

Caracterización del Suelo en un Desarrollo Habitacional Sobre Residuos Mineros de Pachuca de Soto, Hidalgo

Characterization of Soil in a Dwelling Development on Mining Wastes from Pachuca de Soto, Hidalgo

C. Contreras López^{a, c, *}, J. Hernández Ávila^b, E. Cerecedo Sáenz^b, M. Mercader Moyano^c, I. R. López de Juambelz^a

^a Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México.

^b Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^c Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, 41012, Sevilla, España.

Resumen

En la presa de jales “Santa Julia”, en Pachuca, Hidalgo, se desarrollaron equipamientos urbanos, por lo que el suelo tóxico queda expuesto. Se desarrolló un experimento factorial donde se realizó una caracterización física y química del suelo y una mezcla de éstos con concentraciones de abono orgánico y lombricomposta, con y sin vegetación, para determinar qué tipo condición es la más apto para desarrollar vegetación. Los resultados indican que la textura no cambia; en cuanto a la norma NOM-021-RECNAT-2000, el pH es alcalino con pequeñas variaciones; la materia orgánica aumenta, especialmente con la presencia de vegetación; N inorgánico, P, K y Na aumentan con los mejoramientos y la vegetación, no se detectó Mg; Cl, Cu, Fe y Mn, están en niveles normales, no se detectó Mo y Zn; para los metales pesados, conforme la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, se detectaron Ni, Ag, y Al en cantidades normales, Pb y Hg en cantidades altas, Pb presenta ligeros descensos en las muestras con vegetación.

Palabras Clave:

Caracterización, Suelos, Jales, Minería, Áreas Verdes Urbanas.

Abstract

In the waste mine dam of Santa Julia, in Pachuca, Hidalgo, urban facilities were built, so the toxic soil is exposed. A factorial experiment was carried out, a physical and chemical characterization of mining wastes was performed and a mixture of these wastes with concentrations of organic fertilizer and vermicomposting, were analyzed, with and without vegetation, to determine what kind of improvement soil is the most apt. The results indicate that the texture does not change. According to the NOM-021-RECNAT-2000 the pH is alkaline with slight variations. Organic matter increases with improvements and with presence of vegetation. N, P, K, and Na, extractable, increase with improvements and with the vegetation. Mg was not detected; Cl, Cu, Fe and Mn, are at normal levels, Mo was not detected and Zn present toxic levels. According to NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Ni, Ag, and Al, were detected in normal amounts, Pb and Hg, were detected in high amounts. Pb shows slight drops in samples with vegetation.

Keywords:

Characterization, Soils, Wasted Soils, Mining, Urban Green Areas.

1. Introducción

Pachuca de Soto, Hidalgo, es la ciudad minera más cercana a la Ciudad de México ya que se encuentra a solamente cien kilómetros de ésta; debido a esta proximidad recibió un especial interés en la búsqueda de metales preciosos, base de la economía

virreinal e independista y se transformó en el centro minero productor de plata más cercano a la capital de México, lo que facilitó la continuidad en la explotación de la plata por más de cuatro siglos (Saavedra Silva & Sánchez Salazar, 2007).

La industria extractiva de plata ha sido de gran importancia para el desarrollo del país y en específico para Pachuca, que tiene

*Autor para la correspondencia: christophercl@hotmail.com

Correo electrónico: christophercl@hotmail.com (Christopher Contreras López), herjuan@uaeh.edu.mx (J. Hernández Ávila), eduardoc@uaeh.edu.mx (E. Cerecedo Sáenz), pmm@us.es (M. Mercader Moyano), rocio.ldej@gmail.com (I. R. López de Juambelz)



antecedentes de extracción desde el siglo XVI y tuvo su auge en la primera mitad del siglo XIX y hasta la segunda mitad del siglo XX (Muro Ruiz, 2002). Sin embargo, además de las múltiples riquezas que ha dado la extracción de metales preciosos, esta industria ha dejado erosión en el suelo por la extracción de los minerales y la acumulación de desechos que son abandonados sin proceso alguno, conocidos como jales mineros (Hernández Ávila, 2012); estos residuos son el resultado del beneficio del material de extracción que se recoge con diferentes técnicas y se sitúan en presas al aire libre que son el lugar de su disposición final, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente (Contreras López, 2016).

Las técnicas usadas para el beneficio del material fueron: Beneficio de Patio, del siglo XVI hasta principios del XX, basado en la separación de los minerales mediante el uso de mercurio como vehículo de amalgamación, seguida y a la par de esta técnica, del XIX a inicios del XX, el beneficio del material por el método de Freiberg, que es derivado del sistema de patio (Ortiz Peralta, 1991); y durante siglo XX hasta la actualidad, se ha utilizado el beneficio a base de molienda-flotación-cianuración, que es utilizado por la alta capacidad del ion de cianuro para formar complejos de plata y oro (Hernández Ávila, 2012). Después de beneficiar el material, los residuos mineros se tiraron al río de las Avenidas, principal afluente de Pachuca, desde el siglo XVI y hasta principios del XX, esparciéndose en un área muy amplia en el valle, al sur de la ciudad; para 1912 se consideró conveniente almacenar los jales en presas, al sur del valle, en espera de un mejor momento en que las técnicas de beneficio pudieran recobrar la plata que contenían.

En 1924 se instaló en la hacienda de beneficio de Loreto, siguiendo el lecho del río, una tubería que llega a un sistema de bombeo que lleva los residuos a su destino final en el depósito denominado *Santa Julia*, este depósito se expandió de tal manera que para 1984, abarcaba 391 hectáreas con 65 millones de toneladas de residuos divididos en varias presas (Soto Oliver, 1982). Hasta 1970 los depósitos de jales se encontraban relativamente lejos de la ciudad, pero a partir de esta década la población comenzó a crecer y extendió su trama urbana hacia el sur, con dirección a la ciudad de México y los depósitos de residuos mineros. Después de los sismos en México de 1985 y hasta la fecha, se ha observado un crecimiento poblacional y de la trama urbana considerable, abarcando una conurbación con los municipios de Mineral de la Reforma, San Agustín Tlaxiaca, Zapotlán y Zempoala (Lorenzo Monterrubio, 1995); debido a este crecimiento, primero se rodearon y posteriormente ocuparon más de la mitad de los depósitos de jales con vivienda, infraestructura y equipamiento urbano. Dentro del equipamiento urbano que existe sobre los jales, se encuentran diversos espacios destinados para áreas verdes donde se dificulta el crecimiento de la vegetación, por lo que el suelo está expuesto y es removido por el viento, el polvo tóxico es perjudicial para la salud pública (Salinas Rodríguez, et al., 2016); por otro lado se han registrado cambios físicos y químicos en el suelo, como falta de materia orgánica y nitrógeno (N), que son indispensables para el desarrollo de la vegetación (Contreras López, 2017).

