
FIJACION DE FOSFORO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZA VOLCANICA

J. Espinosa¹

Resumen

Los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) cubren una apreciable área de América Central y América del Sur. La fracción arcilla de estos suelos está dominada por alofana, imogolita y halloisita (minerales amorfos de rango corto) que provienen de la meteorización de los materiales piroclásticos producto de recientes deposiciones volcánicas. Investigación conducida en los últimos años ha demostrado que los complejos humus aluminio (Al) juegan también un significativo papel en el comportamiento de los Andisoles.

Una de las características más importantes de los Andisoles es su capacidad para inmovilizar (fijar) fósforo (P) en la superficie de los minerales amorfos. Esta es la principal limitante química de los Andisoles. Aparentemente, la capacidad de fijación de P de los Andisoles varía con el tipo de arcilla presente y esto a su vez cambia el efecto residual de las aplicaciones de fosfato. En ciertos cultivos, los estudios de calibración no han logrado correlacionar adecuadamente el contenido de P en el suelo con las recomendaciones de fertilización.

Mecanismos de fijación de P en Andisoles

Inicialmente se consideró que la fijación de P en los Andisoles ocurría solamente en las superficies activas de la alofana y la imogolita. Los mecanismos de fijación de P en la alofana e imogolita incluyen procesos como quemiasorción, desplazamiento de silicio (Si) estructural y precipitación. Sin embargo, se ha reconocido la importancia de los complejos humus-Al en este proceso. La fracción humus en Andisoles forma fácilmente complejos con metales como el Al. El carbono (C) atrapado en estos complejos es inactivo y deja de ser parte de del C de activo de la fracción orgánica. Por otro lado, los

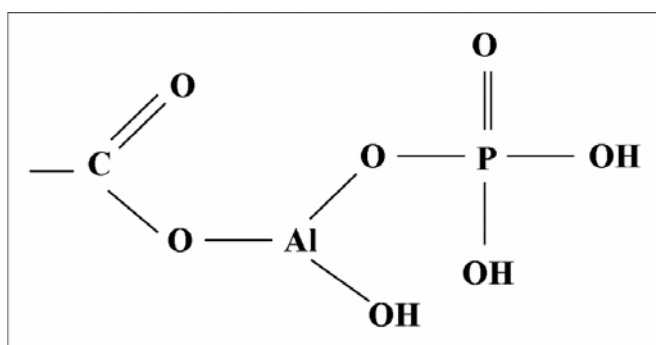


Figura 1. Representación esquemática de la fijación de fósforo en los complejos humus-Al (Sollins, 1991).

grupos hidroxilo combinados con el Al acomplejado entran en reacciones de intercambio de ligandos con HPO_4^- y H_2PO_4^- como se observa en la **Figura 1**, fijando fuertemente el P aplicado.

De igual manera, este fuerte acomplejamiento del Al con el humus limita la posibilidad de coprecipitación de Al con Si, liberados de la descomposición de la ceniza volcánica, lo que a su vez limita también la formación de

¹ INPOFOS Norte de América Latina (PPI/PPIC)-Gaspar de Villarroel 154, Quito – Ecuador. Correo electrónico: jespinosa@inpofos.org

alofana. Estos procesos se han documentado en Andisoles de Japón, Colombia y Ecuador (Wada y Kakuto, 1985; Inoue y Higashi, 1988; Benavides y Gonzáles, 1988; Zehetner et al., 2003).

La acumulación de humus es mayor en suelos volcánicos localizados a mayor altitud (> 2500 m sobre el nivel del mar). Evidencia indirecta obtenida en Andisoles de Ecuador y Colombia permite concluir que la fijación de P está estrechamente relacionada con el contenido de C en el suelo (complejos humus-Al). Indirectamente, esto también indicaría cuales minerales arcillosos se formarían a partir de la ceniza volcánica en determinadas condiciones y la intensidad de la fijación de P. Aparentemente los suelos alofánicos tienden a fijar menos P.

