicente, Fernanda Rocío; Valenzuela, María Fernanda.

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco - Comodoro Rivadavia.
E-mail: geofervalenzuela@gmail.com

Resumen

En las minas polimetálicas, la presencia de residuos generados (escombreras), con altas concentraciones de minerales de azufre (sulfuros de Cu, Zn, Pb, etc.), puede generar importantes problemas de contaminación de suelos, impactando la calidad de los alimentos y la salud del medio ambiente. El objetivo de este trabajo es analizar los posibles efectos de una escombrera asociada a una antigua mina polimetálica en las propiedades de los suelos aledaños. El área de estudio se corresponde con una mineralización polimetálica, denominada yacimiento Mina La Ferrocarrilera, ubicado en la margen Sur del Lago Fontana, Provincia de Chubut. Se describieron las propiedades morfológicas de 3 perfiles de suelos: perfil control (LF1), perfil a 1 m de la escombrera (LF2) y perfil a 80 m de la escombrera (LF3), y se determinaron las propiedades físicas y químicas, y la concentración total de algunos metales pesados (Cu, Zn, As y Pb). Los suelos son derivados de ceniza volcánica, de secuencia general Oi-A-Bw1-Bw2-C, con texturas gruesas, muy bien provistos de materia orgánica, pH moderado a fuertemente acido en LF1 y LF3 y muy fuertemente ácidos en LF2, alta CIC y no salinos. Las mayores concentraciones de Cu, Zn, As y Pb se encuentran en los horizontes superficiales de los perfiles LF2 y LF3, las cuales decrecen respecto a la fuente de origen. El Zn, Cu y Pb sobrepasan los niveles guía de calidad de suelos establecidos en Argentina por el Decreto 831/93, reglamentario de la Ley Nacional de Residuos Peligrosos Nº 24051/92. La disminución de pH en LF2, y la elevada concentración de metales pesados en LF2 y LF3 estarían dadas por la generación de drenaje ácido de la escombrera y su dispersión hacia al suelo a través de escurrimientos superficiales.

Palabras clave: Ceniza volcánica - Drenaje ácido - Metales pesados - Contaminación de suelos.

THE EFFECTS OF A POLIMETALIC MINE DUMP ON THE SURROUNDING SOILS, FONTANA'S LAKE, CHUBUT.

Abstract

In polymetallic mines, the presence of waste generated (mine drumps), with high sulfur minerals concentrations (sulphides of Cu, Zn, Pc, etc.), may generate important soil contamination problems, impacting the quality of food and the health of the environment. The aim of this paper is to analyze the possible effects of a dump, associated to an old polymetallic mine, in the properties of the surrounding soils. The study area is a polymetallic mineralization, called "Mina La Ferrocarrilera" deposit, located on the southern margin of Fontana's Lake, Province of Chubut. The morphological properties of three soil profiles were described: a control profile (LF1), a 1 m from the mine dump profile (LF2) and a 80 m from the mine dump profile (LF3); and there were determinated physical and chemical properties, and the total concentration of some heavy metals (Cu, Zn, As and Pb). The soils are derived from volcanic ash, with a general sequence Oi-A-Bw1-Bw2-C, coarse textures, very well provided of organic material; the pH is from moderated to strongly acid in LF1 and LF3 and very strongly acid in LF2, high CIC and no saline. The highest concentrations of Cu, Zn, As and Pb are in the shallow horizons of LF2 and LF3 profiles, and they decrease meanwhile the distance from the mine dump increase. The concentrations of Zn, Cu and Pb exceed the established guide levels in Argentina by the Regulatory Decree N° 831/93 of the National Law on Hazardous Waste N° 24051/92. The decrease of pH in LF2 and the high

concentration of heavy metals in LF2 and LF3 are generated by the acid drainage from the mine dump and its scatter towards the soils through surface runoff.

Keywords: Volcanic ash - Acid drainage - Heavy metals - Soil contamination.

Introducción

A pesar de ser la minería una actividad extractiva de fuerte impacto sobre el medio ambiente, no existió en la Argentina ningún tipo de regulación ambiental específica hasta la década de los 90´ (Rack, Valenzuela, Nillni, Do Campo y Ferro, 2017).

Los derechos ambientales recién son incorporados en la nueva Constitución Argentina de 1994, en donde también se abandona el principio de soberanía de la Nación sobre los recursos del subsuelo, trasladándole a las provincias la decisión sobre la manera de explotarlos (Art. 41 y Art. 124. Constitución de la Nación Argentina, 1994). En ese momento, y con motivo de promocionar la actividad minera, se reformó el Código de Minería en 1997 por la Ley Nacional Nº 24.585 (Protección ambiental para la actividad minera) en la que se incorporan artículos vinculados a la protección del ambiente (Catalano, 1997).

Esta reforma impulsó el desarrollo de la gran minería metálica (oro, plata, plomo, etc.), pero trajo aparejada la resistencia de muchas poblaciones del interior del país que se oponen a esta actividad extractiva por las fuertes consecuencias ambientales. Ésta percepción tiene que ver con el pasivo ambiental que la actividad minera a lo largo del tiempo ha legado a las generaciones actuales y futuras (Barettino, Martínez Pledel, Arranz y Alberruche, 2003).

En la actualidad existen numerosos estudios a nivel mundial sobre los problemas de contaminación a causa de las actividades mineras (EPA, 1996; Romero, Armienta y González Hernández, 2007; González Díez, López Pérez y Romero Baena. 2008).

En Argentina, el desarrollo de la industria minera, sobre todo la explotación de minerales metalíferos tales como el oro, la plata y el cobre, originan efectos negativos sobre el medio físico, biológico y antrópico (Barri et al., 2013).

Una vez finalizada la explotación de los yacimientos minerales por parte de las empresas mineras, se produce el abandono (o cierre) de la mina. Estas minas abandonadas, en la mayor parte de los casos, no se restauraron, transformándose en un pasivo ambiental minero (PAM), que se evidencia por la modificación de la topografía, creación de zonas con fuerte pendiente susceptibles de ser erosionadas, la denudación superficial de la cubierta edáfica, disminuyendo de esta manera la capacidad de uso de los suelos (Blanco Fernández, Pardo Fabregat, Meseguer Costa, Sanfeliu Montolio y Gallardo Izquierdo, 2011). En general, no se tiene en cuenta el costo medioambiental, social y económico que dicha acción genera (Oyarzún, Higueras y Lillo, 2011; Diosdanis, Lacaba y Torrens, 2003).

Asimismo, la presencia de los residuos generados (escombrera), con altas concentraciones de minerales de azufre (sulfuros de Cu, Zn, Pb, etc.), puede generar importantes problemas de contaminación de suelos (Gómez Orea, 2004) debido a que tardan de varias decenas a miles de años en reducir su volumen al no poder ser degradados (Rueda Saa, Rodríguez Victoria y Madriñán Molina, 2011). Estas escombreras, en ambientes de elevadas precipitaciones (mayores a 1000 mm), presentan pH ácido, alto contenido de metales pesados, bajos contenidos de C, N y bases (Álvarez, Fernández Marcos, Fernández Sanjurjo y Vaamonde, 2003; Rack et al., 2017).

La dispersión de los metales pesados de las escombreras, a través de los escurrimientos superficiales, hacia otros compartimientos ambientales (suelo, agua, aire), dependerá de las precipitaciones del área en donde se encuentran y de la mineralogía de los yacimientos minerales explotados (Romero, Armienta, Gutiérrez y Villaseñor, 2008.).