En este sentido, resulta imperante conocer las características físicas y químicas del suelo de los espacios destinados para áreas verdes sobre residuos mineros, por lo que se realizó la caracterización de los jales mineros y una mezcla de éstos con concentraciones de abono orgánico y lombricomposta, estas mezclas se analizaron sin vegetación y con la presencia de ésta, con el objetivo de determinar qué mezcla es la más apta para el crecimiento de la vegetación en estos espacios.

2. Diseño experimental

Se recabaron diferentes muestras de un experimento *in situ* en un espacio público destinado para área verde que es parte del camellón y glorieta de la avenida Nuevo Hidalgo, entre las calles Presa Jales Norte y Fomento Minero, en el Fraccionamiento Puerta de Hierro de la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo.

Primero se realizó un muestreo del suelo en el sitio por lo que se cavó un hoyo de un metro de altura y se extrajeron cuatro muestras del perfil de aproximadamente 1 kilogramo (kg), en 4 diferentes horizontes observados, esto con la finalidad de conocer el comportamiento del suelo del sitio sin tratamiento alguno; los horizontes del perfil se clasificaron en A que está de 70 a 100 centímetros (cm) de profundidad, B de 40 a 70 cm, C de 20 a 40 cm y D de 0 a 20 cm. Posteriormente se realizaron parcelas experimentales de 10.00 metros (m) de largo por 1.20 m de ancho, de las que se tomaron muestras de 1 kilogramo (kg) de tres mezclas del experimento factorial, la primera de jales del sitio al 100%, la segunda de una mezcla de los jales con una concentración de 5 kilogramos por cada metro cuadrado (kg/m^2) de lombricomposta y la tercera con una concentración de 8kg/m^2 de abono orgánico. Para finalizar, seis meses después se recolectaron muestras de las mismas tres mezclas, pero con presencia de vegetación. Cada muestra se recolectó completamente al azar de las parcelas experimentales mediante el programa "True Random Number Generator".

2.1 Materiales y métodos

Una vez recolectadas las muestras, se trasladaron al Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural del Programa de Maestría y Doctorado de la UNAM, se pesaron y secaron a la intemperie hasta alcanzar un peso constante; posteriormente se molieron, tamizaron en malla de 2 milímetros (mm) y se almacenaron en bolsas de papel kraft.

Se realizaron análisis físicos y químicos de todas las muestras, en los físicos, se determinó la textura por sedimentación y la densidad aparente se analizó por el método de probeta y se midió en gramos por cada centímetro cúbico (g/cm^3), en los químicos, se determinó el pH con potenciómetro, relación suelo agua 1:2 y la materia orgánica por el método de Walkey y Black y se midió en porcentaje (%); en cuanto a los macroelementos, N inorgánico fue extraído con una solución de cloruro de potasio 2 N y determinado por arrastre de vapor Kjeldahl, los resultados se dieron en miligramos por cada kilogramo (mg/kg), fósforo extractable se obtuvo por fotocolorímetro con el método de azul de molibdeno, con resultados en mg/kg, potasio y sodio extractables fueron extraídos con acetato de amonio 1 N, pH 7, relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de emisión de flama, con resultados en mg/kg. En cuanto a los oligoelementos y metales pesados, éstos fueron obtenidos en partes por millón (ppm) por fluorescencia de rayos X con espectrofotómetro XRF portátil. Cada una de las muestras se analizó con 8 repeticiones y se realizó una estadística, al final se concentró la información en una tabla para entender el comportamiento de cada mezcla de suelo analizadas.

Los resultados obtenidos se compararon contra las Normas Oficiales Mexicanas, NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos y se utilizaron para los análisis físicos, químicos y oligoelementos, además la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y

vanadio; así como de diferentes fuentes bibliográficas de análisis físicos y químicos de suelos, y materiales ecológicos.

3. Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados, tanto del perfil, en cada uno de sus horizontes; como de las parcelas experimentales con cada tratamiento, jales al 100%, y las mezclas de jales con lombricomposta y abono orgánico.

3.1 Resultados del perfil

Se caracterizó el perfil del sitio para entender el comportamiento del suelo de los espacios destinados para áreas verdes sobre residuos mineros, los resultados se muestran en Tabla 1.

Tabla 1: Análisis físicos y químicos del perfil

Análisis	M1	M2	M3
Físicos			
Textura	Franca	Franco Limo Arcillosa	Franco Arcillosa
Densidad aparente (g/cm ³)	1.35	1.41	1.34
Químicos			
pH	7.89	8.11	7.86
MO (%)	1.20	1.24	1.32
Macroelementos			
N (mg/kg)	6.50	8.80	7.00
P (mg/kg)	10.40	26.79	42.11
K (mg/kg)	554	614	860
Na (mg/kg)	344	322	372
CaO (ppm)	29,290	27,050	33,070
MgO (ppm)	-	-	-
S (ppm)	4,230	4,880	6,360
Oligoelementos			
Cl (ppm)	390	-	-
Cu (ppm)	540	440	360
Fe ₂ O ₃ (ppm)	41,860	43,070	42,420
MnO (ppm)	5,470	5,550	5,570
Mo (ppm)	-	-	-
Zn (ppm)	1,680	1,670	1,680
Ni (ppm)	40	40	40
Metales Pesados			
Hg (ppm)	390	410	400
Pb (ppm)	750	820	840
Ag (ppm)	180	180	160
Al ₂ O ₃ (ppm)	49,690	49,110	47,180

Los resultados para los análisis físicos fueron que, el estado ideal para un suelo es una textura franca, ya que tiene un mayor equilibrio entre sus componentes, que solo se encuentra en el horizonte C, para los horizontes A B y D, que tienden hacia la limosa o limo-arcillosa, pueden presentar problemas de aireación y circulación de agua, ya que este tipo de suelos presentan permeabilidad baja (Gisbert Blanquer, et al., 2010); en cuanto a la densidad aparente, los resultados concuerdan con relación a la textura de acuerdo a la Norma Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, para suelos minerales, estos parámetros son indispensables además, para el cálculo de riego (SEMARNAT, 2002).

