

ALTERACION EXPERIMENTAL DE SERPENTINAS Y FILITAS EN MEDIOS ÁCIDOS

J. Iñiguez, E. Fernández Ondoño y V.H. Duran.

Dpto. Edafología y química Agrícola. Universidad de Granada.

INTRODUCCION

La alteración de rocas ha sido objeto de interés de numerosos investigadores por ser el primer estadio en la formación del suelo.

Al intentar reproducir los procesos de alteración, además de la complejidad del medio natural (condiciones ambientales, factores topográficos, biológicos, etc.) existe un factor, el tiempo, imposible de modificar, ralentizar o acelerar. Debido a esto, en los estudios experimentales, se extreman otras condiciones como pH, temperatura o concentración de las disoluciones de ataque. Esto puede falsear los resultados, pero con ello se pretende simular períodos prolongados de tiempo en medios naturales.

Senkayi et al. (1981) observaron que el incremento de la acidez causa un aumento en la liberación de cationes estructurales (Al, Fe y Mg) y lo atribuían a la alteración de los silicatos. También Pulford et al. (1983) atribuían al incremento en la concentración de iones H⁺ en la solución la desintegración de la roca y la liberación de los elementos contenidos en la misma.

Para estudiar los efectos de sobrecarga de ácidos en suelos han sido utilizadas varias técnicas tales como las de pH constante, columnas de flujo, reactores de lecho fluído y técnicas de flujo a través de resinas de iones cambiables.

Nosotros hemos elegido la técnica de trabajar a temperatura ambiente, con tres disoluciones de ataque de diferente acidez y comportamiento químico, sifonando el lixiviado cada 30 minutos y en recipientes de plástico, para eliminar la posible interacción de los componentes del vidrio, especialmente de la sílice.

El estudio de la génesis del suelo a partir de rocas ultrabásicas es problemático, en parte porque las propiedades de los suelos reflejan efectos competitivos entre los minerales fácilmente alterables en el material original; sin embargo ha sido objeto de atención de numerosos investigadores por varias razones, entre las que destaca la escasa vegetación a la que suelen estar asociados este tipo de suelos, Hoyos et al, (1971), Bulmer et al, (1992), Calvo de Anta et al, (1987) y (1993), Gasser et al, (1994), entre otros.

Bulmer et al, (1994) destacaron la importancia de los siguientes procesos en la edafogénesis ultrabásica: Redistribución del magnesio en el perfil del suelo y debajo del solum, transferencia de los minerales silicatados a óxidos e hidróxidos de hierro secundarios y alteración de serpentinas, cloritas y otros minerales presentes en las rocas ultrabásicas a vermiculitas y esmectitas.

Según Roberts (1980), en las primeras etapas, la alteración mineral consiste en la liberación de magnesio de los minerales serpentiniticos.

Las etapas medias y finales se caracterizan por la desaparición de minerales primarios tales como olivino, serpentina, clorita y talco y la presencia de altas cantidades de óxidos de hierro (Gasser, 1990).

La alteración de rocas serpentiniticas ricas en asbestos parece ser más rápida si hay ácidos inorgánicos (Kaupenjohann et al. 1995).

Tanto Wildman et al (1981) como Bulmer et al (1992), concluyen que, cuando los minerales serpentiniticos se alteran, se pierde magnesio y se acumula Si, Fe y Al.

También los procesos de alteración de esquistos tales como los utilizados en el estudio han sido objeto de interés de numerosos investigadores. Así, Kaplall et al. en 1963 observaron que, bajo condiciones anaerobias, la materia organica se oxida de forma incompleta. Otros compuestos sulfurosos inorgánicos, tales como sulfatos en el agua marina, son también reducidos a iones sulfuro.

Éste es un posible mecanismo que explica la presencia de sulfuros metálicos (FeS₂). La pirita se ha encontrado como un importante mineral de azufre en esquistos alumínicos (Jeng, 1990). Cuando los esquistos alumínicos se exponen al aire y a la humedad, la pirita y otros sulfuros asociados con ella pueden oxidarse, generando acidez y liberando cationes metálicos (Jurinak 1989).

MATERIAL Y MÉTODOS

El objetivo de esta investigación era comparar la alteración y geoquímica de rocas ultrabásicas y silíceas. Las rocas elegidas -serpentinita y filita- se diferencian notablemente en su composición química y mineralógica: La serpentinita es muy rica en silicatos de magnesio y calcio (éste en forma de carbonato) y pobre en aluminio y potasio, mientras que la filita contiene cantidades elevadas de estos elementos y también hierro y cuarzo.

Las rocas sometidas al ataque, molidas y tamizadas (tamiz de 2 mm), se colocaron en cartuchos de celulosa situados en recipientes de polietileno de 400 cc. La solución de ataque se hacía percolar de manera continua (aproximadamente 40 cc por hora). Las soluciones se sifonaban cada 30 minutos, antes de que alcanzaran la parte superior de los cartuchos de extracción.

Los líquidos percolados a lo largo de períodos de una semana se reunían, y se procedía a su análisis. Sodio y potasio se determinaron por fotometría de llama; calcio, magnesio, hierro y aluminio mediante absorción atómica, y sílice se determinó por colorimetría del complejo fosfomolibdico. Se determinó también el pH de la solución antes y después de cada ataque.

Como soluciones de ataque se han empleado tres: una ácida reductora (fórmico) con pH 1,8 y concentración 0,5 N aproximadamente, otra ácida complejante (EDTA), muy diluída, 0,005 N, y pH 3,0 y otra ácida oxidante en contacto con la atmósfera (acético) pH 2,5 y concentración 0,5 N. Los distintos medios deben mostrar un efecto diferente sobre materiales que contengan elementos oxidables como hierro, o fácilmente complejables, como calcio, magnesio y hierro.

