

ESTRUCTURA Y QUÍMICA DEL SUELO EN UN BOSQUE DE *Castilla elastica* EN EL CARSO DEL NORTE DE PUERTO RICO: RESULTADOS DE UNA CALICATA

Christian A. Viera Martínez ^{1,2}, Oscar J. Abelleira Martínez ^{3,4} y Ariel E. Lugo³

¹ Escuela Superior Juan Quirindongo Morell, Vega Baja, Puerto Rico

² Alianza para el Aprendizaje de Ciencias y Matemáticas (AIAcMa) Universidad de Puerto Rico, Río Piedras, Puerto Rico

³ Instituto Internacional de Dasonomía Tropical

Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América Jardín Botánico Sur, 1201 Calle Ceiba, Río Piedras, Puerto Rico 00926-1115

⁴ Departamento de Biología, Universidad de Puerto Rico, Río Piedras, Puerto Rico

RESUMEN

Excavamos una calicata de suelo de 1m x 1m x 1m en un bosque dominado por *Castilla elastica*, un árbol introducido para sombra de café en el carso del norte de Puerto Rico. Encontramos cuatro horizontes (designación en paréntesis) de suelo: suelo con materia orgánica (A), suelo mineral lixiviado (E), suelo mineral aeróbico (B) y suelo saturado (C). El almacenaje total de materia orgánica del suelo fue de 143 Mg/ha. La densidad aparente y el pH del suelo aumentaron con la profundidad, el nivel freático se encontró entre 65 y 80 cm de profundidad y no se encontraron raíces a >55 cm de profundidad. Esto sugiere que la mayoría de las raíces de *C. elastica* son superficiales y probablemente no toleran la saturación hídrica permanente en el suelo. A pesar de la limitación en el volumen de suelo disponible a las raíces del bosque, la calicata contiene altas cantidades de elementos químicos necesarios para sostener la productividad primaria. Los almacenajes fueron (Mg/ha): N-13.9, P-4.0, K-1.8, Ca-19.4, Mg-3.6, Mn-15.9, Al-168, Fe-645, Na-1.1 y C-71.7. El suelo era rico en N y P y bajo en K, Ca y Mg en comparación a otros bosques de Puerto Rico.

ABSTRACT

We dug a soil pit of 1m x 1m x 1m in a forest dominated by *Castilla elastica*, a tree for shade coffee introduced in the karst of northern Puerto Rico. We found four soil horizons (designation notes in parenthesis) (A) organic soil matter (E) mineral soil leachate (B) aerobic mineral soil, and (C) saturated soil. The total storage of soil organic matter was 143 Mg/ha. Apparent soil density increased with depth, the ground-water level was between 65 and 80 cm deep, and there were no roots >55 cm deep. This suggests that most of the *C. elastica* roots are superficial and unlikely to tolerate permanent waterlogging in the soil. Despite the limitation in the amount of soil available to the roots of the forest, the pit stores large amounts of chemical elements necessary to sustain primary productivity. Storages were (Mg/ha): N-13.9, P-4.0 K-1.8, Ca-19.4, Mg 3.6, Mn-15.9, Al-168, Fe-645, Na-1.1 and C-71.7. The soil was rich in N and P and low in K, Ca and Mg compared to other forests in Puerto Rico.

Palabras clave: bosques novedosos, nutrientes del suelo, almacenaje de nutrientes en el suelo.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del mundo están surgiendo ecosistemas naturales dominados por especies introducidas después del uso y alteración humana.. Éstos han sido denominados como ecosistemas novedosos (Hobbs *et al.* 2006). Históricamente, los estudios ecológicos han sido basados mayormente en ecosistemas aparentemente prístinos, los cuales son cada vez más raros. Debido a la creciente influencia del ser humano, los ecosistemas novedosos están aumentando su área en el planeta y esto amerita que sean estudiados (Lugo 2009).

