

TEORÍA DE ESTADOS Y TRANSICIONES APLICADA A SUELOS VOLCÁNICOS SOMETIDOS A DIFERENTES MANEJOS I: RELACION MOLAR (Si_o-Si_d)/(Al_o-Al_d)

⁽¹⁾Sara Covalada, ⁽²⁾Fernando Paz, ⁽¹⁾Juan F. Gallardo, ⁽³⁾Christian Prat, ⁽²⁾Jorge D. Etchevers y ⁽²⁾Claudia Hidalgo

¹C.S.I.C. Salamanca (España); ²Colegio de Postgraduados de Montecillo, Texcoco (México); ³IRD, LTHE, Grenoble (Francia). <jgallard@usal.es>

RESUMEN. La evolución de un suelo afectado por eventos naturales o externos puede ser interpretada según un Modelo de Estados y Transiciones (MET) que considere la interacción suelo-vegetación. En el caso que se presenta se demostró que la intensidad de la degradación influye directamente en la estabilización del C orgánico del suelo (COS) en función de la relación molar (Si_o - Si_d/ Al_o- Al_d) de tal manera que es posible establecer las posibles trayectorias en la degradación desde un bosque conservado hasta el suelo desnudo.

Palabras clave: Estados y transiciones, captura de C, Andosoles

INTRODUCCIÓN. Los MET permiten capturar las dinámicas de no-equilibrio al nivel de sitio. El concepto MET puede ser aplicado a estudios edafológicos y tiene que ver con la evolución de un suelo afectado por eventos naturales o externos (13). La capacidad que tenga un suelo para seguir funcionando dentro de un ecosistema dado se deberá a características inherentes a él, a la dinámica de las propiedades que lo conforman y a su capacidad de respuesta a eventos externos (15). Las propiedades del suelo pueden ser clasificadas en dinámicas (humedad, COS, nutrientes, agregación, costras, salinidad, edafofauna, etc.) y estáticas o intrínsecas (textura, mineralogía, pendiente, etc.).

Cuando uno o más de los procesos ecológicos primarios responsables del mantenimiento sostenido del equilibrio de un estado (situación actual) se degradan por debajo del punto de la "auto-reparación", se dice que se ha cruzado un **umbral**. En ausencia de una restauración activa, se forma un nuevo estado. Por otra parte, una **transición** es una trayectoria de cambio, precipitada por eventos naturales y/o acciones de manejo que degrada la integridad de uno o más de los procesos ecológicos primarios. Las transiciones pueden ser reversibles o irreversibles, una vez que se ha cruzado un umbral (2). El problema es obtener la información edáfica adecuada que permita realizar proyecciones correctas de su comportamiento actual (estado) y de los posibles cambios que sufra (transiciones). Por ello, se puede considerar el suelo como un indicador temprano de sobrepasar umbrales que

rompan irreversiblemente la estabilidad de un ecosistema.

La materia orgánica ejerce una influencia importante en muchas de las propiedades químicas y físicas de los Andosoles mejorando la actividad biológica y la productividad (16); de hecho, los Andosoles tienen una gran capacidad de almacenar COS en comparación con otros suelos minerales (4), debido en parte a la acumulación de Al y Fe activos, muy reactivos (8). La estabilización de la materia orgánica en estos suelos puede ser consecuencia de la formación de complejos Al/Fe-humus o de la adsorción de ésta al alofano, imogolita y ferrhidrita (3).

El presente trabajo utiliza un esquema de estados de transición (ET) con el fin de relacionar los procesos encargados de la estabilización del COS en suelos derivados de cenizas volcánicas con la vegetación existente, considerando la vegetación como factor origen del valor del COS.