Las serpentinitas utilizadas pertenecen a las rocas ultrabásicas del cinturón de serpentinitas de la Unidad de las Sabinas, del Manto del Mulhacén dentro del complejo Nevado-Filábride. Forman parte de un medio ofiolítico tectónicamente deformado. La litología consiste en serpentinitas altamente cizalladas presumiblemente derivadas de peridotitas.

Desde el punto de vista mineralógico, está constituida por carbonato cálcico, serpentinita fuertemente distorsionada por metamorfismo, restos de piroxenos alterados, y una pequeña cantidad de óxidos de hierro.

La filita con la que hemos trabajado procede de los esquistos de la región de Navarra que pertenecen al grupo llamado usualmente "esquistos negros". Están formados a poca profundidad pero en condiciones anóxicas.

Su mineralogía consiste en láminas de mica y cuarzo, pequeñas y orientadas por presión, restos de fósiles distorsionados, rellenos de carbonato cálcico, rodeados de materia orgánica oscura, y pocos cristales dispersos de pirita.

La composición química y mineralógica de las dos rocas aparecen en la [Tabla 1](#). La composición mineralógica cualitativa se confirmó mediante difracción de rayos X.

RESULTADOS

Alteración de filita

La pérdida total acumulada se muestra en la [Figura 1](#). En los ciento veinte días que ha durado el ataque, éste no ha sido total, ni se llega a una situación de equilibrio.

La cantidad total extraída es máxima para el ácido fórmico, seguida por acético y EDTA. ([Figura 1](#)).

El calcio liberado ([Figura 2](#)) marca claramente dos ritmos: uno muy rápido, durante el primer período, y otro mucho más lento en los siguientes. El primero, con una pendiente muy fuerte, corresponde a la disolución del mineral más fácilmente alterable en medio ácido: el carbonato. El ataque con acético y con fórmico, aunque con distinta intensidad, siguen una curva muy similar, diferenciándose sólo en las cantidades medidas en el primer y en el último período. Este comportamiento está en relación con los valores del pH del líquido lixiviado, (los valores del pH de ataque y del líquido lixiviado aparecen en la [Tabla 2](#)). Con ácido fórmico los valores de pH del lixiviado aumentan en las tres primeros períodos, pero sólo en este último alcanzan un valor de 2.2. A partir de la cuarta semana el pH del líquido lixiviado disminuye muy ligeramente.

En el caso del ataque con EDTA la liberación de calcio es progresivamente decreciente desde el principio y alcanza una situación casi de equilibrio, pero con una cantidad total liberada muy inferior, justificada por la menor concentración del ácido.

El hecho de que la disolución del CO_3Ca sea parcial, a pesar de que la cantidad de ácido percolado sea más que suficiente para su total disolución, indica que, de alguna manera, queda "protegido" del ataque.

La liberación de potasio es significativa, ya que expresa la alteración de la mica, y se exporta de modo total, no pudiendo quedar en el residuo de alteración al no poder formar compuestos insolubles en las condiciones de trabajo ([Figura 3](#)). La cantidad detectada en el primer período es máxima para los tres tratamientos. Además, es significativo que las cantidades liberadas por el ácido acético y por el EDTA en esta primera semana sean muy similares, lo que parece indicar que existe una cierta cantidad de potasio que entra en disolución con mucha facilidad, y que se acentúa en condiciones más ácidas (el ácido fórmico es el más efectivo) y complejantes. Su eliminación tampoco es total.

La exportación de los restantes componentes, expresados como óxidos lo mismo que todos los anteriores, aparecen en la [Figura 4](#) y [Figura 5](#). Sigue siendo máxima la liberación con ácido fórmico para todos los óxidos.

El hábito de la gráfica de liberación del hierro con EDTA es distinto a todos los demás; el primer tramo significa un ataque más lento, que después se acelera ([Figura 4](#)). Quizás la explicación se encuentre en la gran subida que experimenta el pH de este ácido durante el primer período, alcanzando valores, en los primeros días, próximos a 5. Las características del medio juegan un papel esencial en la dinámica del hierro, sobre todo cuando está convenientemente aireado. En estas condiciones sólo un medio muy ácido permite la extracción y eliminación regular de ión férrico. La fuerte subida del pH en este primer período, debida a la liberación de cationes, no permite la movilización de hierro, que sólo se produce a partir del segundo, cuando los valores de pH comienzan a descender.

El fórmico disuelve la mayor cantidad de hierro durante los dos primeros períodos, durante los cuales el pH de lixiviado es siempre inferior a dos. En este rango de pH, tanto las formas férricas como ferrosas se encuentran en disolución para las concentraciones a las que trabajamos.

Observamos que tanto las curvas correspondientes a los totales acumulados en los tres ácidos, como las correspondientes a cada elemento analizado, presentan una marcada similitud con aquellas curvas derivadas del desarrollo de la ecuación de Langmuir. Esta similitud fué comprobada procesando los datos en el programa Systat 5.1 (1989), obteniendo unos valores de correlación muy altos. Los mismos resultados obtuvimos para la alteración de la serpentina, como desarrollaremos en las conclusiones.

El magnesio en la roca puede estar relacionado con el potasio, formando parte de la mica, y, en una proporción muy inferior, con el calcio, formando carbonatos. Ya que la mayor parte del potasio entra a formar parte de la mica, el cociente K_2O/MgO nos indicará el ritmo de alteración de los dos minerales.