La mayoría de los estudios sobre la ecología de bosques secundarios se enfoca en la vegetación, pasando por alto la descripción detallada del suelo. El desarrollo de la vegetación depende del suelo para la adquisición de agua y nutrientes por lo que su estudio es importante para entender la vegetación. La excavación cuidadosa de un volumen de suelo -- conocido como calicata-- permite conocer el desarrollo del suelo al determinar la presencia y grosor de sus capas -- conocidos como horizontes -- la profundidad del nivel freático y la disponibilidad de nutrientes y otros elementos químicos. Este estudio describe el suelo de un bosque de *Castilla elastica*, un árbol que fue introducido a Puerto Rico para el cultivo de café en sombra. Después del abandono agrícola del área, la regeneración natural de otras especies arbóreas ha hecho de este lugar un bosque de carácter secundario y novedoso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Seleccionamos una zona adecuada donde excavamos una calicata de 1 m³ (1m x 1m x 1m) desde la superficie del suelo. Se identificó y midió la profundidad de cada horizonte usando la clave de colores de Munsell (1994). Se obtuvo una muestra de cada horizonte usando un cilindro de 98.125 cm³ para estimar la densidad aparente de suelo. Para cada horizonte se obtuvo una muestra de mayor volumen para cuantificar la concentración de los siguientes elementos químicos: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn), aluminio (Al), hierro (Fe),

sodio (Na) y carbono (C). Estimamos la materia orgánica del suelo multiplicando el almacenaje de C por dos. También determinamos la presencia de raíces y medimos la profundidad y diámetro de las raíces >0.50 cm de diámetro por horizonte.

Todas las muestras de suelo se llevaron al laboratorio del Instituto Internacional de Dasonomía Tropical. Las muestras de densidad aparente se secaron en un horno a 105 C hasta peso constante y su masa se dividió por el volumen muestreado para estimar densidad aparente del suelo en g/cm³. Las muestras para estimar la concentración y cantidad de elementos químicos se secaron al aire (40 C) utilizando un horno de *Preiser Scientific* y se molieron para que pasasen por el tamiz número 20. Para determinar la concentración total de N y C se utilizó el método de combustión seca utilizando un *LECO TruSpec CN Analyzer* (Leco Corporation 2005). Para la digestión de las muestras se utilizó H₂O₂ de 30 por ciento con una modificación del método de Luh Huang y Schulte (1985). Esta extracción determina las concentraciones totales de Ca, K, P, Mg, Fe, Al, Mn y Na. Estas concentraciones se obtuvieron usando un *Spectro Plasma Emission Spectrometer* modelo *Spectro Ciros* CCD-ICP. Se procesaron seis muestras de suelo y además se procesó material de referencia certificada (*Montana soil*/NIST-2711) para verificar la extracción total de los elementos en la muestras. Estas muestras de referencia se obtuvieron de Leco Corp (St. Joseph, MI) y Elemental Microanalysis Ltd.

Utilizamos una extracción de INKCl (Anderson e Ingram 1993) para obtener la concentración de los cationes intercambiables. El procedimiento utilizado fue el de Olsen-EDTA (NH₄-EDTA-NaHCO₃) que permite determinar la concentración disponible de Fe, Mn, K y P. Se procesaron seis muestras de suelo usando un *Spectro Ciros* CCD-ICP. El pH del suelo se midió con un metro *Thermo Orion* modelo 350 con electrodos de epoxi y diluyendo el suelo en agua y en INKCl a una razón de 1:1 (agua y suelo; McLean 1982). La pérdida de peso por ignición (LOI, por sus siglas en inglés) se obtuvo con un *Leco Thermogravimetric Analyzer* modelo TGA 701 (Leco Corporation 2009).

La concentración total (mg/g) de elementos químicos en cada horizonte se multiplicó por la densidad aparente del suelo (g/cm^3) correspondiente al horizonte, por su grosor (cm) y por 100 para estimar el almacenaje absoluto de elementos químicos en Mg/ha.

RESULTADOS

Previo a excavar la calicata, encontramos y removimos una capa fina de materia orgánica de <1 cm de grosor compuesta de hojarasca nueva a parcialmente descompuesta con poca acumulación de humus. Identificamos cuatro horizontes (designaciones en paréntesis) de suelo mayormente arcilloso y mineral: suelo con alguna materia orgánica de color marrón oscuro (A), suelo lixiviado con poca materia orgánica de color marrón (E), suelo aeróbico de color marrón fuerte (B), y suelo saturado de color marrón fuerte (C; Fig. 1, Tabla 1). La densidad aparente del suelo tendió a aumentar con la profundidad de suelo. El pH era ácido y aumentó con la profundidad.