Para los análisis químicos, el pH del horizonte A de 7.81, que es el más profundo, es el menor de todos y aumenta el pH conforme los horizontes son más altos, B de 7.88, C de 7.94 y D de 8.02, aunque todos estos resultados están dentro del rango de pH medianamente alcalino (SEMARNAT, 2002), por lo que podría reducirse la disponibilidad de todos los micronutrientes, sin embargo no excede el límite de 8.5, donde presentarían problemas físicos y químicos que restringirían el uso productivo del suelo (Rodríguez Fuentes & Rodríguez Absi, 2015). De acuerdo a los valores de referencia para suelos no volcánicos, como el estudiado en el presente trabajo, la materia orgánica (MO), para el horizonte más bajo y el más alto, A y D, es baja, para B y C es muy baja (SEMARNAT, 2002), que se relaciona con una mala estructura en el suelo y una mala capacidad de amortiguamiento a cambios y presencia de contaminantes, así como un inadecuado reservorio de agua y nutrientes (Contreras López, 2016).

En cuanto a los macroelementos, los resultados de N en todos los horizontes indican que los valores se encuentran en un rango muy bajo (SEMARNAT, 2002), lo que se relaciona directamente con la dificultad que tienen las plantas para desarrollarse, ya que N es esencial para la vida y es de gran importancia debido a su papel en los aminoácidos y las proteínas, incluidas las enzimas, los nucleótidos, el material genético, los pigmentos y otras sustancias (Allen, 1989). Para fósforo (P), en los horizontes A y C el rango es bajo, para B y D, es medio, la deficiencia de P puede retardar el crecimiento en la vegetación, las raíces se desarrollan poco y se produce enanismo en hojas y tallos (Hernández Gil, 2002). Los resultados para potasio (K) fueron aceptables y están en los rangos medio y alto. Para sodio (Na) todos los horizontes están en un rango alto, esto puede afectar negativamente a la estructura del suelo, impidiendo la formación de agregados, de forma que al disminuir la porosidad del suelo, éste se vuelve impermeable al agua y al aire (Garrido Valero, 1994). Calcio (Ca) y Azufre (S) son aceptables ya que se encuentran en niveles altos. No se detectó óxido de magnesio (MgO) en ningún horizonte, por lo que la deficiencia de este elemento en las plantas pudiera provocar una clorosis en hojas viejas, principalmente entre las nervaduras (Hernández Gil, 2002).

Para los oligoelementos, cobre (Cu), óxido de hierro (Fe₂O₃) y óxido de manganeso (MnO) se encuentran en niveles normales para todos los horizontes (SEMARNAT, 2002). Cloro (Cl) no se detectó en ningún horizonte, la deficiencia de este elemento puede provocar clorosis, marchitamiento de las hojas, seguida por un bronceado que finaliza en necrosis, además las raíces se vuelven enanas, pero gruesas o en forma de mazo cerca del ápice (Hernández Gil, 2002). El Molibdeno (Mo) está ausente en todos los horizontes, esto puede causar deficiencia, tanto en las plantas como para el desarrollo de microorganismos en el suelo (Contreras López, 2016); por otra parte, se puede reducir la fijación de N en plantas noduladas; los síntomas se caracterizan por una clorosis entre las venas, que ocurre primero en las hojas viejas, que luego progresa hacia las jóvenes (Hernández Gil, 2002). El níquel (Ni) está ausente en el horizonte A, que es el más bajo y en los demás horizontes presentan niveles bajos, la deficiencia menor de Ni no mostrará síntomas visuales, pero puede reducir el crecimiento y producción de plantas, una deficiencia mayor puede mostrar síntomas visuales, normalmente en las hojas viejas de las plantas, como clorosis y necrosis (Buechel, 2018). Zinc (Zn) presenta, para todos los horizontes, rangos muy altos lo que puede provocar toxicidad, los niveles apropiados son entre 20 y 300 ppm (Allen, 1989); para el perfil se presenta el menor rango en el horizonte D, que es el más alto y va en aumento conforme los horizontes son más profundos; los síntomas de toxicidad se manifiestan en el menor tamaño de las hojas, clorosis en las hojas nuevas y éstas con puntas necrosadas,

retraso en el crecimiento de la planta y/o crecimiento radicular reducido, con frecuencia Zn compite con P, F, Mn o Cu, para ser absorbido por la planta y provoca deficiencias de ellos en el tejido (Bloodnick, 2018).

En el perfil, se presentaron diversos metales pesados, los resultados muestran que para óxido de aluminio (Al_2O_3) y plata (Ag) los niveles de concentración están normales y no representan un riesgo para la salud humana ya que no exceden el rango para considerarlos tóxicos (SEMARNAT, 2007). Se detectó plomo (Pb) con resultados altos en todos los horizontes que revela toxicidad en el suelo, además se eleva la cantidad de Pb a más profundidad del perfil; la toxicidad por Pb es de interés, no solamente por la fitotoxicidad, sino porque al ser absorbido por las plantas, el elemento se mueve por la cadena alimenticia (Hernández Gil, 2002). Por otra parte, se detectó mercurio (Hg) en el horizonte D, que es el más alto y expuesto a la intemperie y sobrepasa por mucho los niveles permitidos, por lo que es considerado tóxico para la salud humana (SEMARNAT, 2007); el Hg puede afectar las reacciones de luz y oscuridad de la fotosíntesis, la exposición al Hg inorgánico reduce el índice mitótico en el meristema apical de la raíz y aumenta la frecuencia de aberraciones cromosómicas, que son directamente proporcionales a la concentración de Hg (Hernández Gil, 2002).