La relación K_2O/MgO en la mica es 1,25. En la [Tabla 3](#) se muestran los valores de los cocientes molares en el lixiviado. En el caso del acético, este cociente es inferior a 1 hasta la sexta medida. Pero posiblemente no todo el magnesio liberado corresponda a la mica. En este sexto período es cuando sí parecen corresponderse la proporción en el lixiviado con la proporción en la mica.

El ácido fórmico es el más efectivo en la liberación tanto de potasio como de magnesio. Ambos elementos se liberan más cuanto más ácida es la solución de ataque. El cociente entre uno y otro, exceptuando el primer y último período, tiene un valor próximo a uno. Es decir, atendiendo a la relación potasio/magnesio en la mica, siempre se disuelve una cantidad extra de magnesio perteneciente al carbonato, cantidad que es máxima en el primer período y en el último, coincidiendo en cada caso con una mayor liberación de calcio.

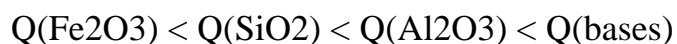
Los cocientes molares de la suma de los sexquióxidos y de la suma de las bases con relación a la sílice, correspondientes a los lixiviados, se muestran también en la [tabla 3](#). Esta relación es inversa para los sexquióxidos y para las bases: el cociente bases/sílice tiende a disminuir a lo largo de la experiencia alcanzándose los valores más elevados en las primeras medidas. El cociente sexquióxidos/sílice es menor en los períodos iniciales.

La relación Fe_2O_3/MgO , mayor de dos en todos los medios en la segunda y tercera medida, se estabiliza en valores próximos a la unidad en toda la experiencia, excepto en el tratamiento con acético, en el que, en el último período, vuelve a exportarse mucho más hierro que magnesio ([Tabla 4](#)).

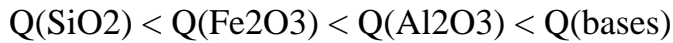
El cociente Al_2O_3/MgO aumenta de forma progresiva. Se exporta más aluminio que magnesio, lo que, aunque no coincide con el comportamiento general de estos dos elementos, sí concuerda con las cantidades relativas de ambos en la roca ([Tabla 4](#)).

El cociente CaO/MgO ([Tabla 4](#)) es superior a la unidad en el tratamiento con acético y con EDTA, lo que indica que el ataque es más eficaz con respecto al carbonato que a la forma silicatada.

La geoquímica de alteración para esta roca es diferente para los tres medios tanto en las cantidades como en los tipos de elementos más afectados. Así, tanto para acético como para fórmico el orden es el siguiente:



Mientras que con EDTA los resultados son distintos:



El residuo de alteración se enriquece en hierro, sílice y aluminio, mientras que las bases se exportan en todos los casos con relativa facilidad.

Alteración de serpentita

El interés en la elección de la roca residúa en la posibilidad de comparar la alteración producida por los mismos agentes sobre un material cuyo catión predominante es el calcio, con otro, en este caso filita, en donde los cationes predominantes son potasio y magnesio.

La presencia de vetas importantes de calcita en la serpentina es la causa del alto contenido de la misma en la muestra y fue intencionadamente seleccionada por ello.

La pérdida total debida a la alteración experimental se presenta en la [Figura 6](#). El hábito de las gráficas es muy similar cualitativamente, con una subida muy fuerte en el inicio, y un tramo posterior en el que casi se alcanza una situación de equilibrio. La exportación es máxima para el acético, algo menor para el fórmico, y mucho más baja para EDTA.

Si observamos los valores totales de cada uno de los elementos, vemos que el predominio del acético se debe únicamente a su efectividad en la destrucción de la calcita, mientras que, casi en todos los demás elementos, aunque con poca diferencia en la mayoría de los casos, es el fórmico el ácido más efectivo, como ocurría en el caso de la filita y como era de esperar por su pH inferior.

El fuerte ataque inicial corresponde a la alteración de la calcita, ([Figura 7](#)). Para los tres medios de ataque, la estabilización se alcanza al cabo de 75 días, sin que la pérdida de carbonato sea total. Hay que matizar que en el caso del acético y el fórmico, aunque con distinta magnitud en la primera medida a favor del acético, las curvas son muy similares, y a una pérdida muy fuerte en el primer período sigue una liberación mucho menor en el segundo y progresivamente más lenta en los siguientes.

La liberación de calcio tras el ataque con EDTA es diferente. Como en los dos casos anteriores, es durante los dos primeros períodos cuando se detecta una mayor cantidad en los lixiviados, pero las diferencias no son tan acusadas con las medidas en el resto de la experiencia, y, en general, el proceso es muy homogéneo y continuado en el tiempo.

Otro dato a destacar, y que diferencia el comportamiento del EDTA, es que el pH del lixiviado siempre es mayor que el pH añadido, al contrario de lo que ocurre con los otros dos ácidos en los que esta tendencia se invierte a partir del cuarto período de tratamiento.

Las gráficas de pérdida de los restantes elementos no llegan a alcanzar una situación de equilibrio, aunque el tratamiento con EDTA en algunos casos se aproxima bastante. Tienen un trazado similar, (Gráficas 7,8 y 9), y el ataque es más efectivo entre el segundo y el tercer período, a partir del cual las pérdidas disminuyen o tienden a estabilizarse.

El comportamiento del hierro parece estar asociado con el pH. Así, durante el primer período, probablemente por la fuerte disolución de carbonatos, se produce un aumento significativo en el pH del lixiviado con respecto al pH de la solución de ataque en los tres casos, superándose siempre el valor medio de 2,2 en el lixiviado.

En la segunda semana la media de pH para el fórmico se sitúa en 1,9 y favorece una mayor exportación de hierro.

El acético por su parte también disminuye el pH, pero el valor medio se sitúa alrededor de 2,6 lo que explica su menor eficacia.