MATERIALES Y MÉTODOS. El área de estudio se sitúa en la microcuenca de Atécuaro, al Sudeste de Morelia, en Michoacán (entre 19° 33' y 19° 37'N; y 101° 09' y 101° 15'W). Los tipos de suelo predominantes en la zona son los Andosoles húmicos y Acrisoles órticos (5). El clima es templado subhúmedo. La precipitación media anual de la zona está entre 800 y 1000 mm a⁻¹, el 85 % de las cuales ocurren entre junio y octubre. En una ladera sobre Andosol se seleccionaron once sitios que incluían los cuatro usos del suelo: pastizal (P1), forestal (B1-B7), extracción de leña (I) y cultivo (C1, C2). El punto más alto (P1) está a 2615 m.s.n.m. y el más bajo (B7) está a 2320 m.s.n.m. La zona forestal ha sufrido intensamente la actividad humana en forma de extracción de madera sin arreglo a ningún plan de manejo, por ello los puntos seleccionados presentan diferentes estados de degradación del ecosistema natural. El área utilizada para obtener leña sufrió un incendio en el año 2000. En parcelas de 314 m² se tomaron muestras compuestas de suelo (5 submuestras) hasta 10 cm de profundidad (capa más afectada por impactos) utilizando una barrena cilíndrica. Se determinó, además, la densidad del arbolado en los bosques, diferenciando entre especies del género *Pinus* y latifoliadas (encinos). La toma de datos en campo se llevó a cabo en mayo de 2004

en todos los puntos, a excepción de los puntos P1, B1 y C2, muestreados en abril de 2005. Las formas activas de Al y Si se extrajeron con oxalato ácido 0.2 M (Alo y Sio), las orgánicas con pirofosfato sódico (Alp) (4) y las denominadas libres con ditionito-citrato (Ald y Sid). El COS se

determinó por combustión seca (TOCA) y el pH en agua con relación 1:2.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN. En el cuadro 1 se muestran los valores del COS en cada punto y los parámetros que pueden contribuir a explicar sus procesos de estabilización en el suelo.

Cuadro 1. COS, pH y formas de Al y Si determinadas en los puntos de muestreo

	C (%)	pH H ₂ O	Alo (%)	Sio (%)	Alp (%)	Ald (%)	Sid (%)	Alp/Alo	(Sio-Sid)/(Alo-Ald)
B1	25.4	5.2	4.6	0.5	1.23	3.2	0.4	0.3	0.06
B2	14.8	5.7	2.9	0.7	1.60	1.6	0.1	0.5	0.40
B3	12.9	5.8	3.8	1.1	1.38	2.0	0.2	0.4	0.50
B4	11.9	6.1	2.9	1.2	0.97	1.2	0.2	0.3	0.60
B5	10.5	6.0	3.7	1.5	0.86	1.7	0.2	0.2	0.63
B6	10.0	6.3	3.4	1.6	0.68	1.5	0.2	0.2	0.71
B7	6.4	5.6	2.7	0.7	1.29	1.5	0.2	0.5	0.46
P1	5.8	5.6	6.2	0.5	0.92	3.7	0.4	0.1	0.05
I	6.8	5.8	0.5	0.4	1.15	1.3	0.2	2.3	-0.29
C1	5.8	5.5	2.7	1.0	1.18	2.1	0.3	0.4	0.38
C2	5.8	5.6	3.7	0.5	0.80	2.1	0.3	0.2	0.14

Matus *et al.* (6) encontraron que los complejos del Al-humus eran los principales responsables de las variaciones en la materia orgánica de los suelos volcánicos chilenos. Según Mizota y van Reeuwijk (7) en los suelos derivados de cenizas volcánicas suelen coexistir alofano/imogolita y complejos de Fe- y Al-humus. Estos dos grupos de constituyentes no cristalinos están relacionados inversamente porque las condiciones que favorecen la formación de unos y otros son diferentes (10). La disponibilidad de Al³⁺ parece ser el factor crítico que regula la formación de andosoles alofánicos o no alofánicos (3). Si el pH es superior a 5.0, la asociación alofano/imogolita tenderá a dominar y si es menor entonces abundarán los complejos Al- y Fe-humus. Otro indicador de cual de estos dos componentes domina sería la razón Alp/Alo, Nanzyo *et al.* (8) establecieron el límite de Alp/Alo < 0.5 para los alofánicos. La Fig. 1 muestra que la parcela I (Alp/Alo=2.3) y B2 (Alp/Alo=0.54) pueden considerarse como no-alofánicas; aunque para el caso de la B2 esto no es necesariamente cierto, tal como se ve más adelante. Nanzyo *et al.* (8) mostraron que hay una relación inversa entre la acumulación del COS y la formación de arcillas alofánicas debido al papel anti-alofánico que juega el COS, ya que el humus y los silicatos 2:1 compiten por el Al disuelto, dejando poco Al disponible para la co-precipitación con sílice.