3.2 Resultados de los tratamientos en las parcelas experimentales

Se caracterizaron las parcelas experimentales, las cuales, como ya se mencionó, están compuestas por tres mezclas, la primera (M1) de jales del sitio al 100%, la segunda (M2) una composición de jales más una concentración de 5 kg/m² de lombricomposta y la tercera (M3) con una concentración de 8 kg/m² de abono orgánico. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2: Caracterización física y química de las parcelas experimentales

Análisis	M1	M2	M3
Físicos			
Textura	Franca	Franco Limo Arcillosa	Franco Arcillosa
Densidad aparente (g/cm ³)	1.35	1.41	1.34
Químicos			
pH	7.89	8.11	7.86
MO (%)	1.20	1.24	1.32
Macroelementos			
N (mg/kg)	6.50	8.80	7.00
P (mg/kg)	10.40	26.79	42.11
K (mg/kg)	554	614	860
Na (mg/kg)	344	322	372
CaO (ppm)	29,290	27,050	33,070
MgO (ppm)	-	-	-
S (ppm)	4,230	4,880	6,360
Oligoelementos			
Cl (ppm)	390	-	-
Cu (ppm)	540	440	360
Fe ₂ O ₃ (ppm)	41,860	43,070	42,420
MnO (ppm)	5,470	5,550	5,570
Mo (ppm)	-	-	-
Zn (ppm)	1,680	1,670	1,680
Ni (ppm)	40	40	40
Metales Pesados			
Hg (ppm)	390	410	400
Pb (ppm)	750	820	840

Ag (ppm)	180	180	160
Al ₂ O ₃ (ppm)	49,690	49,110	47,180

Por otra parte, se caracterizaron las mismas parcelas experimentales con las tres mezclas seis meses después de haber plantado diferentes especies vegetales, los resultados se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3: Caracterización física y química de las parcelas experimentales

Análisis	M1'	M2'	M3'
Físicos			
Textura	Franca	Franco Limo Arcillosa	Franco Arcillosa
Densidad aparente (g/cm ³)	1.29	1.20	1.19
Químicos			
pH	7.81	7.46	8.19
MO (%)	1.32	1.38	2.15
Macroelementos			
N (mg/kg)	8.80	12.30	10.50
P (mg/kg)	17.61	38.83	60.78
K (mg/kg)	568	610	958
Na (mg/kg)	416	394	544
CaO (ppm)	33,750	33,420	31,170
MgO (ppm)	-	-	-
S (ppm)	5,320	5,360	7,290
Oligoelementos			
Cl (ppm)	410	280	450
Cu (ppm)	520	420	380
Fe ₂ O ₃ (ppm)	41,970	43,040	42,950
MnO (ppm)	5,540	5,560	5,580
Mo (ppm)	-	-	-
Zn (ppm)	1,670	1,650	1,590
Ni (ppm)	40	40	40
Metales Pesados			
Hg (ppm)	390	410	380
Pb (ppm)	740	750	730
Ag (ppm)	100	140	100
Al ₂ O ₃ (ppm)	49,560	47,360	49,150

Una vez caracterizadas las parcelas experimentales se compararon las tres tablas mediante gráficas por cada análisis realizado y con estos resultados se determinó el comportamiento de las diferentes mezclas.

3.3 Comparativa de los suelos

En cuanto a la textura, para M1 es franca que coincide con el horizonte C del perfil, para M2 y M3 son franco limo-arcillosa y franco arcillosa, respectivamente y no cambian con la introducción de plantas, la textura ideal, como ya se advirtió, es el suelo con textura franca, por lo que para llegar al suelo ideal, se puede proporcionar arena al suelo y con esto se pudiera lograr una mejor aireación, además de una mejor permeabilidad (Gisbert Blanquer, et al., 2010). Para densidad aparente, todos los resultados, al igual que en el perfil, concuerdan con relación a la textura de acuerdo a la Norma Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, para suelos minerales, además de que con estos parámetros se calculó el riego de cada una de las parcelas experimentales (SEMARNAT, 2002).

Se puede observar que el pH (Figura 1) en los horizontes del perfil estuvieron en el rango de medianamente alcalinos, con valores cercanos a 8, se observó que entre D, M1 y M1' hubo una tendencia a la baja, para M2 y M2' se observó la misma tendencia pero con una diferencia más grande, en cambio M3 y M3' la tendencia fue a la alza; el aumento o disminución del pH depende

de varios factores, entre ellos, el pH del sustrato o del tratamiento, para este caso la lombricomposta y el abono orgánico, la alcalinidad del agua o la acidificación por las raíces de la planta (Barbaro, et al., 2014).

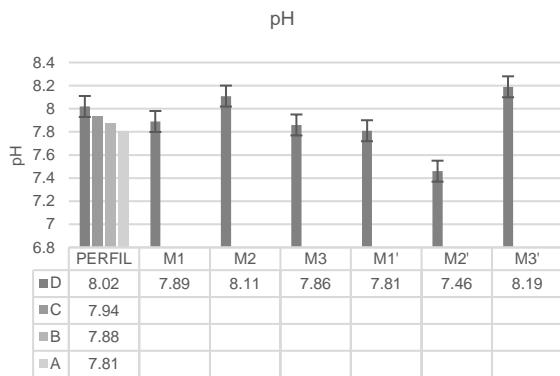


Figura 1: Comportamiento de pH en los suelos.

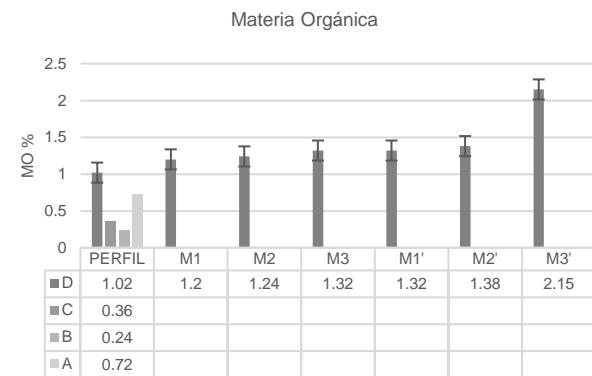


Figura 2: Comportamiento de MO en los suelos.

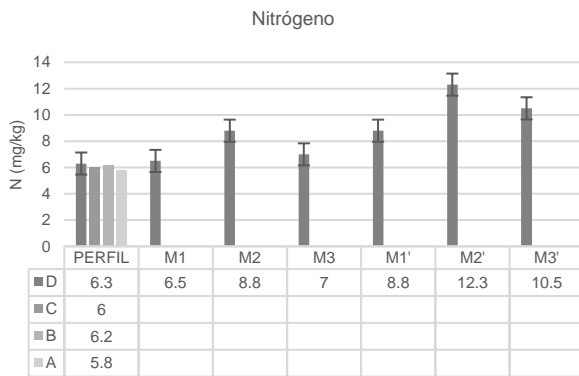


Figura 3: Comportamiento de N en los suelos.