En cuanto al EDTA, presenta una variación muy acusada. Así, hay que señalar que en algunos períodos los valores de pH del lixiviado se sitúan en 2,6 (solubilizándose en estos períodos la mayor parte del hierro extraído), mientras que en otros el pH llega a valores de 4,3.

En la composición de la roca, el tercer elemento en porcentaje, después del calcio y la sílice, es el magnesio.

La eliminación del magnesio es mayor cuanto más ácida es la solución de ataque. Por tanto el fórmico es el ácido con el que se registra una mayor proporción de magnesio disuelto, aumentando las diferencias con los otros medios a medida que transcurre la experiencia y se potencian las condiciones reductoras, como ocurre en el último período.

El cociente CaO/MgO ([Tabla 5](#)) es muy alto en el primer período tanto para acético como para fórmico, debido al fuerte ataque a la calcita. Disminuye mucho en los siguientes, y a partir del tercero (con el fórmico) y el cuarto (con el acético), se sitúa por debajo de uno, liberándose por tanto a partir de este momento más magnesio que calcio; la disolución de magnesio es mucho menos drástica pero más continuada en el tiempo.

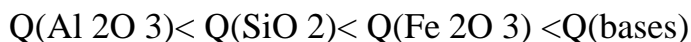
Con EDTA, y prácticamente durante toda la experiencia, la exportación de calcio es unas diez veces mayor que la del magnesio.

Los cocientes Al_2O_3/SiO_2 , Al_2O_3/MgO y MgO/SiO_2 permiten seguir la evolución de la antigorita. ([Tabla 5](#) y [Tabla 6](#)).

La exportación de magnesio es siempre mayor que la de sílice y aluminio. En los tres medios, el residuo de alteración se enriquece de forma relativa en sílice.

La conducta del aluminio frente a la sílice difiere con el medio de ataque. Con acético y con EDTA en la mayor parte de los períodos se elimina más sílice que aluminio. Con ácido fórmico se observa un período central en el que se liberan las mismas cantidades aproximadamente de sílice y de aluminio, y, por tanto los cocientes entre ambos dan valores próximos a la unidad. Los residuos se enriquecen relativamente en aluminio, que se exporta en proporción mucho menor que la sílice, a pesar de la escasa solubilidad de ésta ([Tabla 6](#)). Este comportamiento podría justificarse comparando las proporciones relativas de los dos elementos en la roca, ([Tabla 1](#)): La sílice es mucho más abundante que el aluminio.

Por tanto, la geoquímica de la alteración de esta roca para los tres medios de ataque se podría representar:



Se produce una acumulación relativa de sílice y aluminio, una exportación significativa de hierro y, con una gran diferencia, una gran disolución de calcio y, aunque menor por la proporción relativa en la roca de partida, también de magnesio.

CONCLUSIONES

Las gráficas de liberación para la mayor parte de los elementos estudiados marcan una dinámica caracterizada por un primer período en el que se produce un ataque fuerte con una pendiente acusada que pasa, en un período de tiempo relativamente corto, a una exportación mucho más lenta.

Esta dinámica presenta un paralelismo muy acusado con la ecuación de Langmuir, modelo clásico ampliamente utilizado para representar la adsorción de iones por el suelo.

La ecuación Langmuir, aplicada a estudios de adsorción en sistemas de suelos, deriva originalmente de la teoría cinética que describe la adsorción monomolecular de un gas en un sólido.

La liberación de elementos de la roca al ser sometida a un ataque ácido puede expresarse en los términos de esta ecuación.

La ecuación clásica tiene la forma:

$$X_m = Y / ((1 / (K_1 * K_2)) + (Y / K_1))$$

Donde:

X_m = Cantidad de adsorción por unidad de masa de adsorbente.

Y = concentración de la solución

K_1 y K_2 = Son términos de afinidad que reflejan la velocidad relativa de adsorción y desorción y la adsorción máxima.

En nuestro trabajo para ajustar los datos a esta ecuación, identificamos las variables de la forma siguiente:

X_m = cantidad cedida acumulada.

Y = períodos de tiempo de contacto.

Cuando aplicamos la ecuación de Langmuir a datos de liberación acumulada obtenidos en la experiencia, como por ejemplo la liberación de calcio por acético en la serpentina ([Figura 7](#)) o la pérdida total acumulada utilizando fórmico en la filita ([Figura 1](#)), obtenemos unos valores de K_1 de 401.479 y 1987.99 y K_2 de 1.6963 y 0,017 respectivamente, con un coeficiente de correlación que oscila entre 0,98 y 1. En las [Figuras 10](#) y [11](#), aparecen superpuestas las líneas correspondientes a los datos experimentales y a la curva teórica de Langmuir correspondiente.

La fuerte pendiente inicial se corresponde con la exportación de los elementos más alterables. Quedan, después, las superficies de los granos minerales con una concentración mayoritaria de elementos resistentes, que ejercen una acción protectora frente al ataque de los ácidos al núcleo central del mineral. Cuando representamos las pérdidas acumuladas a lo largo de la experiencia, este último momento, se refleja por una disminución en la pendiente de la curva alcanzando, en ocasiones, posiciones casi de equilibrio. Aunque en la roca quedan elementos que se movilizarían fácilmente con las concentraciones ácidas con las que trabajamos, no lo hacen debido a que quedan protegidos

por una coraza externa de elementos resistentes que impiden el acceso de los ácidos a los mismos y, por tanto, su disolución.

BIBLIOGRAFIA

Bulmer, C.E., Lavkulich, L.M., Schreier, H., (1992). Morphology, chemistry and mineralogy of soils derived from serpentinite and tephra in southwester British Columbia. *Soil Science*. 154. no 1.