La relación (Alo-Alp)/Sio ha sido usada para determinar la razón Al:Si (2, 10). El Alp es sustraído del Alo para corregir la remoción de los complejos Al-humus, no obstante, otras fases del

Al son parcialmente atacadas por el oxalato, por lo que se tiende a sobreestimar la razón Al:Si.

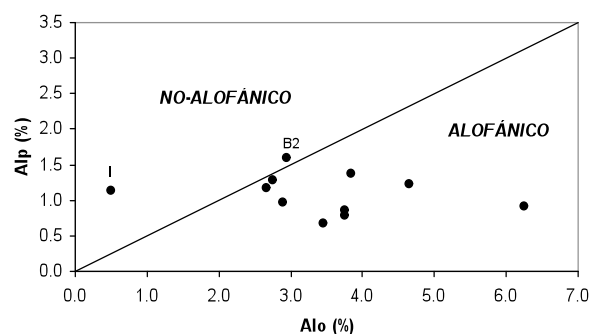


Figura 1. Puntos alofánicos y no-alofánicos

Dahlgren y Ugolini (1) usaron Alo-Ald/Sio, al considerar que el Ald no ataca la imogolita, aunque disuelve una parte del Al interlamilar. Por otra parte, Shoji y Fujiwara (12) emplearon la razón molar (Si_o - Si_d/ Al_o - Al_d) que en el rango de 0.8 a 1.1 corresponde aproximadamente a la relación Si/Al del alofano y la imogolita. Cuando esta razón resultó inferior (como en el presente caso), se atribuyó a la disolución del Al interlamilar de silicatos 2:1. En este trabajo se propone utilizar la recién citada relación molar para explicar las variaciones del COS como consecuencia de la degradación del ecosistema (Fig. 2). La ventaja de usar esta relación es que permite distinguir entre andosoles alofánicos y no-alofánicos, ya que (Sio-Sid) es negativo o cercano a cero para el caso de los no-alofánicos. El punto B2 tiene un comportamiento alofánico.

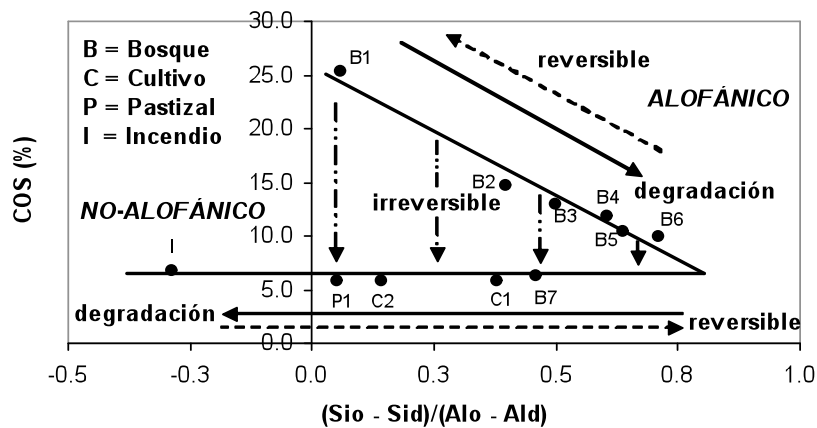


Figura 2. Variación del COS en función de la razón (Sio-Sid)/(Alo - Ald) y su relación la degradación del ecosistema

Las trayectorias irreversibles son debidas a la tala excesiva y las reversibles a la transición del BPE (bosque de pino-encino) a BE (bosque de encinos) según aumenta la degradación (ver más adelante). El punto central que permite explicar la Fig. 2 es la rápida cinética de las reacciones del Al intercambiable y el asociado a sustancias húmicas, tanto en los Andosoles alofánicos como en los no alofánicos (3) ya que esta sería la causa por la que el C lábil (inestable) es rápidamente perdido al producirse una perturbación en el medio ambiente (degradación del BPE) capaz de modificar las condiciones de las reacciones edáficas. Ésto sugiere que la resiliencia (11) de los estados de la vegetación permite la existencia de múltiples estados “estables”, en función de la proporción de COS estable (recalcitrante) e inestable presentes (Fig. 3), hasta que toda la fracción lábil es perdida (línea horizontal en la Fig. 2).