Datos de un experimento exploratorio de invernadero diseñado para estudiar la relación entre el carbono total y la fijación de P se presentan en la **Tabla 1**. Se sembró sorgo en macetas que contenían suelo tratado con diferentes dosis de P. Después de la cosecha, se caracterizó la retención de P en los suelos de cada una de las macetas usando la técnica descrita por Fassbender (1969). Los datos de este experimento sugieren que de hecho existe una estrecha relación entre el C total y la fijación de P. Se observa también que la retención de P no se reduce con las altas dosis de P aplicadas a este Udand que tiene un alto contenido de C total. Se esperaba que las altas dosis de P podrían satisfacer o al menos reducir la capacidad de fijación de este suelo.

Tabla 1. Efecto de las dosis de fósforo en la subsecuente retención de este elemento en dos Andisoles de Ecuador con diferente contenido de carbono (Espinosa et al., 1987).

Dosis de P ₂ O ₅ kg/ha	Carbono Total		P fijado después de la 1 ^{era} cosecha	
	Udand	Eutrad	Udand	Entrad
0	5.0	1.2	42	14
150	5.3	1.1	40	11
300	4.9	1.1	40	8
450	5.1	1.1	42	8

Datos recientes de un estudio de pedogénesis de un transecto del volcán Cotacachi en Ecuador (**Tabla 2**) confirmaron el hecho de que la fijación de P está asociada directamente con la presencia de C orgánico en el suelo (Zehetner et al., 2003). Se encontraron dramáticas diferencias altitudinales con respecto a la formación pedogenética de los minerales del suelo. Se determinó que la fracción arcilla de las zonas situadas a elevaciones superiores a 3200 m snm (sobre el nivel del mar) estaban

dominadas complejos humus-Al, las zonas entre 3200 y 2700 m snm por complejos humus-Al y alofana y que bajo 2700 m snm no existe presencia de complejos humus-Al. Diferencias en la zonificación se pueden presentar por efecto de las cambiantes condiciones de humedad y temperatura en los diferentes áreas desarrolladas sobre ceniza volcánica en América Latina.

Desde el punto de vista práctico, es aparente que en Andisoles, el contenido de C total podría ser un buen parámetro para determinar la capacidad de fijación de P de un suelo. En la **Figura 2** se presenta la correlación entre el P fijado y el contenido de C total de 42 Andisoles de Ecuador. Un estudio en Andisoles en Chile (**Figura 3**) demuestra la misma tendencia al encontrar una buena correlación entre el P retenido por la fracción orgánica y el contenido C total en el suelo (Briceño et al., 2004). Experimentación de campo deberá confirmar si esta relación se mantiene y cómo estos parámetros se

podrían relacionar con el diagnóstico del contenido de P en el suelo y con las recomendaciones de fertilización.

Tabla 2. Contenidos de carbono, aluminio asociado con el carbono y retención de fósforo en un transecto de suelos derivados ceniza volcánica alrededor del volcán Cotacachi, Ecuador (Adaptado de Zehetner, 2003).

Horizonte ¹	Carbono ² (%)	Aluminio asociado al carbono ³ (g/kg)	Fijación de Fósforo ⁴ (%)
Pedón 1, 4050 m snm			
A	7.5	7.0	90
AB	3.8	4.4	89
Pedón 2, 3900 m snm			
A1	10.3	10.1	91
A2	4.1	4.9	87
Pedón 3, 3400 m snm			
A	7.7	7.6	88
AC	2.4	4.0	79
Pedón 4, 3000 m snm			
A	3.4	3.6	61
Pedón 5, 2950 m snm			
A1	3.6	3.0	46
A2	3.0	3.4	46
Pedón 6, 3060 m snm			
A	6.4	5.6	74
Pedón 7, 2900 m snm			
A1	3.1	3.0	52
A2	2.2	2.4	48
Pedón 8, 2740 m snm			
Ap	2.3	1.7	26
A	2.1	2.6	38
Pedón 9, 2570 m snm			
Ap	0.9	0.2	4
A1	0.5	0.2	4
Pedón 10, 2560 m snm			
A	0.3	0.2	7
Pedón 11, 2630 m snm			
A	0.6	0.3	6
Pedón 12, 2410 m snm			
A1	0.4	0.1	6
A2	0.6	0.1	6

¹ Horizontes de diferente profundidad.
² Carbono total determinado por combustión seca (Tabatabai and Bremner, 1991).
³ Aluminio asociado con la materia orgánica extraído con pirofosfato de sodio a pH 10 (Wada, 1989).
⁴ Diferencia después de 16 h de agitación con una solución de 1000 mg/L de P (Soil Survey Staff, 1996).