Bulmer, C.E., Lavkulich, L.M. (1994). Pedogenic and geochemical processes of ultramafic soils along a climatic gradient in southwester British Columbia. *Can.J. Soil Sci.* 74:165.

Calvo de Anta, R., Macias, F., Burman, P. (1987). Procesos de alteración y neoformación mineral en medios serpentínicos de Galicia. Cuadernos do laboratorio Xeolóxico de laxe, 11.

Calvo de Anta, R., Alvarez, E., Lopez, E. (1993). Primeros datos sobre la especiación de Cr, Ni y Cu existentes en suelos serpentínicos de Galicia. *Química Agrícola y Alimentaria*. 2 Volumen I.

Gasser, U.G.(1990). Die Boden am Ostlichem abgang des Totalphorns (Davos, Schweiz) unter besonderer Berücksichtigung der verlagerung von Chrom and Nickel. Ph. D. thesis. Eidg.Tech. Hoch.Zurich.

Gasser, U.G., Juchler S., Sticher, H. (1994). Chemistry and Speciation of soil water from serpentinitic soils: Importance of colloids in the transport of Cr, Fe, Mg and Ni. *Soil Science*, 158, No 5.

Gasser, U.G., Dahlgren, R., Ludwig, C., Lauchli, A. (1995). Release kinetics of surface-associated Mn and Ni in serpentinitic soils: pH effects. *Soil Science*, 160, No. 4.

Hoyos, A., Gonzalez, J. (1971). Estudio de un suelo sobre peridotitas en Sierra de Aguas. *An. Edaf.* 30, 869-88.

Jeng, A.S. (1992). Weathering of some Norwegian alum shales, II Laboratory simulations to study the influence of aging, acidification and liming on heavy metal release. *Acta Agric. Scand.* 42:76

Kaupenjohann, M., Wilcke, W. (1995). Heavy Metal Release from a Serpentine Soil Using a pH-Stat Technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1027-1031.

Pedro, G. (1964). Contribution a l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Tesis doctoral. Paris .pp. 344.

Pedro, G., Iñiguez, J. (1967). Recherches sur le rol de la roche mère dans l'ateration provoquée en conditions acides. Science du sol, 1, pp. 93-111.

Pulford, I.D., Kimber, A.J., Duncan, H.J. (1983). Leaching of mrtals from acidic colliery spoil. En Heavy Metals in the Environment, Int. Conf. in the environment., Heidelberg, vol 2 ,1001.

Roberts, B.A., (1980). Some chemical and physical properties of serpentine soils from western Newfoundland. Can, J.Soil Sc. 60:231.

Schreier, H. Omueti, J.A Lavkulich, L.M. (1987). Weathering processes of asbestos-rich serpentine sediments. Soil Sci, Soc.Am.J. 51:993

Senkayi, A.L., Dixon,J.B., Hosner, L.R.(1981).Simulated weathering of lignit overburden shales from Northeast Texas. Soil Sci.Soc.Am.J., 45, 982.

Senkayi,A.JJ, (1997). Clay mineralogy of poorly drained soils developing from serpentinic rocks. Ph. D. thesis. Univ. California,Davis. Ca.

Wildman, W.E., Jackson, M.L., Whittig, L.D.(1971). Iron-rich montmorillonite formation in soils derived from serpentinite. Soil Sci. Soc. Am Proc.32 :787.

Wilkinson, Ieland (1989). SYSTAT: The system for statistics. Evanston, IL: SYSTAT, Inc.

Figuras y Tablas.

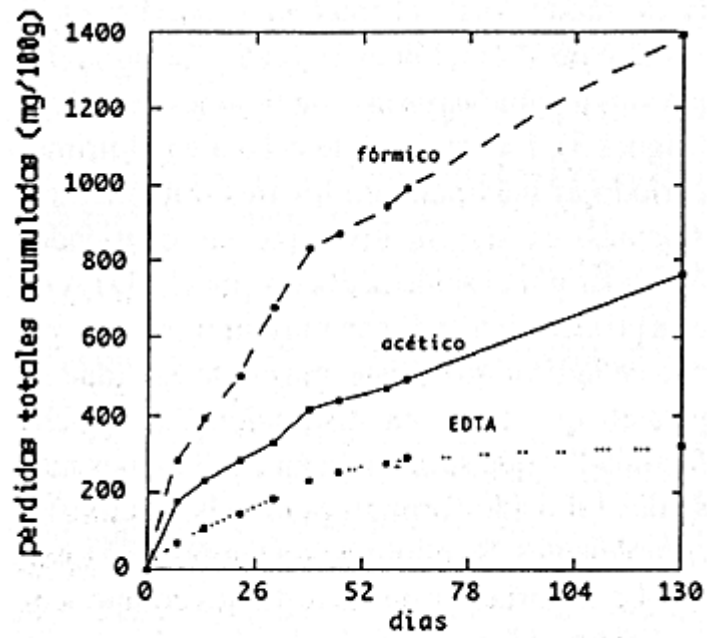


Figura 1. Pérdidas totales acumuladas en filita.