Estos metales tienden a acumularse en los horizontes superficiales de los suelos aledaños, quedando disponibles para las raíces de las plantas. Cuando las concentraciones de estos metales en el suelo son excesivas, éstas impactan en la calidad de los alimentos y la salud del medio ambiente (Gulson, Mizon, Korsch y Howarth, 1996). La movilidad y disponibilidad de los metales, en distintas profundidades del perfil del suelo, depende no sólo de su especiación química, sino de una serie de propiedades de los suelos, como pH, coloides y capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Galán y Romero, 2008; Colombo, Mangione y Figlioglia, 1998).

El suelo, a lo largo del tiempo, reacciona ante los diferentes tipos de degradación a los que está expuesto. Esto se debe a que el suelo es un sistema complejo capaz de amortiguar los efectos negativos de un determinado contaminante, pero cuando se supera esa capacidad de amortiguación o almacenaje para uno o varios contaminantes, pasa de ser un sistema protector a ser causa de problemas para el agua y/o los seres vivos (Rodriguez Oroz, 2011).

En la Región Patagónica también se evidencia esta problemática, en particular en la Provincia de Chubut, en donde las actividades extractivas han producido un fuerte impacto sobre el ecosistema afectando el suelo, la vegetación, la fauna, el paisaje y los procesos ecológicos (Ciano, Nakamatsu, Luque, Vicente y Lisoni, 2003; Valenzuela, Ferro, Rizzuto, Arce y Rack, 2014).

Si bien en la provincia de Chubut está en vigencia la Ley Provincial XI-Nº 15 (1995), que obliga a restaurar el espacio natural afectado por labores mineras una vez que ha cesado la explotación, en la mayoría de los casos los pasivos ambientales de las minas polimetálicas explotadas en la provincia con anterioridad a esta legislación, no fueron gestionados,

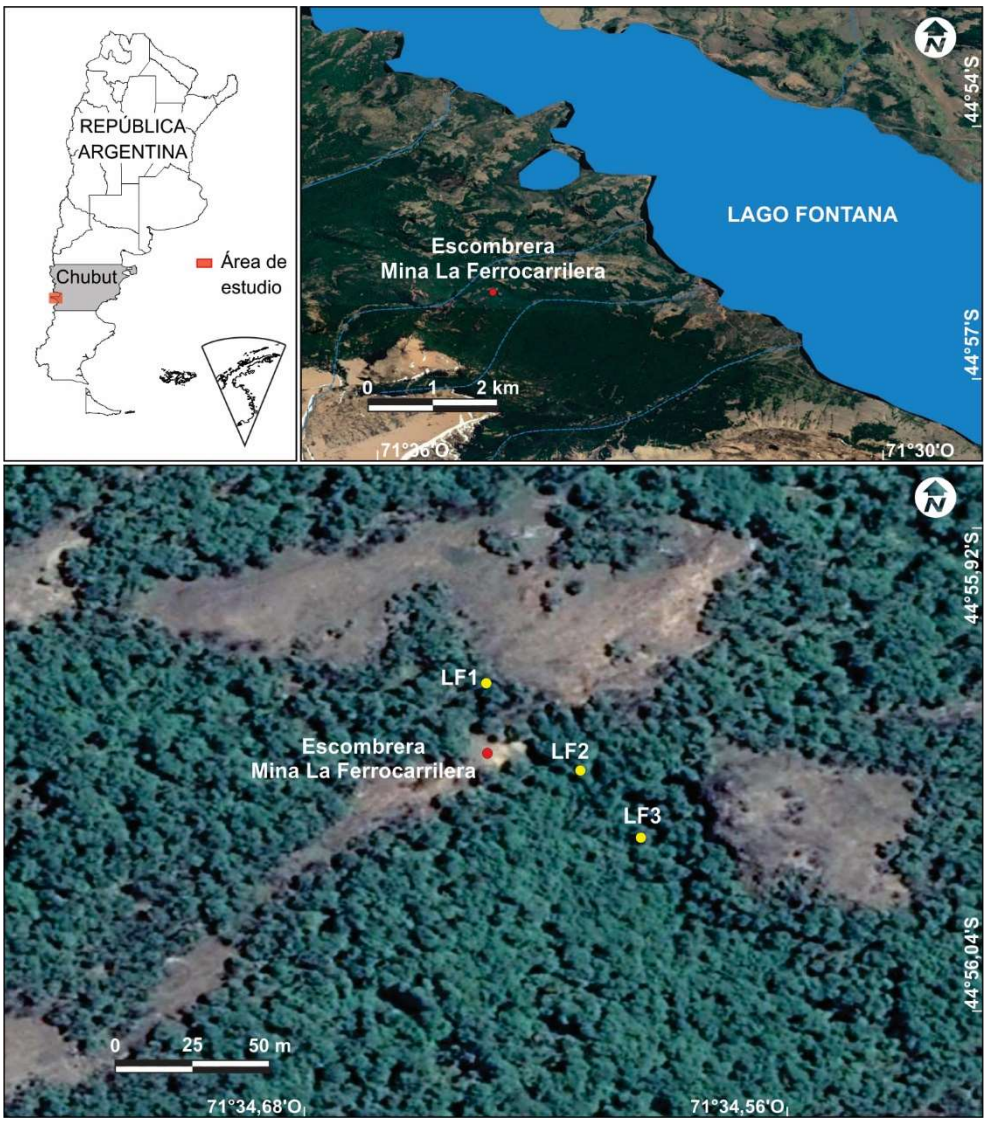
pudiéndose citar: Mina Huemules (Esquel), Mina La Ferrocarrilera (Senguer) y Mina Stella Maris, antiguamente denominada Calafate (Lonco Trapial) (Rack et al., 2017).
El objetivo del trabajo es analizar los posibles efectos de una escombrera polimetálica de la mina La Ferrocarrilera sobre las propiedades de los suelos aledaños, en Lago Fontana, Chubut.