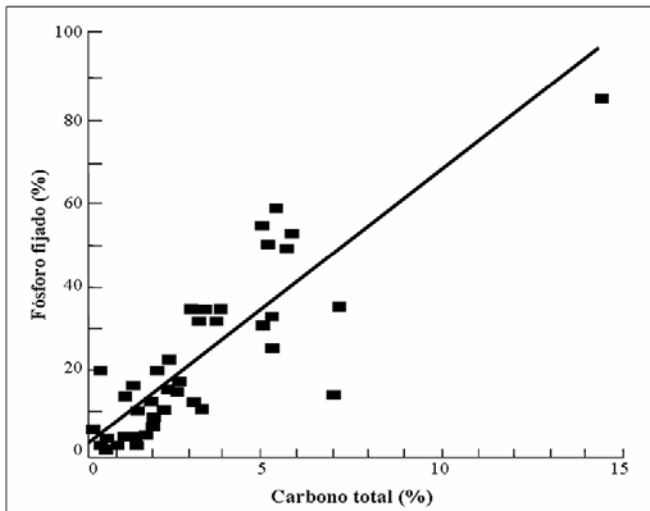


Figura 2. Correlación entre el contenido de carbono total y el porcentaje de fijación de fósforo en Andisoles de Ecuador (Espinosa et al., 1987).

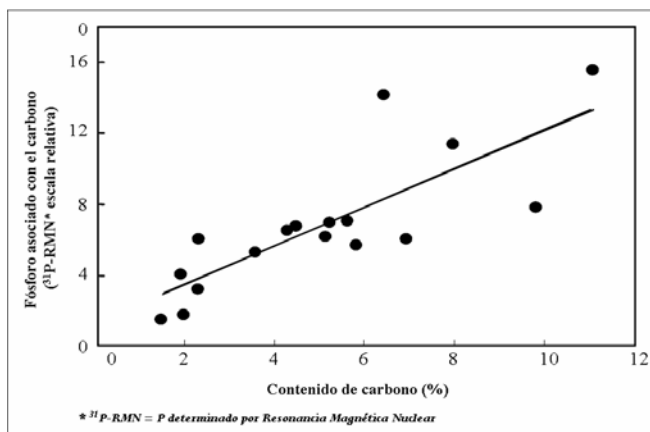


Figura 3. Correlación entre el contenido de carbono total y el porcentaje de fijación de fósforo en Andisoles de Chile (Briceño et al., 2004).

Efecto residual de aplicaciones de P en Andisoles

Datos de investigación de varias partes del mundo han reportado que los estudios de calibración, conducidos en Andisoles, para correlacionar el P extractable con el rendimiento y los requerimientos de P de los cultivos no han sido siempre exitosos. En la **Tabla 3** se presentan datos de un experimento de invernadero conducido en un Andisol de Hawaii, el cual, de acuerdo con el análisis de suelo, tenía un adecuado suplemento de P. Sin embargo, los datos de rendimiento indican que el contenido de P en el suelo no fue suficiente para mantener el crecimiento de dos plantas indicadoras, brachiaria y lechuga.

Resultados similares se obtuvieron en experimentos de campo conducidos en Andisoles de la Sierra alta de Ecuador (INIAP, 1991). En estos experimentos se cultivó papa en las mismas parcelas por tres ciclos consecutivos. Los resultados presentados en la **Tabla 4** indican que los rendimientos obtenidos en la parcela testigo son bajos aún cuando el contenido de P en el

suelo, extraído con NaHCO_3 , es alto (28 ppm). Se supone que el nivel crítico general para estos suelos es 12 ppm. Por otro lado, existió una apreciable respuesta en rendimientos a las dosis crecientes de P en todos los ciclos, indicando que el efecto residual de P es bajo, aún cuando el análisis de suelo no reflejaba este hecho. El contenido de P se incrementó a 38 y 59 ppm en las parcelas que recibieron una aplicación de 300 y 450 kg de $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$, respectivamente. Sin embargo, el rendimiento de tubérculos en el tercer ciclo, en las mismas parcelas, pero sin aplicación de P, fue de nuevo bajo (**Tabla 4**). La misma tendencia se observa tanto en las aplicaciones bajas como en las aplicaciones altas de P. Se sospecha que existiría la misma tendencia si se hubiesen utilizado otros extractantes en el análisis de P en el suelo.