Para el caso de MO en el perfil muestreado (Figura 2), el horizonte D es el que presentó mayor porcentaje de MO, en el caso de las parcelas experimentales se observó un aumento de MO en las que contienen concentraciones de lombricomposta y abono orgánico y el aumento fue mayor en las parcelas con vegetación, sin embargo, aunque es mayor la MO en todas las parcelas, la mayoría de resultados se encuentran en el rango bajo, excepto M3' que se encuentra en un rango medio (SEMARNAT, 2002) que fue la que presenta vegetación y una concentración de abono orgánico.

En cuanto a los macroelementos, para N inorgánico (Figura 3), se observa un aumento de éste elemento en las parcelas con concentraciones de lombricomposta y abono orgánico, y se eleva

más con la presencia de vegetación, sobre todo en M2' que fue la que se trató con lombricomposta, sin embargo, aunque existe un aumento de N inorgánico, la mayoría de las parcelas se encuentran en un rango muy bajo, excepto M2' y M3', que se encuentran en un rango bajo (SEMARNAT, 2002), por lo que se recomienda aumentar el nivel de las concentraciones, además de realizar otras medidas en posteriores siembras, para observar si continúa el aumento de N a un rango medio que se presenta entre los 20 y 40 mg/kg.

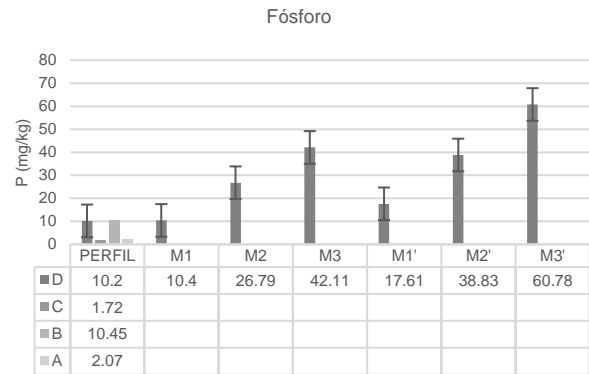


Figura 4: Comportamiento de P en los suelos.

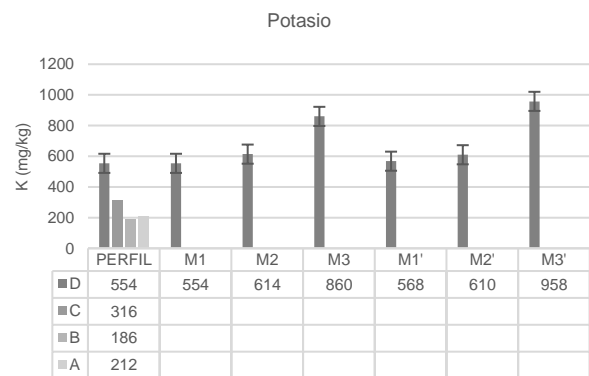


Figura 5: Comportamiento de K en los suelos.

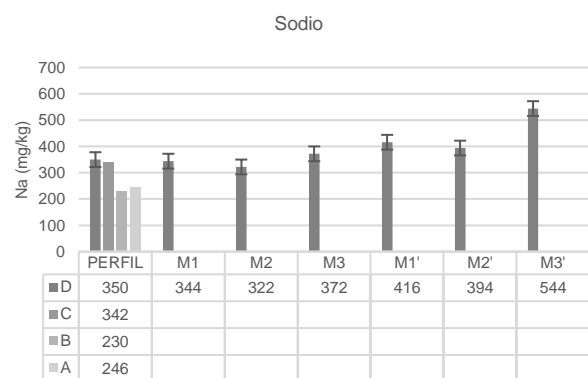


Figura 6: Comportamiento de Na en los suelos.

La tendencia en las parcelas con respecto a P (Figura 4) va en aumento, los resultados se encuentran en el rango bajo y medio en el perfil y M1 que es la parcela con jales sin ningún tipo de mezcla y aumentó a un rango alto en todas las parcelas con concentraciones de lombricomposta y abono orgánico, este aumento se observa aún más en las parcelas con la presencia de vegetación, el mayor aumento de P se da en las parcelas M3 y M3' que son las que tienen una concentración de abono orgánico. Para el caso de K (Figura 5), en el horizonte D, el más alto del perfil,

como en todas las parcelas, los rangos son altos y se observa un aumento mayor después de la presencia de vegetación, sobre todo en M3 y M3' que es la mezcla con abono orgánico (SEMARNAT, 2002).

Con respecto a Na (Figura 6), todos los valores son altos (SEMARNAT, 2002), que puede ocasionar, como se citó anteriormente, la reducción de permeabilidad del suelo y la penetración de agua, además se observa que Na aumenta en las mezclas M1', M2' y M3', que son las parcelas con vegetación, esto pudiera ser provocado por el agua de riego ya que estudios técnicos observan el incremento en la concentración de sodio en los acuíferos de la región (CONAGUA, 2015).

Óxido de calcio

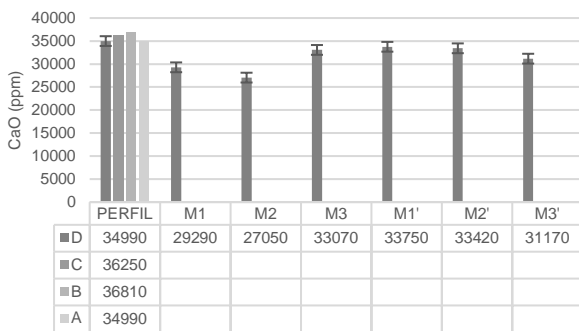


Figura 7: Comportamiento de CaO en los suelos.

Azufre

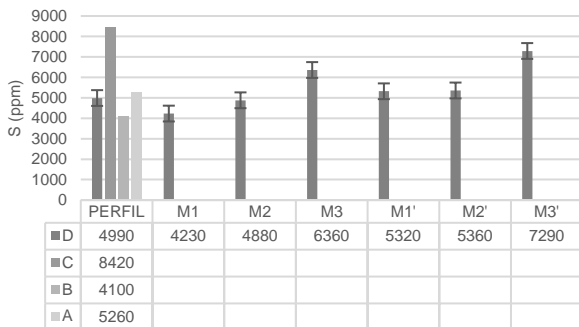


Figura 8: Comportamiento de S en los suelos.