La degradación del BPE puede esquematizarse en función del cambio en la composición vegetal (sustitución de pinos por encinos), de acuerdo a la Fig. 4. Asimismo, al incrementarse el porcentaje de encinos, la densidad total del arbolado disminuye (desacoplamiento del medio ambiente), generando un sistema BPE más degradado.

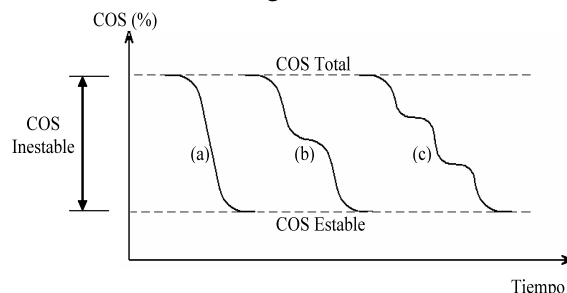


Figura 3. Múltiples estados estables en el COS

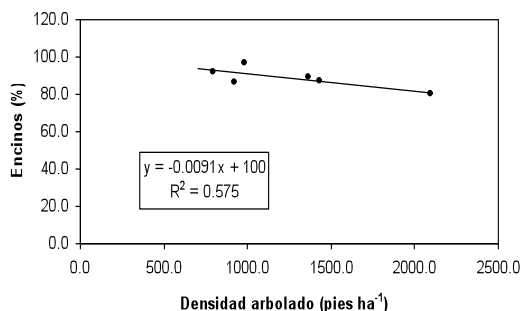
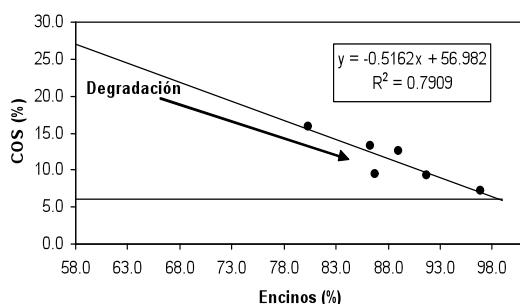


Figura 4. Efecto de la proporción de encinos presentes sobre el COS y la densidad arbórea