Materiales y métodos

Área de Estudio

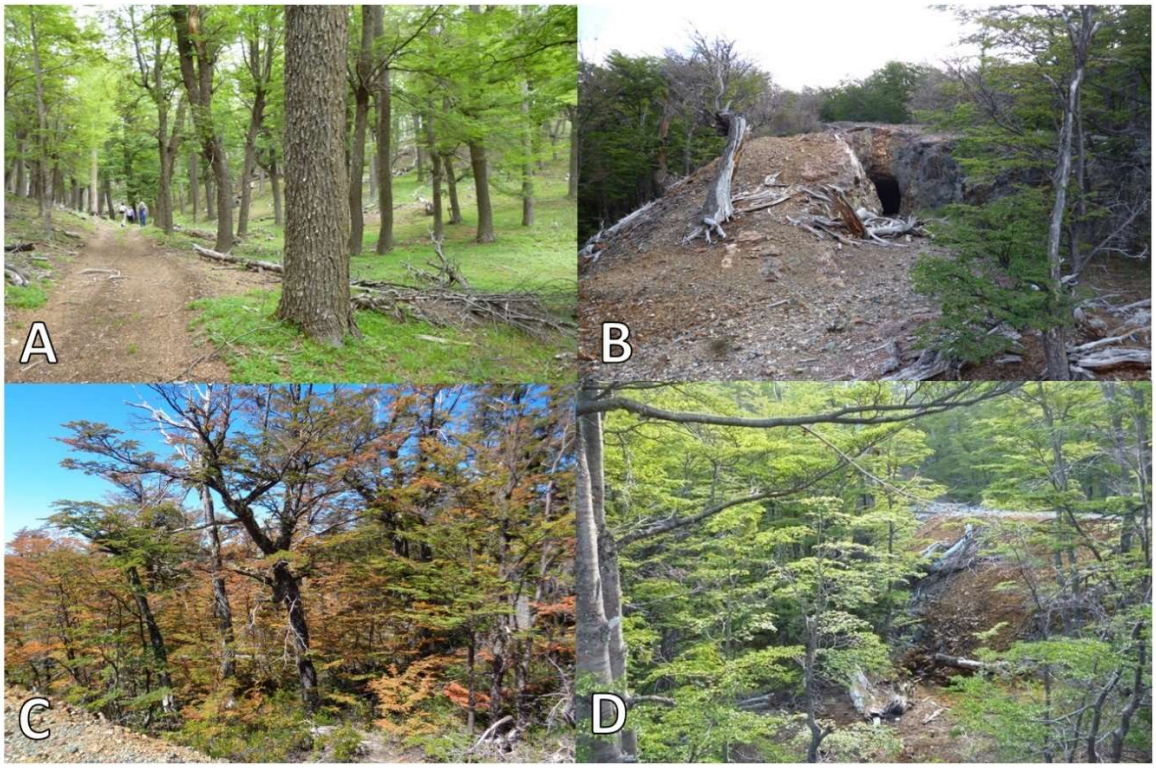
El área de estudio se corresponde con una mineralización polimetálica, denominada yacimiento Mina La Ferrocarrilera. Este antiguo yacimiento, está ubicado en la margen Sur del Lago Fontana, Provincia de Chubut; y se accede al mismo desde Alto Río Senguer por la ruta 21 hasta la hostería Ciervo Rojo, desde allí se continúa por una huella minera que permite llegar a varias manifestaciones de este yacimiento. El afloramiento en estudio se encuentra a 44°55´58¨S y 71°34´39¨W, consta de una galería y su escombrera asociada (Figuras 1 y 2).

Figura 1. Área de estudio.



Fuente: elaboración propia a partir de imágenes obtenidas del programa Google Earth Pro 28/11/2019.

Figura 2. Vista del Yacimiento Mina La Ferrocarrilera.



Fuente: relevamiento propio de trabajo de campo.
Ref.: A: Camino hacia el área de estudio. B: Escombrera y galería. C: Bosque nativo. D: Bosque nativo y escombrera de fondo.

El ambiente geológico en que se emplaza la mineralización está caracterizado por andesitas y tobas andesíticas de la Formación Lago La Plata. La morfología del yacimiento es vetiforme, y presenta asomos discontinuos a lo largo de casi 6,5 kilómetros. La mineralización consiste en galena, blenda, con calcopirita y pirita subordinada, y con menor frecuencia aparece arsenopirita. La ganga está constituida por cuarzo lechoso en cristales bien desarrollados; hay además amatista en guías delgadas, calcedonia y escasa calcita. Distintos autores han clasificado a estas mineralizaciones epigenéticas como sistemas epitermales de una edad incierta aunque posjurásica (Ramos, 1981; Lapido y Márquez, 1999).

El yacimiento Mina Ferrocarrilera fue descubierto por el Sr. Muzzio en 1938; luego entre 1940 y 1948 distintas empresas iniciaron una exploración del mismo, las cuales realizaron los laboreos visibles en la zona, y posteriormente la mina fue abandonada (Ramos, 1981).

El pasivo ambiental más relevante, después de más de 60 años de abandono del yacimiento, está representado por la presencia de una escombrera, que presenta un talud con pendiente de 45° de exposición SW. La misma presenta un pH muy fuertemente ácido de

4,09. Las concentraciones de Cu (448 µg/g), Zn (10302 µg/g), As (540 µg/g) y Pb (2419 µg/g) superan los niveles guía de calidad de suelos establecidos en el Decreto Reglamentario N° 831/93 de la Ley N° 24051/92 de Residuos Peligrosos en la República Argentina (Rack et al., 2017). La escombrera no presenta cobertura vegetal y se encuentra rodeada por un bosque de *Nothofagus pumilio* (Figura 3).

Figura 3. Escombrera del área de estudio.

Fuente: relevamiento propio de trabajo de campo.

El clima es templado húmedo y frío, y si bien no se cuenta con registros pluviométricos en la región, hay datos parciales correspondientes a la estación Lago Fontana, que se encontraba ubicada en las adyacencias de la mina La Ferrocarrilera. Entre los años 1946 y 1948 se registraron alrededor de 800 mm de media anual, notándose grandes variaciones en la precipitación mensual de un año a otro (Ramos, 1981).

Los suelos son derivados de cenizas volcánicas y el régimen de humedad de los suelos es údico (Colmet Daage F., Mazzarino M. J., Lanciotti M. L., 1993). La vegetación está representada por *Nothofagus pumilio* y un sotobosque de *Berberis serrato-dentata*, *Maytenus disticha*, y *Poaceae* "gramínea" (Rack et al., 2017).

Métodos

Muestreo de suelo

Se describieron las propiedades morfológicas de 3 perfiles del suelo según el Field book for describing and sampling soils (Schoeneberger, Wysocki, Benham y Broderson, 2012); el primero se realizó en un área aledaña, no afectada por la explotación minera, como control (LF1), y los dos restantes, a 1 m (LF2) y 80 m (LF3) de la escombrera, en sentido del escurrimiento superficial del agua (Figura 1). El muestreo se realizó por horizonte y los perfiles fueron clasificados a nivel de Gran grupo según el Soil Survey Staff (2014).

Caracterización de las propiedades físicas y químicas de los suelos

De los 12 horizontes que se reconocieron en los 3 perfiles, solo se analizaron 9 (horizontes A, Bw1 y Bw2), debido a que en éstos se producen los procesos de eluviación e iluviación de sustancias en el suelo (ganancias y pérdidas). Los horizontes C, corresponden al material originario del suelo, y son los que no han sido alterados por procesos pedogenéticos.

A cada muestra se le realizó las siguientes determinaciones analíticas en laboratorio: pH en agua (1:1) por vía potenciométrica (Bailey, 1943), textura (Bouyoucos, 1927), conductividad eléctrica (Allison, 1980), materia orgánica (Walkley y Black, 1934), bases de intercambio (Schollenber y Simon, 1945) y CIC (SAGPyA, 2004). Para caracterizar el grado de intemperización de la ceniza volcánica se realizó el pH FNa (Fieldes y Perrot, 1966),

Por otra parte, a las mismas muestras, se le determinaron las concentraciones totales de Cu, Zn, As y Pb en el laboratorio del Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) por espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

Los niveles de metales pesados fueron cotejados con los niveles guía de calidad de suelos establecidos en la legislación Argentina para suelos de uso agrícola, uso residencial y uso industrial (Decreto N° 831/93, reglamentario de la Ley Nacional de Residuos Peligrosos N° 24.051/92), para evaluar la posible contaminación del suelo (Tabla 1).