Cobre

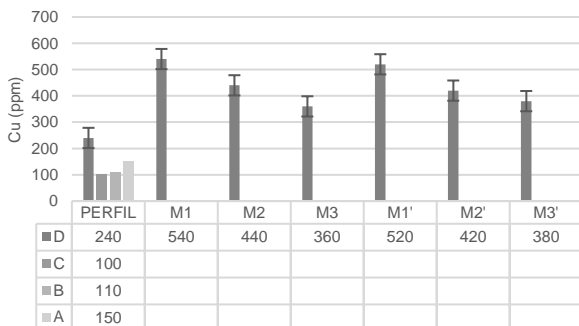


Figura 9: Comportamiento de Cu en los suelos.

Los resultados tanto para CaO (Figura 7) y S (Figura 8) se encuentran en un rango alto y presentan ligeras variaciones que no son condicionantes para un cambio en el suelo (SEMARNAT, 2002). Por otra parte, no se detectó Mg en ninguna muestra, tanto en el perfil como en las parcelas experimentales, esta ausencia como ya se citó, puede provocar deficiencias en la vegetación;

para solucionar esta deficiencia, se sugiere el uso de dolomita como aditivo del suelo, que ayude a corregir las deficiencias de Mg; este mineral es el más adecuado ya que se encuentra muy cercano a Pachuca, en la formación geológica del Doctor (Subsecretaría de Minería, 2017).

Óxido de hierro

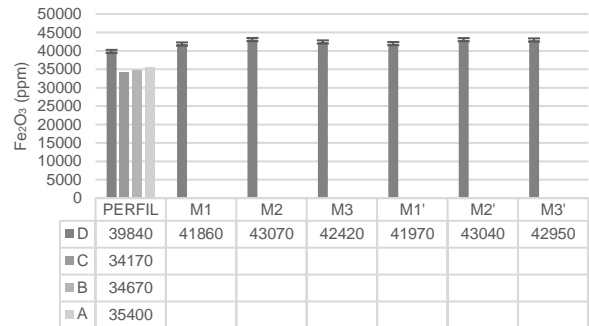


Figura 10: Comportamiento de Fe₂O₃ en los suelos.

Óxido de manganeso

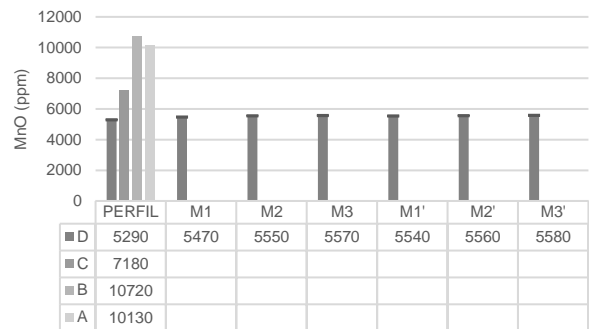


Figura 11: Comportamiento de MnO en los suelos.

Cloro

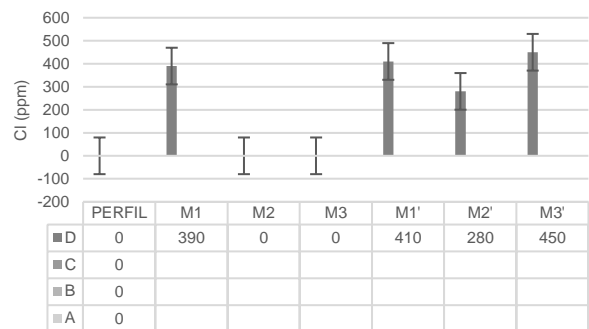


Figura 12: Comportamiento de Cl en los suelos.

En cuanto a los oligoelementos, para Cu (Figura 9), Fe₂O₃ (Figura 10) y MnO (Figura 11), los resultados, tanto del perfil, como de las parcelas experimentales están dentro del rango normal, presentando ligeras variaciones que no afectan al suelo (SEMARNAT, 2002). Para Cl (Figura 12), los resultados en el perfil no muestran ningún tipo de lectura de este elemento, en cuanto a las parcelas experimentales sin vegetación, se detectó solamente en M1, que es la de jales del sitio al 100%, por otra parte, se detectó Cl en todas las parcelas experimentales con

vegetación en diferentes rangos; la presencia de este elemento posiblemente se deba al riego, ya que el agua de la región contiene concentraciones altas de Cl (SEMARNAT & CONAGUA, 2016).

En el caso de Zn (Figura 13), en el perfil se observan lecturas más altas a más profundidad, en cuanto a las parcelas, no hay variaciones significativas de este elemento, y en todas las muestras presenta síntomas de toxicidad, sin embargo, el Zn está más disponible para su absorción cuando el suelo tiene pH bajo, por lo que, para encontrar síntomas de toxicidad en la vegetación, se debe analizar el tejido de ésta (Bloodnick, 2018).

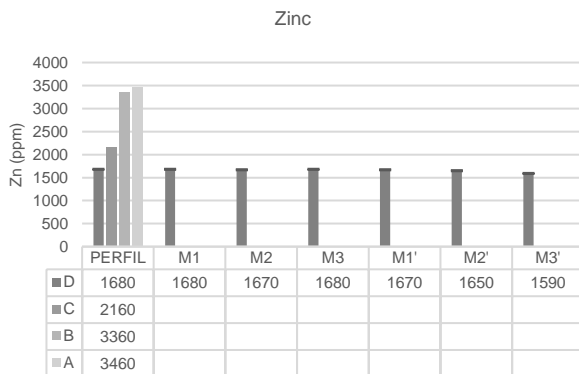


Figura 13: Comportamiento de Zn en los suelos.

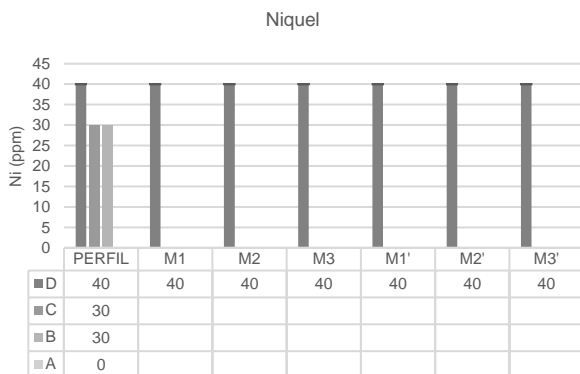


Figura 14: Comportamiento de Ni en los suelos.