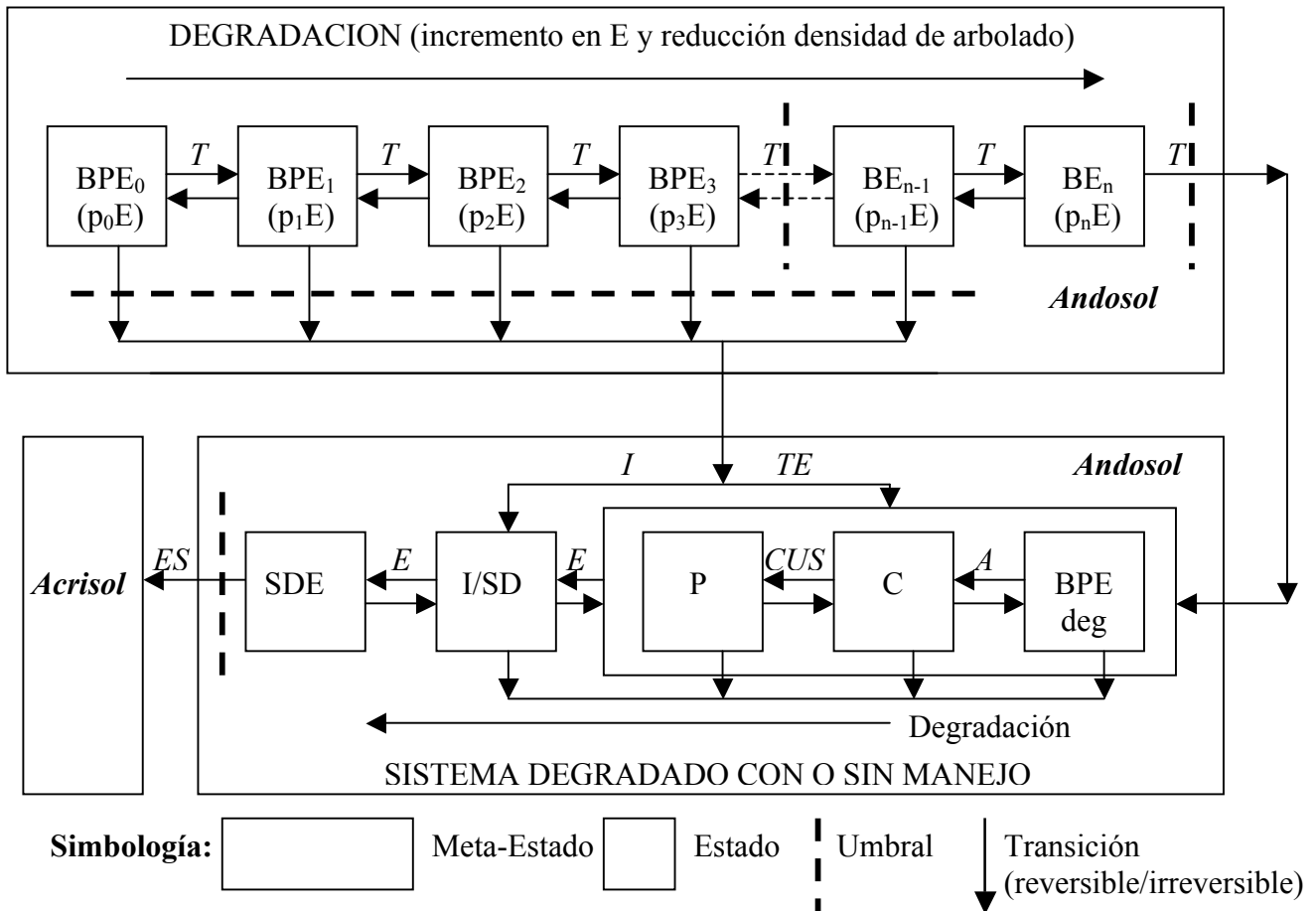
De acuerdo a la información analizada, se puede elaborar un MET (esquemático), tal como se muestra en la Fig. 5 donde se diferencian dos meta-estados, asociados a determinados manejos y perturbaciones. Dentro de cada meta-estado se dan diferentes estados reversibles hasta que, siguiendo la trayectoria de la degradación, se sobrepasa un umbral. El parámetro “p” representa la fracción de encinos en el sistema. Cuando

p=0.98 (98 % en Fig. 4) en el sistema hay prácticamente sólo encinos, lo cual implica que nos encontramos en un estadio final de la degradación del bosque, si p=0.58 el sistema BPE estaría en equilibrio. Partimos, por tanto, de un sistema de BPE en equilibrio con un almacén de COS estable que, debido a la extracción selectiva de pinos se va degradando progresivamente perdiendo densidad de arbolado hasta que se

sobrepasa un umbral y el BPE se transforma en BE. Acciones como la tala extrema que tienen como fin obtener tierras de cultivo o pastizal, o fenómenos como un incendio pueden provocar cambios de manera más drástica ya que dejan el suelo expuesto a la erosión pudiendo aflorar un horizonte del Acrisol subyacente que presenta otras propiedades. Un sistema que evoluciona en el sentido que marca la degradación va viendo mermado su almacén de COS pudiendo llegar a perder, en el caso de la degradación máxima del

bosque o de tala extrema, hasta un 75 % del COS en la capa superficial de suelo, que es la más rica en materia orgánica.

A partir de este esquema es posible plantear acciones de manejo en función del punto de partida y el estado al que se quiera llegar, en caso de tener que sobrepasar un umbral sería necesario un mayor esfuerzo técnico y operacional y, por supuesto, si el umbral de degradación es irreversible no sería posible recuperar el estado inicial.



T = Tala; I = Incendio; TE = Tala Extrema; A = Abandono; E = Erosión CUS = Cambio Uso del Suelo; ES = Erosión Severa; BPE = Bosque de Pino-Encino; BE = Bosque de Encino; P = Pastizal; C = Cultivo; BPE deg = Bosque de Pino-Encino degradado (en recuperación); I/SD = Área Incendiada/Suelo Desnudo; SDE = Suelo Desnudo Erosionado; $p_0 = 0.58$ y $p_n = 0.98$

Figura 5. Modelo esquemático de estados y transiciones

CONCLUSIONES. La razón molar ($Si_0 - Si_d / Al_0 - Al_d$) permitió explicar las variaciones del COS como consecuencia de la degradación del ecosistema. El MET propuesto permite identificar distintos estados y las posibles trayectorias desde la situación actual así como el riesgo de cruzar

umbrales que harían muy difícil recuperar el bosque conservado y almacén potencial de COS del sistema. En la actualidad continúan los trabajos en esta región con el fin de tener más datos que confirmen el MET presentado.