Tabla 1. Niveles guía de calidad de suelos

Metal pesado	U.A. (1)	U.R. (2)	U.I. (3)
Cu (µg/g)	150	100	500
Zn (µg/g)	600	500	1500
As (µg/g)	20	30	50
Pb (µg/g)	375	500	1000

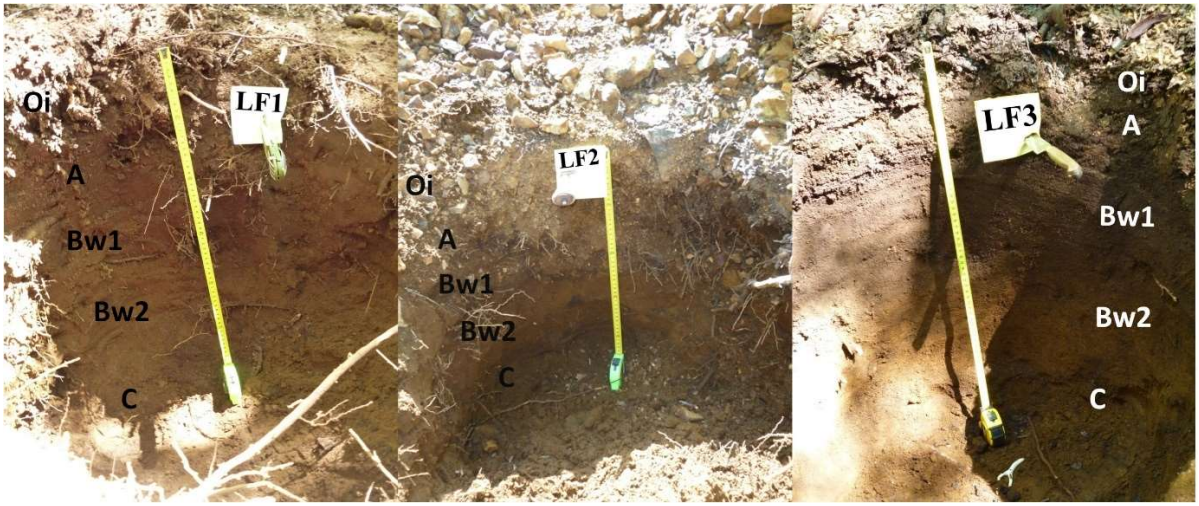
(1) Valores máximos para suelos de uso agrícola, (2) uso residencial y (3) uso industrial según el Decreto 831/93, reglamentario de la Ley Nacional de Residuos Peligrosos N°24.051 Argentina.

Resultados

Descripción morfológica de los perfiles de suelo

Los tres perfiles (LF1, LF2 y LF3) se encuentran sobre una pendiente de entre 10-15% con exposición al SW. Tienen una secuencia Oi-A-Bw1-Bw2-C, los colores varían de pardo a pardo amarillento y las estructuras son en bloques subangulares medios y moderados. El material originario es ceniza volcánica y se encuentran bien drenados (Figura 4). La cobertura vegetal en todos los perfiles es cercana al 50% y está compuesta por un bosque de *Nothofagus pumilio* y sotobosque de *Berberis serrato* y *dentata, y Chiliotrichum diffusu, Myoschiloso blongum, Senecio sericeonitens, Ribes magellanicum, Poaceae* "gramínea", *Phacelia sp. y Maytenus disticha.*

Figura 4. Perfiles de suelo de los sitios LF1, LF2 y LF3.

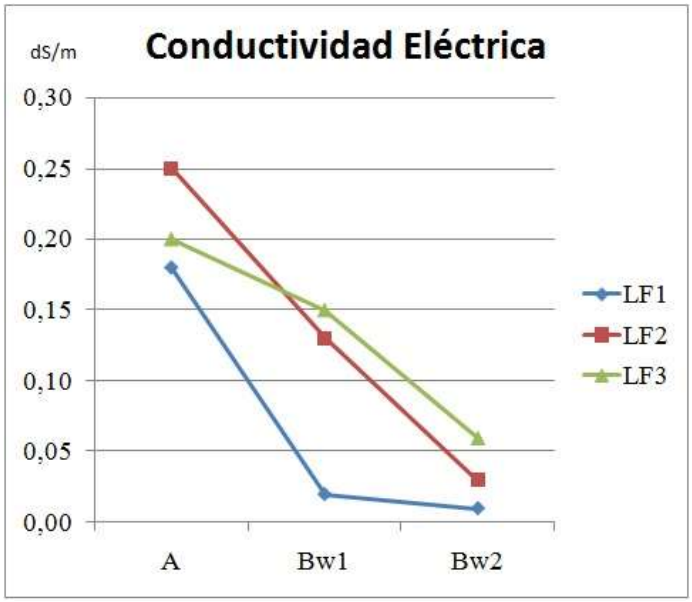


Fuente: relevamiento propio de trabajo de campo.

Propiedades físicas y químicas de los suelos

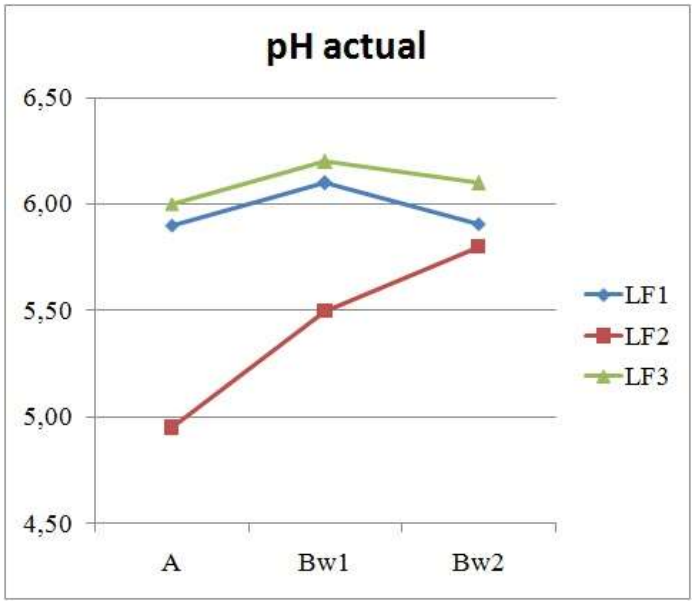
Las texturas de los horizontes son areno francas, variando solamente en el horizonte Bw2 del LF2 a franca arenosa. La conductividad eléctrica varía entre 0,01 y 0,25 dS/m (Figura 5), los valores de pH en agua (1:1) se encuentran entre 4,95 y 6,2 (Figura 6), y el porcentaje de materia orgánica en los horizontes A varía entre 13,1 y 21,5 % (Figura 7).

Figura 5. Valores de conductividad eléctrica en LF1, LF2 y LF3.



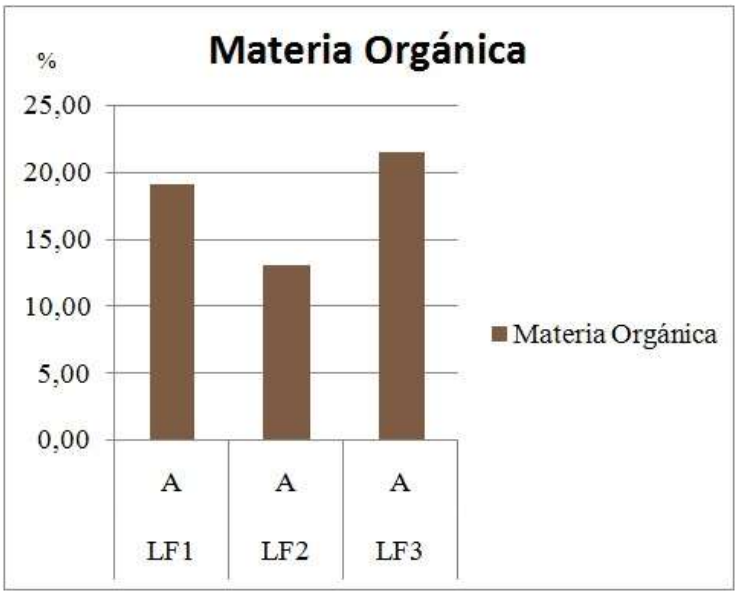
Fuente: elaboración propia

Figura 6. Valores de pH en LF1, LF2 y LF3.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Porcentajes de materia orgánica en los horizontes A en LF1, LF2 y LF3.