En relación a Níquel (Figura 14), tanto en el perfil como en cada una de las parcelas experimentales, muestran rangos bajos en este elemento, por lo que, como ya se citó, puede reducir el crecimiento y la producción de las plantas (Buechel, 2018).

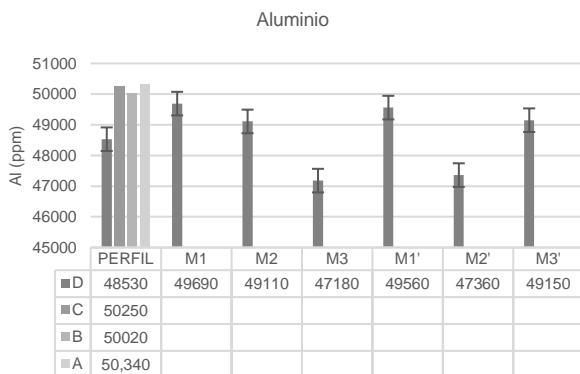


Figura 15: Comportamiento de Al en los suelos.

Los resultados muestran diferentes metales pesados en el suelo, se observa que para Al (Figura 15) y Ag (Figura 16) los niveles de concentración presentan variaciones en todas las parcelas, pero todas las medidas se encuentran en los rangos normales y no representan un riesgo para la salud humana ya que no exceden el rango para considerarlos tóxicos (SEMARNAT, 2007).

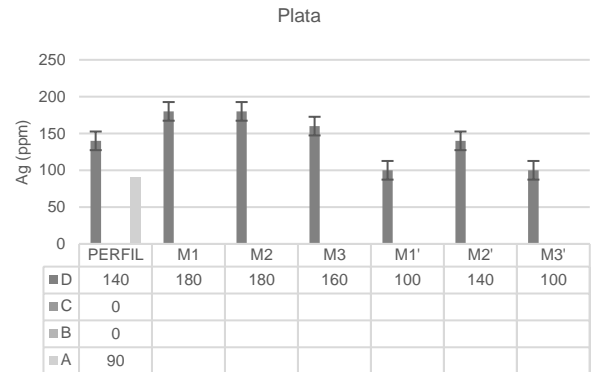


Figura 16: Comportamiento de Al en los suelos.

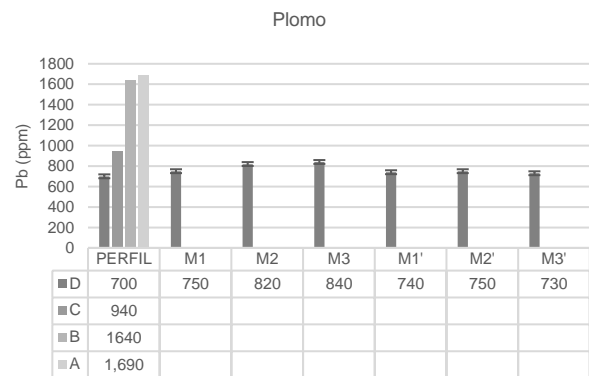


Figura 17: Comportamiento de Pb en los suelos.

Con respecto al comportamiento de Pb (Figura 17), en el perfil se observan mayores cantidades de este elemento, conforme avanza la profundidad, y cantidades por encima de los parámetros normales en todas las parcelas experimentales (SEMARNAT, 2007), como ya se citó, la toxicidad por Pb es de interés, no solamente por la fitotoxicidad, sino porque al ser absorbido por las plantas, el elemento se mueve por la cadena alimenticia (Hernández Gil, 2002), esto se puede observar ya que el contenido de plomo es menor en las parcelas con vegetación.

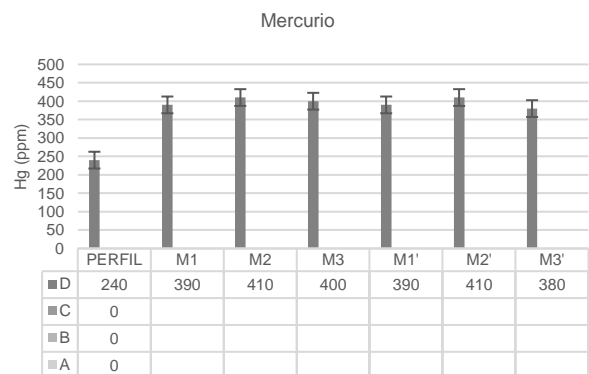


Figura 18: Comportamiento de Hg en los suelos.

En cuanto al comportamiento de Hg (Figura 18), en el perfil se observa este elemento en la parte más alta y hay lecturas en todas las parcelas experimentales en rangos muy altos, por lo que es

considerado tóxico para la salud humana (SEMARNAT, 2007), como ya se comentó, el Hg puede afectar las reacciones de luz y oscuridad de la fotosíntesis, la exposición al Hg inorgánico reduce el índice mitótico en el meristema apical de la raíz y aumenta la frecuencia de aberraciones cromosómicas, que son directamente proporcionales a la concentración de Hg, en este caso es recomendable realizar mediciones de este elemento a la vegetación para ver si el Hg es absorbido por las plantas.

4. Conclusiones

La caracterización física y química del suelo muestra que, en el perfil, la textura va de franca hacia lo limosa y limo-arcillosa, para la mayoría de los horizontes, esta tendencia se presenta de igual forma en la mayoría de parcelas experimentales, lo que puede presentar problemas de aireación y circulación del agua. Por otra parte, el pH, tanto en el perfil como en las parcelas, es medianamente alcalino, lo que podría presentar problemas al reducirse la disponibilidad de los oligoelementos. Además, la materia orgánica presenta un aumento, que es más significativo en las parcelas tratadas con abono orgánico ya que llegó a un rango medio, mientras que, para las otras parcelas, aunque también hubo un aumento, se quedaron en el rango bajo.