Los datos presentados en la **Tabla 5** sugieren que aún aplicaciones de dosis muy altas de P no satisfacen la capacidad de fijación de este suelo, y el efecto residual es bajo.

Tabla 3. Respuesta a la aplicación de fósforo en un Eutrandedpt de Hawai (Adaptado de Fox, 1980).

Braquiaria		Lechuga	
Dosis de P ppm	Rendimiento relativo %	Dosis de P ppm	Rendimiento relativo %
0	6	0	26
50	76	240	59
150	100	520	79
		850	96

Contenido inicial de P en el suelo (ppm): Bray 1 = 61; Bray 2 = 175; Olsen = 35

Para obtener un adecuado rendimiento de tubérculos en este Andisol es necesaria la aplicación de P en cada ciclo.

El suelo utilizado en el experimento descrito anteriormente (Udand) es típico de las áreas productoras de papas de Ecuador, Colombia, Panamá y Costa Rica. El contenido de C en este suelo es 5.3% y se considera que los complejos humus-Al serían los componentes dominantes en la fracción arcilla. Es difícil distinguir entre suelos

dominados por alofana, imogolita o complejos humus-Al, y hasta hace poco, los suelos conteniendo estos minerales estaban agrupados en el suborden Andept en el orden de los Inceptisoles. A partir de 1988 se creó un nuevo orden de suelos denominado Andisol para agrupar todos los suelos derivados de materiales volcánicos (ICOMAND, 1986 ; Arnold, 1985). Este nuevo agrupamiento dentro de la taxonomía de suelo permite la separación de los suelos dominados por complejos humus-Al de los suelos dominados por alofana e imogolita. Este hecho podría permitir una mejor caracterización de la fijación de P en suelos derivados de ceniza volcánica.

Tabla 4. Efecto residual de P en el rendimiento de papa y la relación con el contenido de P según el análisis de suelo en un Udand de la Sierra Alta de Ecuador.

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3		Nivel de P*
P ₂ O ₅ kg/ha	Rendimiento t/ha	P ₂ O ₅ kg/ha	Rendimiento t/ha	P ₂ O ₅ kg/ha	Rendimiento t/ha	ppm
0		0	6.04	0	6.37	28
0	3.09	0	5.90	300	32.39	41
0		300	39.34	300	31.19	46
150		0	9.90	0	8.33	28
150	18.46	150	32.65	0	11.32	32
150		150	35.44	150	34.45	40
300		0	15.92	0	7.90	27
300	27.60	300	36.54	0	12.44	38
300		300	39.86	300	32.63	64
450		0	18.84	0	13.21	34
450	27.74	450	42.55	0	24.09	59
450		450	45.12	450	28.28	89

* Contenido de P en el suelo después del tercer ciclo ; P extraído con NaHCO₃ (Olsen)

Experimentos de largo plazo han demostrado que los niveles críticos de P, considerados adecuados para un cultivo en un tipo particular de suelo, cambian cuando se siembra otro cultivo en la rotación (Smith y Cravo, 1990). Observaciones similares se han reportado en suelos volcánicos de Ecuador y Colombia. Como se discutió anteriormente, el efecto residual de las aplicaciones de P en el cultivo de la papa es bajo

en este tipo de suelos, pero lo contrario ocurre con mezclas forrajeras sembradas en el mismo suelo. **La Tabla 6** ilustra la falta de respuesta a la aplicación de P en el cultivo de pastos, cuando el contenido de P en el suelo es alto (35 ppm extraídos con NaHCO₃), observándose además un buen efecto residual. Este comportamiento sugiere que existen diferentes niveles críticos de P para diferentes cultivos sembrados en el mismo Andisol.

Tabla 5. Rendimiento de papa en el tercer ciclo en relación con las aplicaciones previas de P en un Andisol de Ecuador.

Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Total de P ₂ O ₅ aplicado	Rendimiento
----- kg P ₂ O ₅ /ha -----				t/ha
0	0	300	300	32.39
150	150	0	300	11.32
300	0	0	300	7.9
150	150	150	450	30.45
450	0	0	450	13.21
0	300	300	600	31.20
300	300	0	600	13.43
300	300	300	900	32.63
450	450	0	900	24.08

Tabla 6. Efecto de la aplicación y de la residualidad de P en el rendimiento de materia seca de una mezcla forrajera en un Udand de la Sierra Alta de Ecuador.

Dosis de P ₂ O ₅ kg/ha	Primera Cosecha	Cuarta Cosecha
	----- t/ha -----	
0	3.6	3.4
100	3.8	3.7
200	3.3	4.3

P aplicado antes de la siembra de la mezcla forrajera; Contenido inicial de P = 35 ppm extraído con NaHCO₃

Los datos de calibración y correlación entre el rendimiento de papa y el contenido de P en el suelo (extraído con solución Olsen modificada) determinaron que el nivel crítico de P para papa en Andisoles es de 42 ppm (**Figura 4**). Este trabajo de correlación permite utilizar el análisis de suelos como una adecuada herramienta para diseñar recomendaciones de fertilización en papa en Andisoles. Resultados similares se han reportado en Andisoles de Costa Rica y Colombia.

La violenta actividad volcánica ocurrida en el pasado envió cenizas a la atmósfera, las cuales se movieron largas distancias antes de depositarse en la superficie. Esta es la razón por la cual existen suelos derivados de cenizas volcánicas a considerables distancias del punto de origen. Algunos de estos suelos se han desarrollado en ambientes de alta humedad y temperatura localizados a bajas altitudes. Se sospecha que en estos suelos la cantidad de alofana e imogolita es alta, pero el color del suelo continua siendo oscuro y en la clasificación taxonómica antigua estaban clasificados como Dystrandeps, exactamente igual a los Andisoles de mayor altura que supuestamente tienen mayor contenido de complejos humus-Al. En el caso de estos

suelos desarrollados en diferente ambiente, el nivel crítico de 12 ppm de P en maíz ubica razonablemente bien la respuesta a la aplicación de P. Un ejemplo se presenta en la **Tabla 7** (INIAP, 1990). Sin embargo, son necesarios estudios de calibración para afinar este nivel crítico, particularmente con los nuevos híbridos de alto rendimiento.

Tabla 7. Respuesta del maíz a la aplicación de P en un Udand de la Costa Tropical de Ecuador.

Dosis de P ₂ O ₅ Kg/ha	Rendimiento t/ha
0	7.5
40	8.4
80	8.3
120	8.1

Contenido inicial de P = 12 ppm extraído con NaHCO₃

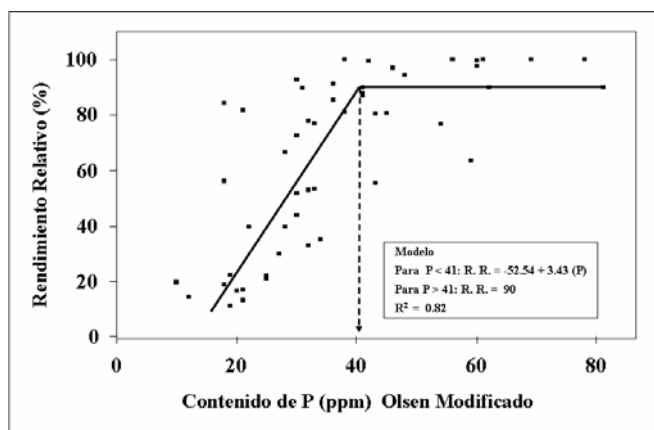


Figura 4. Determinación del nivel crítico para papa en Andisoles de altura (> 2500 m snm) en base a los estudios de calibración.

Conclusiones

El potencial de fijación de P en Andisoles parece estar relacionado con la presencia de diferentes materiales en la fracción arcilla, como resultado de las diferentes condiciones de meteorización de la ceniza volcánica. Los suelos dominados por complejos humus-Al parecen tener un mayor potencial de fijar P, la cual aparentemente es difícil de satisfacer. El contenido de C total podría ser una arma de diagnóstico complementaria que ayude a determinar la capacidad de fijación de P en Andisoles.