Fuente: elaboración propia.

Los valores del pH en FNa se encuentran entre 8,74 y 10,73 a los 2 minutos, y 9,79 y 11,30 a los 60 minutos. Con respecto a las bases de intercambio, el Ca presenta valores entre 6,00 y 28,50 meq/100 g, el Mg entre 0,50 y 8,00 meq/100 g, el K entre 0,10 y 1,90 meq/100 g y el Na entre 1,10 y 3,90 meq/100 g, registrándose los valores más bajos en profundidad del perfil. La CIC varía entre 41 y 56 meq/100 g (Tabla 2).

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de los perfiles.

Perfiles	LF1			LF2			LF3		
Horizontes	A	Bw1	Bw2	A	Bw1	Bw2	A	Bw1	Bw2
pH NaF 2´	9,00	10,35	10,20	9,16	10,32	10,53	8,74	9,86	10,73
pH NaF 60´	9,80	11,02	10,92	9,79	11,00	11,05	9,87	10,86	11,30
% arcilla	3,60	2,70	2,50	2,90	2,40	2,30	3,20	2,70	2,30
% limo	18,10	19,20	17,60	15,60	20,20	29,80	16,00	19,50	17,80
% arena	78,30	78,10	79,90	81,50	77,40	67,90	80,20	77,80	79,90
Ca (meq/100 g)	24,00	8,50	6,00	28,50	7,50	6,50	24,30	14,50	8,00
Mg (meq/100 g)	8,00	1,50	1,30	4,00	1,50	0,50	7,30	2,50	2,50
K (meq/100 g)	1,90	0,60	0,50	1,80	0,50	0,10	0,50	0,40	0,40
Na (meq/100 g)	2,20	1,10	3,90	3,70	3,60	3,50	1,40	1,10	1,60
CIC (meq/100 g)	56,00	47,00	41,00	51,00	51,00	50,00	53,00	51,00	50,00

Fuente: elaboración propia.

Determinación de la concentración de los metales pesados en el suelo

La concentración de Cu registró valores entre 11,40 y 119,20 µg/g, el Zn entre 77,80 y 3648,00 µg/g, el As entre 2,19 y 22,50 µg/g y el Pb entre 17,70 y 2443,00 µg/g (Tabla 3).

Tabla 3. Concentración de metales pesados en cada perfil

Perfiles	LF1			LF2			LF3		
Horizontes	A	Bw1	Bw2	A	Bw1	Bw2	A	Bw1	Bw2
Cu (µg/g)	18,50	18,60	36,00	119,20	11,40	31,30	54,70	36,40	27,30
Zn (µg/g)	188,00	77,80	83,40	3648,00	1151,00	274,00	970,00	586,00	255,00
As (µg/g)	4,30	7,90	14,90	22,50	10,20	13,90	2,19	2,22	2,28
Pb (µg/g)	32,00	17,70	33,40	2443,00	130,00	128,00	794,00	204,00	218,00

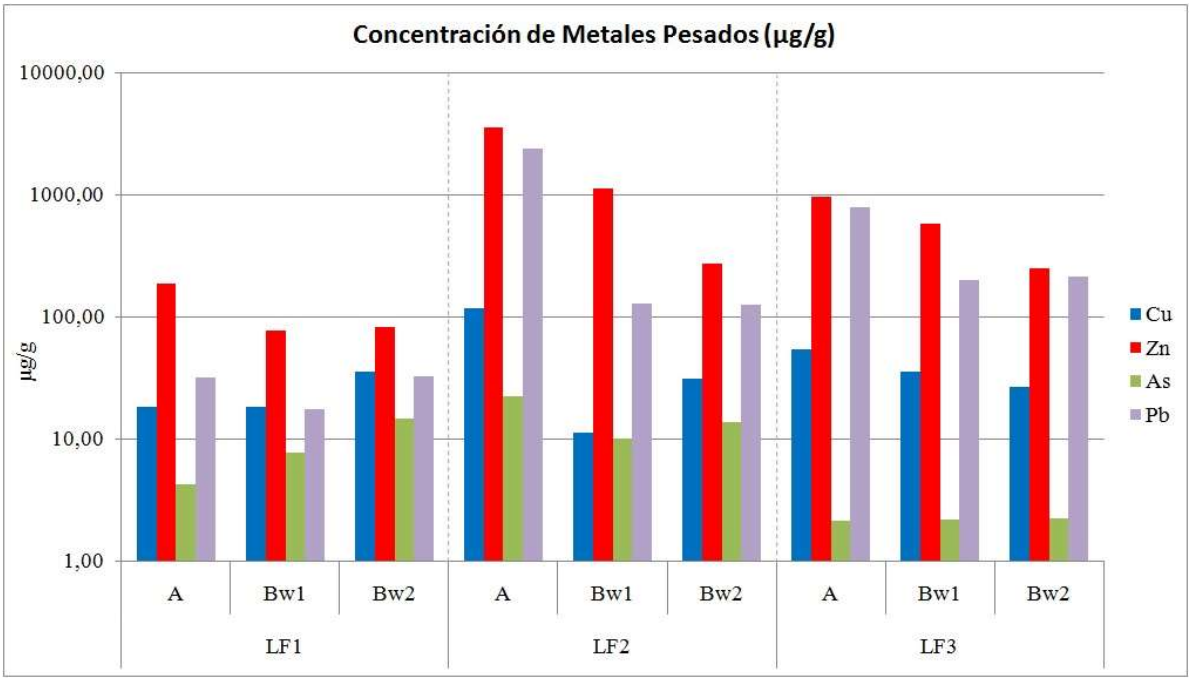
Fuente: elaboración propia

Las concentraciones más bajas de Cu, Zn, As y Pb se encuentran en el perfil control (LF1), en donde el Cu registró valores entre 18,50 y 36,00 µg/g., el Zn entre 77,80 y 188,00 µg/g., el As entre 4,30 y 14,90 µg/g, y el Pb entre 17,70 y 32,00 µg/g. Se registra un aumento de los mismos en profundidad, excepto el Zn que presenta la mayor concentración en el horizonte superficial.

Los valores más altos de Cu, Zn, As y Pb se encuentran en el perfil LF2 a 1 m de la escombrera. El Cu varía entre 11,40 µg/g y 119,20 µg/g, el Zn entre 274,00 y 3648,00 µg/g, el As entre 10,20 µg/g y 22,50 µg/g y el Pb entre 128,00 µg/g y 2443,00 µg/g. Las mayores concentraciones se encuentran en los horizontes A y disminuyen en profundidad.

Concentraciones intermedias se visualizan en el perfil a 80 m de la escombrera (LF3) en donde el Cu varía entre 27,30 µg/g y 54,70 µg/g, el Zn entre 255,00 µg/g y 970,00 µg/g, y el Pb entre 218,00 µg/g y 794,00 µg/g, estos tres elementos disminuyen su concentración en profundidad. El As pasa de 2,19 µg/g en superficie a 2,28 µg/g en profundidad, aumentando levemente su concentración en ese sentido (Figura 8).