En cuanto a los macroelementos, se observó que N inorgánico aumentó sus niveles en todas las parcelas, primero cuando se adicionaron los tratamientos y aún más, después de tener vegetación en las parcelas, aunque no lo suficiente, ya que las lecturas más altas aún se encuentran en el rango bajo, esto puede cambiar si se aumenta la dosis de los tratamientos de abono y lombricomposta. En cuanto a fósforo y potasio, hubo un aumento en los niveles cuando se adicionaron los tratamientos y aún más, después de tener vegetación en las parcelas, sin embargo, es más notorio el aumento de estos elementos en las parcelas con el tratamiento de abono orgánico. Con respecto a sodio, todos los resultados son altos, pero aumentan más en las parcelas con vegetación que puede ser causado por el agua de riego, por lo que se deben realizar más medidas en cuanto a este elemento, para observar los cambios. Los resultados para calcio se encuentran en un rango alto, por otra parte, no se detectó magnesio en ninguna muestra, lo que podría ocasionar deficiencias en la vegetación, esta ausencia se puede contrarrestar con la adición de dolomita en las parcelas experimentales.

Con respecto a los oligoelementos, se observa que cobre, hierro y manganeso se encuentran en un rango normal; en cuanto a cloro, se observa un aumento de este elemento en las parcelas con vegetación que puede ser causada por el agua de riego. Por otra parte, hay síntomas de toxicidad provocadas por el zinc y rangos bajos en cuanto a níquel.

Los resultados, además muestran diferentes metales pesados, algunos de ellos dentro de los rangos normales para que no sean considerados tóxicos, como son aluminio y plata, pero por otro lado hay plomo y mercurio en cantidades tóxicas en todas las mezclas, aunque algunas medidas son menores en las mezclas con vegetación, esto supone que las plantas podrían acumular estos metales en sus raíces, por lo que pudieran considerarse como acumuladoras de metales pesados, aunque se requiere medir el comportamiento mineral de los tejidos vegetales para comprobar la acumulación.

Al tratar los suelos contaminados con lombricomposta y abono orgánico, se presentan notables mejorías en cuanto a MO, N, P y K que son esenciales para la vegetación, obteniendo mejores resultados con el abono orgánico, por lo que resulta el más recomendable para el tratamiento de este tipo de suelos contaminados, sin embargo, la mezcla requiere una concentración de arena para mejorar la textura y así obtener una mejor aireación

y permeabilidad, además de dolomita para el incremento de Mg y pequeñas dosis de Ni en forma quelada, por otro lado, se detectaron Pb, Zn y Hg que son elementos tóxicos e impiden el desarrollo adecuado de la vegetación, sin embargo, estos pudieran disminuir su contenido con especies acumuladoras de metales pesados, por lo que se hace indispensable medir el comportamiento mineral de las especies desarrolladas en el experimento. Además, sería conveniente para trabajos futuros, poder hacer una mezcla de agrominerales que apacigüen el efecto de Pb y Zn.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la UNAM. Especiales agradecimientos a las Doctoras, Silke Cram Heydrich del Instituto de Geografía, UNAM y Nathalie Roberte Chantal Cabirol de la Facultad de Ciencias, UNAM, quienes nos aportaron valiosa información al presente artículo.

Referencias

- Allen, S. E., 1989. *Chemical Analysis of Ecological Materials*. Londres, Gran Bretaña: Blackwell Scientific Publications.
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A. & Mata, D. A., 2014. *Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (ce) en los sustratos para plantas*, Bueno Aires: INTA Ediciones.
- Bloodnick, E., 2018. *PROMIX*. [En línea] Disponible en: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-funcion-del-zinc-en-el-cultivo-de-plantas/> [Último acceso: julio 2019].
- Buechel, T., 2018. *PROMIX*. [En línea] Disponible en: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/rol-del-niquel-en-el-cultivo-de-plantas/> [Último acceso: julio 2019].
- CONAGUA, 2015. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca (1508), Estado de México*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Contreras López, C., 2016. *Oblitopías: recuperación del espacio abierto contaminado en asentamientos humanos ubicados sobre depósitos de jales mineros*. México: Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Contreras López, C., 2017. Vegetation as a Design Element to Recover Green Areas in Settlements Developed on Contaminated Soils. En: *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering*. Seville: Springer, pp. 325-338.
- Garrido Valero, M. S., 1994. *Interpretación de Análisis de Suelos*. Madrid: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- Gisbert Blanquer, J. M., Ibáñez Asensio, S. & Moreno Ramón, H., 2010. *La Textura de un Suelo*. Valencia: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Valencia.
- Hernández Ávila, J., 2012. Caracterización de la escombrera de Velasco en el Estado de Hidalgo y su uso alternativo como material de construcción. *V encuentro de investigación del AACTyM*, p. 6.
- Hernández Gil, R., 2002. *Libro Botánica On Line, Nutrición Mineral de las Plantas*. [En línea] Disponible en: <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/#arriba> [Último acceso: junio 2019].
- Lorenzo Monterrubio, A., 1995. *Evolución urbana de la ciudad de Pachuca*. Pachuca: Gobierno del Estado de Hidalgo.
- Muro Ruiz, E., 2002. *La Minería Mexicana, su evolución, retos y perspectivas*. México: Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM.
- Ortiz Peralta, R., 1991. El beneficio de los minerales en el siglo XIX: El caso de la Compañía de Real del Monte y Pachuca. *Revista de Estudios Históricos TZINTZUN*, Issue 14, pp. 72-85.
- Rodríguez Fuentes, H. & Rodríguez Absi, J., 2015. *Métodos de Análisis de Suelos y Plantas*. México: Trillas.
- Saavedra Silva, E. E. & Sánchez Salazar, M. T., 2007. Minería y espacio en el distrito minero Pachuca - Real del Monte en el siglo XIX. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Issue 65, pp. 82-101.

- Salinas Rodríguez, E. y otros, 2016. Desing and Production of a New Construction Material (Bricks), Using Mining Tailings. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 6(6), pp. 225-237.
- SEMARNAT & CONAGUA, 2016. *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas de acuífero Cuautitlán-Pachuca, clave 1508, en el Estado de México, Región Hidrológico-Administrativa Aguas del Valle de México*. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT, 2002. *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertiliad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT, 2007. *Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio*. segunda ed. México: Diario Oficial de la Federación.
- Soto Oliver, N., 1982. *La minería, El Distrito Minero Pachuca-Real del Monte a través de la historia*. Pachuca: Gobierno del Estado de Hidalgo.
- Subsecretaría de Minería, 2017. *Perfil del Mercado de la Dolomita*. México: Secretaría de Economía.