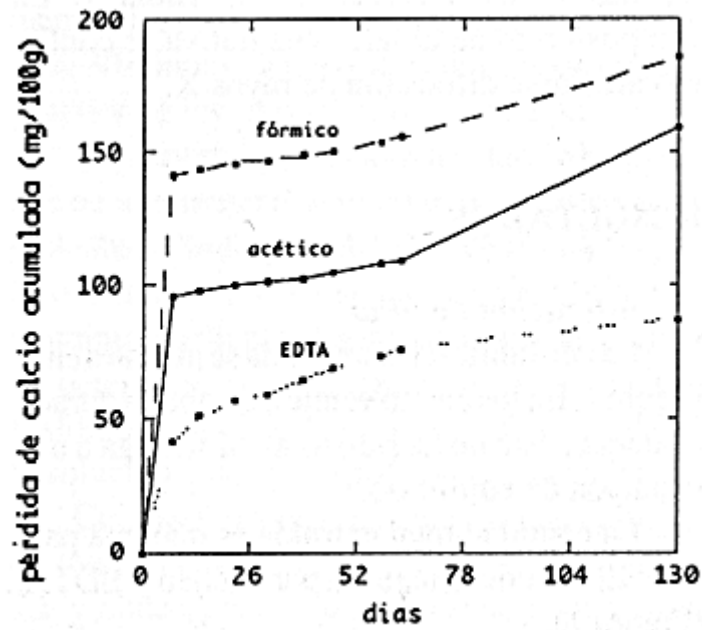


Figura 2. Pérdidas acumuladas de calcio en filita.

Tabla 2. PH de las soluciones de ataque y de los lixiviados en los distintos periodos.

periodos	pH	Serpentina			Filita		
		Fórmico	Acético	EDTA	Fórmico	Acético	EDTA
1*	pH inicial	1,6	2,2	2,7	1,6	2,2	2,7
1*	pH lixiviado	2,3	3,3	3,3	2,0	2,5	4,7
2*	pH inicial	1,8	2,4	2,7	1,8	2,4	2,7
2*	pH lixiviado	1,9	2,5	3,4	1,8	2,3	3,4
3*	pH inicial	1,9	2,6	2,9	1,9	2,6	2,9
3*	pH lixiviado	2,1	2,7	3,5	2,2	2,7	3,5
4*	pH inicial	2,3	2,8	3,1	2,3	2,8	3,1
4*	pH lixiviado	2,0	2,6	3,5	2,0	2,5	3,3
5*	pH inicial	1,8	2,4	2,6	1,8	2,4	2,6
5*	pH lixiviado	1,6	2,2	3,4	1,6	2,2	2,9
6*	pH inicial	1,7	2,2	2,6	1,7	2,2	2,6
6*	pH lixiviado	1,5	2,0	3,1	1,5	2,0	2,7
7*	pH inicial	1,7	2,4	2,7	1,7	2,4	2,7
7*	pH lixiviado	1,7	2,4	3,3	1,8	2,4	2,9
8*	pH inicial	1,7	2,3	2,8	1,7	2,3	2,8
8*	pH lixiviado	1,7	2,4	3,2	1,7	2,2	2,7

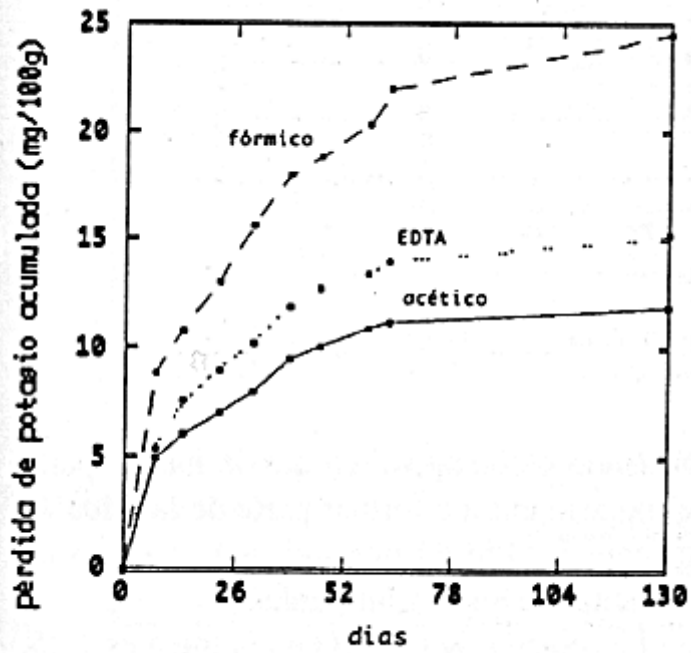


Figura 3. Pérdidas acumuladas de potasio en filita.

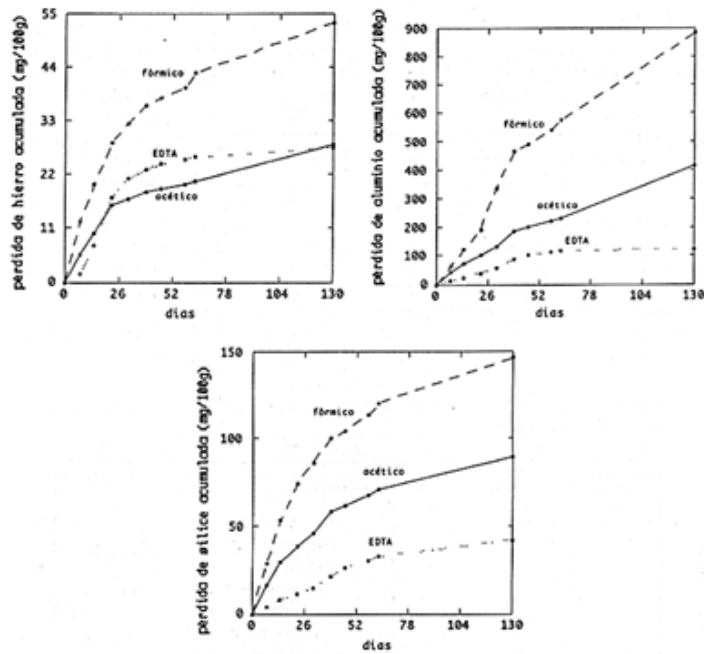


Figura 4. Pérdidas acumuladas de hierro, aluminio y sílice en filita.