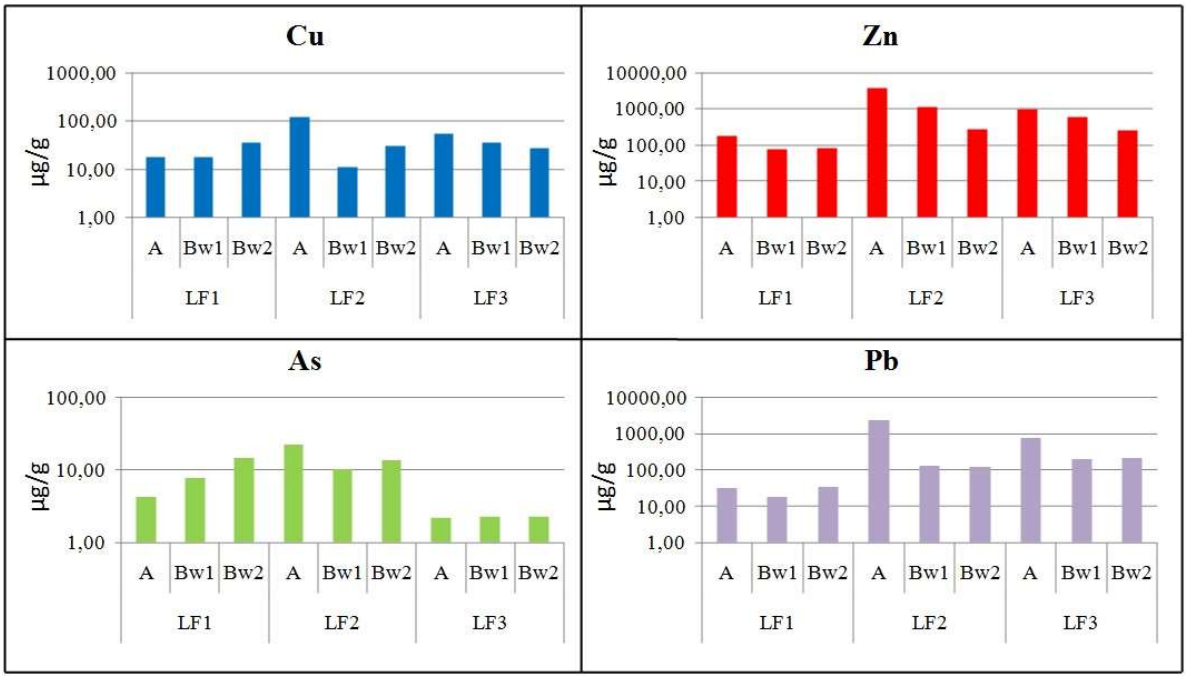
Figura 8. Concentración (µg/g) de metales pesados en los diferentes perfiles y por horizonte. Escala logarítmica.



Fuente: elaboración propia.

Analizando individualmente cada elemento pesado en relación a la distancia de la escombrera, en el horizonte A del perfil a 1m de la escombrera (LF2), se registraron mayores concentraciones de metales que en el perfil control (LF1) y el perfil a 80 m de la escombrera (LF3). El enriquecimiento de LF2 con respecto a LF1 fue de alrededor de 7 veces de Cu, 19 para el Zn, 5 para el As y 76 para el Pb. Con respecto al LF3, fue de 2 veces para el Cu, 4 para el Zn, 10 para el As y 3 para el Pb. En los horizontes Bw 1 y Bw 2 del LF2 también se registraron en general contenidos más altos de metales que en el LF1 y el LF3, pero los enriquecimientos son de menor magnitud (Figura 9 y Tabla 4).

Figura 9. Contenidos de Cu, Zn, As y Pb en el perfil control (LF 1), al pie de la escombrera (LF 2) y a 80 m de la escombrera (LF3). Escala Logarítmica.



Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Factores de enriquecimiento

	Factores de enriquecimiento LF2/FL1				Factores de enriquecimiento LF2/FL3			
	Cu	Zn	As	Pb	Cu	Zn	As	Pb
A	7	19	5	76	2	4	10	3
Bw1	-	15	1	7	-	2	5	-
Bw2	-	3	-	4	1	1	6	-

Fuente: elaboración propia

Discusión

Los perfiles de suelos estudiados son derivados de cenizas volcánicas y presentan una secuencia general Oi-A-Bw1-Bw2-C. Las texturas de los horizontes son gruesas, siendo en su gran mayoría areno francas, variando solamente en el horizonte Bw2 del LF2 a franca arenosa; estas texturas hacen que los suelos presenten un buen drenaje.

Los contenidos de materia orgánica en los horizontes A indican que están muy bien provistos. Los valores de conductividad eléctrica, inferiores a 0,9 dS/m permiten clasificar a estos suelos como no salinos. La CIC es muy alta en todos los horizontes.

El pH en agua en LF1 es moderadamente ácido en todos sus horizontes, en LF2 en el horizonte A es muy fuertemente ácido, en Bw1 fuertemente ácido y en Bw2 moderadamente ácido. En LF3 los pH fueron ligeramente ácidos en todos sus horizontes.

Los valores del pH en FNa en los 3 perfiles indican la presencia de imogolita en los horizontes A y alófano en los horizontes Bw1 y Bw2. Estas arcillas se forman en regiones con precipitaciones entre 800 y 1500 mm a partir de la meteorización química de la ceniza volcánica (andolización o alofanización) (Colmet Daage et al, 1988). La presencia de estas arcillas permite clasificar a estos suelos, según la Soil Survey Staff (2014), como Andisoles y dentro de estos, en el Gran Grupo Udivitrands, suelos ándicos con régimen de humedad údico y presencia de vidrio volcánico. Estos resultados coinciden con los encontrados por otros autores para zonas con iguales características climáticas y de material originario (Ortiz, 1976; Colmet Daage et al., 1988; Broquen, Girardin, y Frugoni, 1995; López, Colmet Daage y Planas, 1992).

Los valores de textura, pH en FNa, conductividad eléctrica, materia orgánica, CIC y bases en los 3 perfiles; y el pH en agua para el sitio LF1 y LF3, son similares a los reportados para suelos desarrollados sobre ceniza volcánica con régimen de humedad údico, que presentan minerales de tipo alumino-silicatos no cristalinos en la fracción arcilla, principalmente alófano, imogolita (Swindale., 1969; Besoain, 1985; Colmet Daage et al., 1988; López et al., 1992; Valenzuela, Irisarri, Ferro y Buduba, 2002).

Con respecto al perfil LF2, ubicado a 1 m de la escombrera, la disminución del pH (4,95 en el horizonte A) estaría relacionada con la generación de drenaje ácido de la misma, y su dispersión a través de escurrimientos superficiales (dispersión hídrica) en zonas lluviosas (Romero et al., 2008). El drenaje ácido se genera por la oxidación intensa de los sulfuros metálicos, que en el caso en estudio se corresponden a galena, blenda, calcopirita y pirita. El efecto neto de estas reacciones es la liberación de H+ que hacen que estas soluciones, en las cuales migran fácilmente la mayoría de los metales (Fe, Cu, Al, Zn, Pb, etc.) (Galán y Romero, 2008), presenten valores bajos de pH, que al transportarse, por escurrimiento superficial o subsuperficial, hacen descender intensamente el pH de los suelos aledaños (Weil Ray. y Brady Nyle, 2017).