LITERATURA CITADA.

1. Dahlgren, R.A. y Ugolini, F.C., 1991. Distribution and characterization of short-range-order minerals in Spodosols from

Washington Cascades, Geoderma, 48: 391-413
 2. Dahlgren, R., Shoji, S. Y Nanzyo, M. 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash

- soils, In: S. Shoji, M. Nanzyo y R. Dahlgren, R. (Eds.), *Volcanic Ash Soils-Genesis, Properties and Utilization*, *Developments in Soil Science* 21, Elsevier, Amsterdam, pp. 101-143
3. Dahlgren, R.A., M. Saigusa y F.C. Ugolini. 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomie* 82: 113-182.
 4. Eswaran, H., E. Vandenberg y P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of American Journal* 57: 192-194.
 5. INEGI. 1982. Carta edafológica E14A23 Esc. 1: 50 0000.
 6. Matus, F., Amigo, X. y Kristiansen, S.M., 2006. Aluminum stabilization controls organic carbon levels in Chilean volcanic soils, *Geoderma*, 132: 158-168
 7. Mizota, C y L.P Van Reeuwijk. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. *Soil Monograph* 2. ISRIC. Wageningen. 186 pp.
 8. Nanzyo, M., R.A. Dahlgren y S. Shoji. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. En: Shoji, S., M. Nanzyo, R. Dahlgren (eds.). *Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization*. Elsevier Science Publishers. Amsterdam. pp: 145-187.
 9. Parfitt, R.L. y A.D. Wilson. 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. En: Caldas, E.F y D.H. Yaalon (eds.). *Volcanic soils, weathering and landscape relationships of soils on tephra and basalt*. *Catena supplement* 7. Catena Verlag, Dordrecht.. pp 1-8.
 10. Parfitt, R.L. y Kimble, J.M., 1989, Conditions for formation of allophane in soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 971-977
 11. Seybold, C.A., Herrick, J.E. y Brejda, J.J., 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality, *Soil Science*, 164: 224-234
 12. Shoji, S. y Fujiwara, Y. 1984. Active aluminum and iron in the humus horizons of Andosols from Northeastern Japan: their forms, properties, and significance in clay weathering, *Soil Science*, 137: 216-226
 13. Stringham, T.K., W.C. Krueger, y P.L. Shaver. 2001. States, transitions and thresholds: Further refinement for rangeland applications. Special Report 1024. Agricultural Experiment Station, Oregon State University, Corvallis OR, USA. <http://www.ftw.nrcs.usda.gov/glti/pubs.html>.
 14. Stringham, T.K, W.C. Krueger y P. L Shaver. 2003. State and transition modeling: An ecological process approach. *Journal of Range Management* 56: 106-113.
 15. Tugel, A.J. y Brown, J.R., 2001, State and transition ecosystem models – application to soil survey and dynamic soil properties databases, En: *Proceedings of the National Cooperative Soil Survey Conference*, June 25-29, Ft. Collins, CO. pp: 194-201.
 16. Quantin, P., 1991. Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Etude de la pédogénèse initiale en milieu tropical, Louis Pasteur, Stasbourg, France, 490 pp

AGRADECIMIENTOS. Los autores agradecen a Aurelio Báez, Paola Bustos, Lenin Medina y a Crecenciano Chavez su colaboración en los trabajos de campo y a la División General XII de la Unión Europea la financiación del Proyecto *REVOLSO*.

Covaleda S., Paz F., Gallardo J.F., Prat Christian, Etchevers J.D., Hidalgo C.

Teoria de estados y transiciones aplicada a suelos volcanicos sometidos a diferentes manejos : 1. Relacion molar (Sio-Sid)/(Alo-Ald).

In : Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo. Leon : SLCS, 2007, 5 p. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 17., Leon (MEX), 2007/09/17-21.