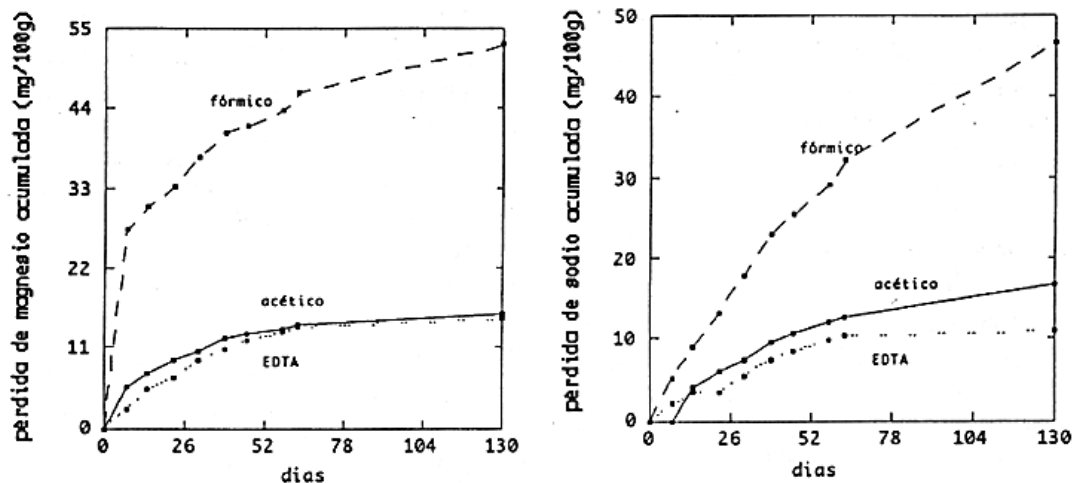


Figura 5. Pérdidas acumuladas de magnesio y sodio en filita.

Tabla 3. Cocientes molares en el lixiviado de la filita (potasio/magnesio, suma de bases/sílice, suma de sesquióxidos/sílice).

COCIENTES MOLARES FILITA									
Períodos	K/Mga	K/Mgf	K/Mge	B./Sia	B/Sif	B/Sie	sex/sia	sex/sif	sex/sic
1°	0.94	0.34	2.1	15.3	14.2	30.1	3.89	3.85	4.32
2°	0.69	0.71	0.89	0.83	1.99	7.54	3.5	3.61	7.76
3°	0.56	0.8	0.90	1.19	2.63	5.82	5.07	4.65	14.52
4°	0.71	0.71	0.57	1.07	4.91	4.15	4.49	10.4	9.09
5°	0.96	0.77	1.02	0.75	4.39	2.83	4.46	7.81	4.79
6°	1.25	0.79	0.68	1.81	16.3	2.56	4.01	6.82	3.42
7°	0.92	0.77	0.82	2.37	7.3	3.58	3.99	5.1	3.30
8°	0.75	0.70	0.65	1.29	9.88	3.96	3.77	5.75	3.50
9°	0.41	0.41	1.27	6.89	6.0	3.28	8.62	10.1	2.14

Tabla 4. Cocientes molares en el lixiviado de la filita (hierro/magnesio, aluminio/magnesio, calcio/magnesio).

COCIENTES MOLARES FILITA									
Períodos	Fe/Mga	Fe/Mgf	Fe/Mge	Al/Mga	Al/Mgf	Al/Mge	Ca/Mga	Ca/Mgf	Ca/Mge
1°	0.98	0.45	0.6	7.77	2.18	3.91	16.8	5.13	15.2
2°	2.49	2.58	2.30	14.5	20.9	5.50	1.23	0.84	3.97
3°	3.12	2.92	5.69	17.0	25.2	8.91	1.44	0.89	3.20
4°	0.99	1.06	1.73	22.1	37.8	8.21	1.00	0.22	1.35
5°	0.87	1.08	1.11	34.5	38.4	17.2	0.78	0.42	3.10
6°	1.15	1.52	0.91	27.8	23.5	11.9	3.53	1.55	3.45
7°	1.14	1.1	0.98	22.7	22.9	9.17	4.44	1.67	4.54
8°	1.09	1.23	0.66	21.9	14	6.87	2.22	0.64	3.23
9°	4.63	1.57	1.91	10.1	47	6.59	30.2	4.55	11.1

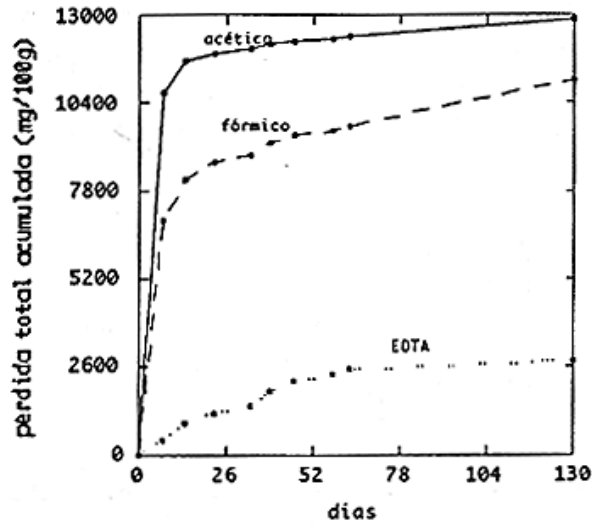


Figura 6. pérdidas totales acumuladas en serpentina.