El análisis de suelos no predice satisfactoriamente el estado del P en el suelo para ciertos cultivos en Andisoles. Es aparente que diferentes cultivos tienen diferente nivel crítico cuando son sembrados en el mismo Andisol. Es necesario un mejor trabajo de calibración de los análisis de P en el suelo en Andisoles.

Bibliografía

- Arnold, R. 1985. Rationale for an order of andisols in soil taxonomy. In F.H. Beinroth, W. Lucio, F. Maldonado, and H. Eswaran (eds.), *Proceedings of the Sixth International Soil Classification Workshop. Chile and Ecuador. Part I: Papers.* Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Santiago, Chile.
- Benavides, G. y E. Gonzales. 1988. Determinación de las propiedades Andicas y clasificación de algunos suelos de páramo. *Suelos Ecuatoriales* 17 :58-64.
- Briceño, M., M. Escudey, G. Galindo, D. Borchard, and A. Chang. 2004. Characterization of chemical phosphorus forms in volcanic soils using ³¹P-NMR spectroscopy. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35(9-10): 1323 – 1337.
- Espinosa, J. et al. 1987. Evaluación agronómica de fertilizantes fosfatados en zonas altas de Ecuador. In L. León y O. Arregocés (eds.), *Memorias Seminario de Alternativas Sobre el Uso como Fertilizantes de Fosfatos Nativos de América Tropical y Subtropical.* CIAT, IFDC, CIID. Cali, Colombia.

-
- Fassbender, H. 1969. Deficiencias y fijación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas en Latino América. In Panel Sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas, IICA, Turrialba, Costa Rica.
- Fox, F. L. 1980. Soils with variable charge : Agronomic and fertility aspect. In G. Theng (ed.), Soils with variable charge. Palmerton North, New Zealand Society of Soil Science.
- ICOMAND. 1986. International committee on the Classification of Andisols. Circular Letter N° 8.
- INIAP. 1991. Departamento de Suelos y Fertilizantes, Estación Exp. Sta Catalina. Informe técnico 1990. Quito, Ecuador.
- INIAP. 1991. Departamento de Suelos y Fertilizantes, Estación Exp. Tropical Pichilingue. Informe técnico 1990. Quevedo, Ecuador.
- Inoue, K. and T. Higashi. 1988. Al and Fe-Humus complexes in Andisols. In D. Kinloch, S. Shoji, F. Beinroth and H. Eswaran (eds.), Proceedings of the Ninth International Soil Classification Workshop, Japan, 20 July to 1 August, 1987. Published, by Japanese Committee for the 9th International Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services, Washington, D.C., USA.
- Kimble, J.M., C.L. Ping, M.E. Sumner, and L.P. Wilding. 2000. Andisols. P. E209-E224. In M.E. Sumner (ed.), Handbook of soil science. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Nanzyo, M. 1988. Phosphate reactions with andisols. In D. Kinloch, S. Shoji, F. Beinroth and H. Eswaran (eds.), Proceedings of the Ninth International Soil Classification Workshop, Japan, 20 July to 1 August, 1987. Published, by Japanese Committee for the 9th International Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services, Washigton, D.C., USA. Japanese Society of Soil Science. Tsukuba, Japan.
- Sadzawka, M. y M. Carrasco. 1985. Fósforo, In J. Tosso (ed.), Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile.
- Shoji, S., M. Nanzyo, and R.A. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Dev. Soil Sci. 21. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Smyth, J. and S. Cravo. 1990. Phosphorus management for continuous corn cowpea production in a Brazilian Amazon Oxisol. Agron J. 82 :305-309.
- Sollins, P. 1991. Effects of soil microstructure on phosphorus sorption in soils of the humid tropics. In H. Tielsen, D. Hernandez López and L. Salcedo (eds.), Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems. Saskatchewan Institute of Pedology. Saskatoon, Canada.
- Wada, K. 1980. Mineralogical characteristics of andisols. In G. Theng (ed.), Soils with variable charge. Palmerton North, New Zealand Society Soil Science.
- Wada, K., and Y. Kakuto. 1985. Embryonic halloysites in Ecuadorian soils derived from volcanic ash. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1309-1318.
- Zehetner, F., W.P. Miller, and L.T. West. 2003. Podogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:1797 – 1809.
-