Los valores de pH obtenidos en el perfil LF2 coinciden con los citados por Rack (2017) para otras manifestaciones del yacimiento La Ferrocarrilera; y con los encontrados por diversos autores para minas polimetálicas abandonadas en la Faja Pirítica Iberica (España) con precipitaciones entre 500 y 1200 mm, en donde los valores de pH más ácidos (5- 3,6) se

corresponden a muestras de suelo tomadas en las inmediaciones de la minas (González, López y Galán, 2006; Caliani y Briosco, 2008).

Analizando de manera individual los valores de Cu, Zn, As y Pb en los tres perfiles estudiados, y comparando con los niveles guía establecidos en el Decreto N° 831/93, reglamentario de la Ley Nacional de Residuos Peligrosos N° 24.051/92, se visualiza que la concentración de Cu en los perfiles LF1 y LF3 se encuentra por debajo de estos niveles para todos los usos, y en LF2 solo es apto para uso agrícola e industrial.

El As en los perfiles LF1 y LF3 se encuentra por debajo de los niveles guías considerados y serían aptos para todos los usos, mientras que los valores en LF2 hacen que el suelo no sea apto para el uso agrícola.

Respecto al Zn y Pb, se puede observar que el perfil LF1, se encuentra por debajo de los niveles guía de las normas argentinas y es apto para todos los usos. En el perfil LF2, las concentraciones de Pb superan los niveles guías establecidos en la legislación argentina y el perfil LF3 sería apto únicamente para uso industrial.

Las bajas concentraciones de Cu, Zn, As y Pb en el perfil LF1 son similares a las registradas para suelos derivados de ceniza volcánica en la región patagónica (Ruiz, Valenzuela y Ferro, 2011, Rack et al., 2017).

Las altas concentraciones de Zn y Pb en los horizontes superficiales de los perfiles LF2 y LF3, que exceden los umbrales de las normas mencionadas, y el decrecimiento drástico en profundidad, son indicativos de una contaminación antropogénica (Galán y Romero, 2008).

Esta elevada concentración, estaría dada por la generación de drenaje ácido de la escombrera (soluciones que presentan altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos disueltos), y su dispersión hacia al suelo a través de escurrimientos superficiales (Romero et al., 2008). La mayoría de los elementos pesados tienden a estar más disponibles a pH ácidos (Cruz-Guzmán Alcalá, 2007).

La disminución de la concentración de estos elementos en profundidad pueden responder a la distinta solubilidad de estos elementos frente las condiciones de pH del suelo, o a la adsorción entre estos elementos y los coloides presentes en la solución del suelo (Adriano, 1991; Garcia-Mitagaya, Cardenas y Page, 1986). En general los elementos pesados tienden a concentrarse en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores en muy pequeñas cantidades (Puga, Sosa, Lebgue, Quintana y Campos, 2006; Galán y Romero, 2006).

Analizando el comportamiento de los elementos pesados estudiados con respecto a la distancia de la escombrera, se encuentra una disminución de los mismos de LF2 (a 1 m de la

escombrera) a LF3 (a 80 m de la escombrera). Estudios realizados sobre contaminación de elementos pesados en México, en el área de influencia de una presa de jales (Puga et al., 2006), y en una antigua planta de fundición en donde se procesaban sulfuros de cobre provenientes de Minas Capillitas (Catamarca) (Do Campo, Valenzuela, Ferro y Duperrón, 2018), encontraron una disminución de estos elementos a medida que se aleja de la fuente de origen.

Conclusiones

Al comparar las propiedades morfológicas, físicas, químicas y la concentración total de metales pesados del suelo en el sitio control (LF1) y los perfiles LF2 y LF3 se observa que los principales efectos de la escombrera sobre los suelos aledaños, se corresponden con un descenso del valor de pH en el perfil a 1 m de la escombrera (LF2), y la elevada concentración de metales pesados en los perfiles LF2 y LF3.

Las mayores concentraciones de Zn, Pb, Cu y As se encuentran en los horizontes A de los perfiles LF2 y LF3, las cuales decrecen al aumentar la distancia a la escombrera. Las altas concentraciones de Zn y Pb en los horizontes superficiales de los perfiles LF2 y LF3 y el decrecimiento drástico en profundidad, son indicativos de una contaminación antropogénica.

En general las concentraciones totales de Cu, Zn y Pb en LF2 y LF3 sobrepasan los niveles guía de calidad de suelos establecidos en Argentina en el Decreto 831/93, reglamentario de la Ley Nacional de Residuos Peligrosos Nº 24051/92.

En base a los resultados obtenidos, y considerando que la contaminación por metales pesados en el suelo puede llegar a persistir cientos y miles de años, es de suma importancia valorar el riesgo ambiental de este pasivo ambiental; el cual está circunscripto a los sectores aledaños de la escombrera estudiada.

En futuras investigaciones sería recomendable determinar la presencia de metales pesados en las manifestaciones no explotadas en el área de estudio, y en los perfiles de los suelos aledaños, para poder definir con mayor precisión los factores de enriquecimiento causados por la escombrera.

Referencias Bibliográficas

Adriano, D.C. (1991). Metals from natural and anthropogenic sources. In: Adriano, D.C. (ed.) *Water, air, and soil pollution*. Kluwer Academic Publishers. 57-58: 699-675. Special volume: Metals in soils, waters, plants and animals.

Allison, L.E. (1980). *Diagnóstico y rehabilitación de Suelos salinos y sódicos.* Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. México: Editorial Limusa.

Álvarez, E., Fernández Marcos M.L., Fernández Sanjurjo, M.J., Vaamonde, C. (2003). Limitantes químicos para la revegetación de una escombrera de mina abandonada en Galicia- *Edafología*, Vol. 10 (1). 53-64.

Bailey, E. (1943). Soil Science, 55:143. En: Jackson M. L. (1970). *Análisis químico de suelos*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.

Barettino, D., Martínez Pledel, B., Arranz, J.C y Alberruche, E. (2003). Las bases para la integración de los recursos minerales en la ordenación del territorio: el Mapa de Ordenación Minero- Ambiental. En L. Martins y P. Carrión (Eds): *Integración de la minería en la Ordenación del territorio.* (139-152). Guayaquil, Ecuador: ESPOL-CYTED.

Barri, F., Giarracca, N., Hadad, G., Palmisano, T., Perlmuter, T, Rivas, A. I., Toledo López, V., Teubal, M., Wahren, J. (2013). *Actividades extractivas en expansión ¿Reprimarización de la economía argentina?* GER - GEMSAL. UBA. Ed. Antropofagia.

Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos.* San José. Costa Rica: IICA.

Blanco Fernández, D., Pardo Fabregat, F.; Meseguer Costa, S.; Sanfeliu Montolio, T. y Gallardo Izquierdo, A. (2011). *Restauración de una cantera de áridos mediante cambios de uso: extractivo-vertedero de residuos de construcción y demolición (RCD)-forestal. Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima.* 331-33.

Bouyoucos, G. J. (1927). The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Sci*. 23:343-353.

Broquen, P., Girardin, J.L. y Frugoni, M.C. (1995). Evaluación de algunas propiedades de suelos derivados de cenizas volcánicas asociadas con forestaciones de coníferas exóticas (S.O. de la provincia de Neuquén-R. Argentina). *Bosque* 16:69-79.

Caliani, J.C.F., y Briosco, C.B. (2008). Suelos contaminados por actividades mineras. In Geología de Huelva: lugares de interés geológico (p. 68). Universidad de Huelva.