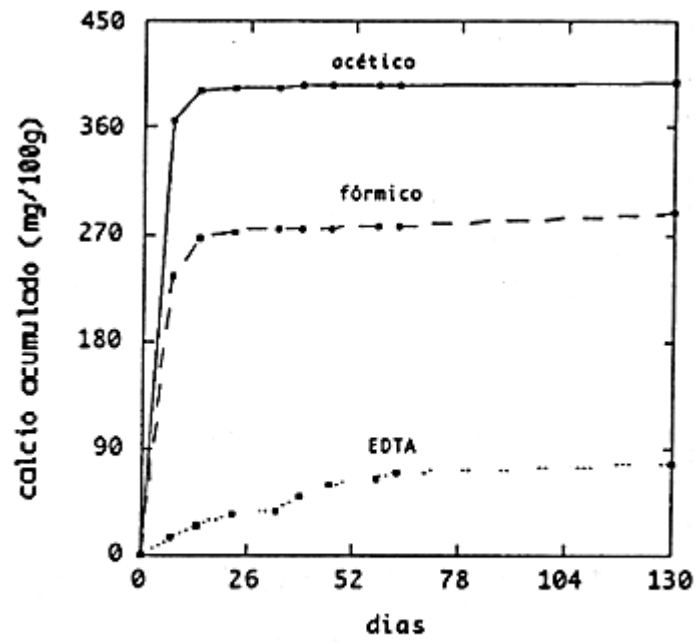


Figura 7. Pérdidas acumuladas de calcio en serpentina.

Tabla 5. Cocientes molares en el lixiviado de la serpentina (calcio/magnesio, aluminio/magnesio).

COCIENTES MOLARES SERPENTINA

Períodos	Ca/Mg _a	Ca/Mg _f	Ca/Mg _e	Al/Mg _a	Al/Mg _f	Al/Mg _e
1°	33.3	23.0	9.8	0.04	0.07	0.38
2°	3.7	4.7	9.4	0.08	0.10	0.13
3°	1.3	0.8	9.4	0.20	0.11	0.26
4°	0.3	0.1	2.2	0.22	0.22	0.03
5°	0.1	0.04	4.4	0.26	0.16	0.06
6°	0.2	0.2	9.4	0.20	0.11	0.08
7°	0.1	0.2	7.7	0.19	0.25	0.37
8°	0.02	0.04	6.4	0.03	0.20	0.47
9°	0.2	0.2	8.6	0.10	0.01	0

Tabla 6. Cocientes molares en el lixiviado de la serpentina (aluminio/sílice, magnesio/sílice).

COCIENTES MOLARES SERPENTINA

Períodos	Al/Sia	Al/Sif	Al/Sie	Mg/Sia	Mg/Sif	Mg/Sie
1°	0.4	0.5	1.1	11.4	8.13	2.85
2°	0.3	0.6	0.4	4.21	5.48	2.84
3°	0.7	1.2	0.6	3.40	11.0	2.47
4°	0.9	1.3	0.1	4.18	5.89	4.41
5°	0.9	1.1	0.2	3.44	6.76	4.0
6°	0.8	1.1	0.2	4.13	9.88	2.5
7°	0.7	0.7	0.9	3.67	2.87	2.48
8°	0.1	0.7	1.7	4.10	3.68	3.52
9°	0.6	0.2	0	6.18	16.7	0.7

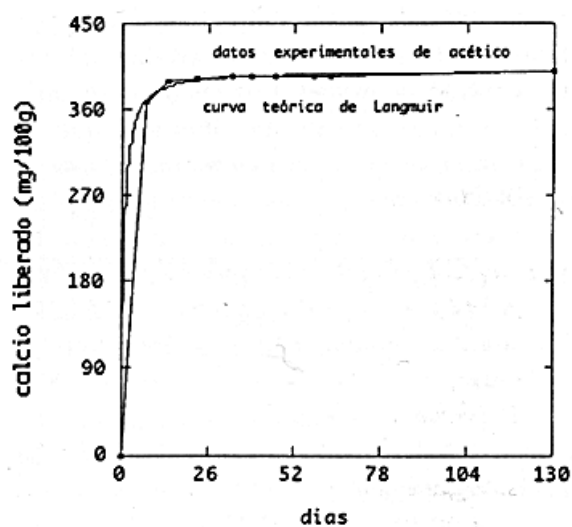


Figura 10. Relación entre la pérdida experimental de calcio por acético en serpentina con la ecuación teórica de Langmuir.

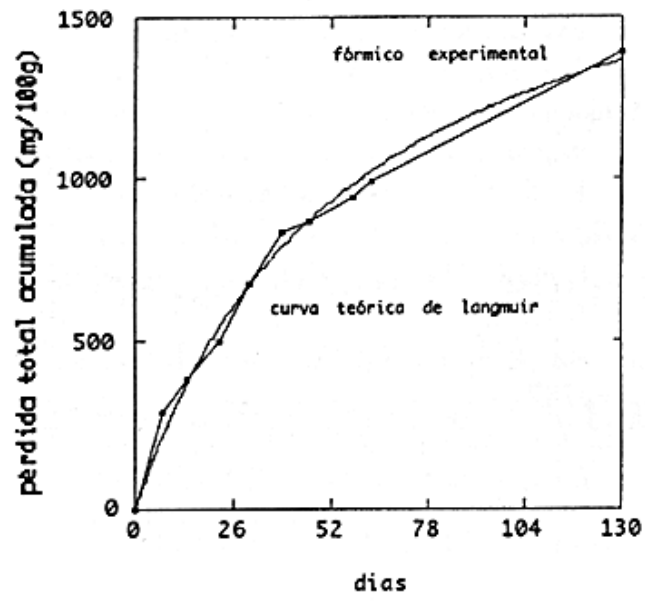


Figura 11. Relación entre la pérdida experimental total acumulada por fómico en filita con la ecuación teórica de Langmuir.