Catalano, E. (1997). "Código de Minería comentado". Buenos Aires: Ed. Zavalía.

Ciano, N., Nakamatsu, V., Luque, J., Vicente, C. y Lisoni, C. (2003). Plan de abandono de canteras y picadas en la Cuenca del Golfo San Jorge – Patagonia Argentina. *Quintas Jornadas de Preservación de Agua, Aire y Suelo en la Industria del Petróleo y del Gas*. Mendoza.

Colmet Daage F., Marcolin A., López C., Lanciotti M., Ayesa J., Bran D., Andenmatten E., Broquen P., Girardin J., Cortés G., irisarri J., Besoain E., Sadzawka A., Sepúlveda G., Massaro S., Millot G. y Bouleau P. (1988). *Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera y precordillera del norte de la Patagonia.* Bariloche. Convenio INTA – ORSTOM. S. C. de Bariloche, Río Negro.

Colmet Daage F., Mazzarino M.J., Lanciotti M.L. (1993). Características de los suelos volcánicos en el S.O. del Chubut. *Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo,* Mendoza: 417 – 418.

Colombo L.D., Mangione S.B. y Figlioglia A. (1998). Soil profile distribution of heavy metals in soil atended with sewage sludge for eight years. Agr. Med. Inter. *J. of Agric. Sci*. 128: 273-283.

Cruz-Guzmán Alcalá, M. (2007). *La Contaminación de Suelos y Aguas, su Prevención con Sustancias Naturales.* Sevilla. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

Diosdanis, G., Lacaba, R.G y Torrens, R.B. (2003). The conservation of the geologic and mining heritage as means to reach the sustainable development. *Minería y Geología*. Nos. 3-4.

Do Campo, M., Valenzuela, M.F., Ferro, L. y Duperrón, M. (2018). Caracterización geoquímica de residuos mineros y suelos de una antigua planta de fundición (Ingenio Muschaka) ubicada en el distrito Choya, Andalgalá, Catamarca. *II Jornadas Internacionales de Ambiente y IV Jornadas Nacionales de Ambiente.* Tandil, Provincia de Buenos Aires.

EPA. (1996). *Managing Environmental Problems at Inactive and Abandoned Metal Mine Sites*. E.P.A./625/R-95/007

Fieldes, B. y Perrot, K. (1966). The nature of allophane in soils.part 3 – rapid field and laboratory test for allophane. *New Zealand Journal of Science* 9: 623 – 629.

Galán, H.E y Romero, B.A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía. Macla* 10. 48-60.

Garcia-Mitagaya, J., Cardenas, R., y Page, A.L. (1986). Surface Loading effect on Cd and Zn sorption by kaolinite and montmorillonite from low concentration solutions*. Water, Air and soil Pollution.* 27: 181-190.

Gómez Orea, D. (2004). *Recuperación de espacios degradados*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

González, I., López, M. y Galán, E. (2006). Contaminación por metales en suelos agrícolas afectados por la actividad minera de sulfuros polimetalicos (Faja Pirítica Ibérica). *Macla* 6. 245-248.

González Díez, I., López Pérez, M. y Romero Baena, A. (2008). Problemática de los Suelos Afectados por la Explotación de Sulfuros. *Macla* 10. 61-75.

Gulson B.L., Mizon K.J., Korsch M.J. y Howarth D. (1996). Non-orebody sources are significant contributors to blood lead of some children with low to moderate lead exposure in a mayor mining community. *The science of the total environment*. 181: 223-230.

Lapido, O.R., Márquez, M. (1999). Hoja geológica 4572-I/II, Gobernador Costa (1:250.000). Servicio Geológico Minero Argentino (inédita).

Ley Nacional de Residuos Peligrosos Nº 24.051 publicada en el Boletín Oficial del 17/01/92. Decreto Reglamentario de la Ley de Residuos Peligrosos Nº831/93 publicada en el Boletín Oficial del 3/05/93.

López, C., Colmet Daage, F. y Planas H. (1992). Características de los suelos de origen volcánico en la Cordillera Andino – Patagónica Latitud 43º 30' S. Argentina - Chile. *Actas V Jornadas Regionales de Suelos de la Patagonia*. Puerto Madryn, Chubut.

MAyCDS. Ministerio de Ambiente y Control del Desarrollo Sustentable. Empresas mineras y principales emprendimientos. Disponible en: http://www.chubut.gov.ar/Empresas-Mineras-y-principales-emprendimientos.pd./. Consultada el 9 de Febrero de 2019.

Ortiz, E. (1976). Materia orgánica y nitrógeno en suelos de Patagonia. *IDIA. Suplemento* 33: 79 – 83.

Oyarzún, R.; Higueras, P. y Lillo, J. (2011). Minería Ambiental: Una introducción a los impactos y su remediación. Madrid: Ediciones GEMM.

Puga S., Sosa, M., Lebgue, T, Quintana, C y Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*. 5(1,2)

Rack, M.G.; Valenzuela, M.F.; Nillni, A.M.; Do Campo, M. y Ferro, L.F. (2017). Presencia de metales pesados en un suelo aledaño a una escombrera polimetálica en mina La Ferrocarrilera, Lago Fontana. Chubut, Argentina. AIDIS ARGENTINA I *Ingeniería Sanitaria y Ambiental I* Nº 131. 81-85.

Ramos V.A. (1981). Hoja Geológica 47 ab - *"Lago Fontana"* Provincia de Chubut, Subsecretaria de Estado de Minería, Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires. Boletín 183. 140p.

Rodriguez Oroz, D. (2011). Caracterización de los suelos en una cuenca forestal: estudio de los contaminantes metálicos y su dinámica en el sistema edáfico. Navarra: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra.

Romero, F.M.; Armienta, M.A. y González-Hernández, G. (2007). Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead-zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. *Applied Geochemistry*, 22: 109-127 pp.

Romero, F.M., Armienta, M.A., Gutiérrez, M.E. y Villaseñor, G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 24 (2) 43-54.

Rueda Saa, G., Rodriguez Victoria, J.A. y Madriñán Molina, R. (2011). Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. *Acta Agronómica*. 60 (3). 203-218.

Ruiz, E.V., Valenzuela, M.F. y Ferro, L.F. (2011). Ausencia de Efectos del basural a cielo abierto de Esquel sobre las propiedades de los suelos aledaños. *Revista Párrafos Geográficos.* Volúmen 10 - Nro. 1: 516-531.

Schoeneberger, P.J.; Wysocki, D.; Benham, E.C. y Broderson, W.D. (2012). *Field book for describing and sampling soils*. USDA.

Schollenber, C y Simon, R. (1945). Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soil-ammnium acetate method. *Soil Sci.* 59: 13-25.

Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos*. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Décima segunda Edición.

Swindale, L. (1969). Las propiedades de suelos derivados de cenizas volcánicas. En *Panel sobre Suelos derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*, Turrialba, Costa Rica. B10. 1-9.

Valenzuela, F., Irisarri J., Ferro, I. y Buduba, C. (2002). Caracterización mineralógica de suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas en el Noroeste de la Provincia del Chubut. *Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Puerto Madryn, Chubut. Formato digital.

Valenzuela, F., Ferro, L., Rizzuto, S., Arce M.E. y Rack, M.G. (2014). Importancia de la conservación del suelo en actividades extractivas en Chubut. XXIV *Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Bahía Blanca.

Walkley, A. y Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci*. 37:29-38.

Weil Ray, R. y Brady Nyle, C. (2017). *The Nature and properties of soils* Pearson Education Limited.