La mayoría de las raíces >0.5 cm de diámetro se encontraron en los primeros 30 cm de suelo. Encontramos el nivel freático a 80 cm de profundidad. Sin embargo, a juzgar por la profundidad de manchas de oxidación/reducción de suelo, o moteado, el nivel freático aparenta fluctuar alrededor de los 65 cm de profundidad y no encontramos raíces de ningún tamaño a >55 cm de profundidad.

En general, la concentración total de elementos químicos disminuyó con la profundidad (Fig. 2), aunque el Ca aumentó en el horizonte B al igual que el Mg y K. Las concentraciones de P y C disminuyeron dramáticamente con la profundidad al igual que Mn entre el horizonte E y B. Con excepción de la pérdida por ignición que bajó entre el horizonte A y E, el cambio en concentración con la profundidad en el resto de los elementos no fue notable. Sin embargo, las altas concentraciones de Al y Fe y la alta pérdida por ignición de estos suelos son notables. Las concentraciones de elementos disponibles fueron mucho más bajas

que las concentraciones totales, particularmente las de Al (Tabla 2). Además, el cociente entre la concentración total y la disponible de un elemento dado varió con la profundidad del suelo (Tabla 2). La cantidad total de los elementos fue mayor en el horizonte C comparado con los horizontes A y E (Tabla 3). En algunos casos el horizonte B superaba a los horizontes A y E en el almacenaje de elementos químicos como el Mg, Ca, Al y Fe. El Na también se acumuló en los dos horizontes más profundos.

DISCUSIÓN

En el lugar de la calicata, el bosque carecía de una capa húmica gruesa y desarrollada. Es posible que hojarasca y humus sean transportados lateralmente por escorrentía y que haya una capa húmica de mayor espesor en lugares topográficamente más bajos que el área de estudio. Sin embargo, el desarrollo y presencia de un horizonte E de alta lixiviación es indicativo de vegetación boscosa en áreas de alta pluviosidad (Brady y Weil 2002). La menor densidad aparente de suelo del horizonte A refleja mayor acumulación de materia orgánica, ya sea lixiviada desde la hojarasca o por descomposición de raíces, en comparación a los horizontes de mayor profundidad. Los datos químicos del C vs. profundidad, las bajas concentraciones de Na y K y la acumulación de elementos en el horizonte C (Fig. 2, Tabla 3) apoyan esta observación sobre la alta lixiviación. La falta de raíces a mayor profundidad probablemente se debe a la saturación hídrica del suelo lo cual inhibe la oxigenación y el crecimiento de raíces. Esto implica que las raíces secundarias de *C. elastica* no toleran suelos permanentemente saturados y que la mayoría de la biomasa de raíces se encuentra en suelo aeróbico.

En los mapas de suelo vigentes se clasifica este suelo como perteneciente a la serie Complejo Tanamá-Afloramiento Rocoso (Rtf; Acevedo 1982). Sin embargo, la descripción presentada aquí corresponde más a un suelo perteneciente a la serie Almirante arilloso (AnC) la cual se encuentra en valles y depresiones del curso cercanas al área de estudio (Báez *et al.* SF). Es posible que la

FIGURA 1. Fotografía de una pared de una calicata de suelo en el bosque de *Castilla elastica*, El Tallonal, Arecibo, Puerto Rico. Las líneas horizontales y escala lineal delimitan los cuatro horizontes y su profundidad en la calicata. El nivel freático es visible en el suelo de la calicata. La excavación se realizó el 24 de junio del 2008.



TABLA 1. Profundidad de horizontes, densidad aparente de suelo, pH y grosor de raíces >0.5 cm de diámetro presentes en cada horizonte de una calicata excavada en un bosque de *Castilla elastica* en El Tallonal, Arecibo, Puerto Rico.

Horizonte (cm)	Profundidad	Densidad Aparente (g suelo/cm ³)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	Grosor de Raíces (cm)
A	0-13	1.01 (0.03)	6.28	5.53	1.8, 4.9
E	13-29	1.34 (0.08)	6.19	5.46	0.6, 0.9, 4.0
B	29-61	1.25 (0.05)	5.95	5.44	1.1
C	61-100	1.48 (0.03)	5.79	5.10	0

resolución de los mapas de suelo no haya sido tan detallada como para capturar cambios en el suelo encontrados en valles o depresiones angostas. Suelos clasificados como AnC tienen una alta permeabilidad, capacidad de retención de agua y fertilidad moderada y son fuertemente ácidos lo que puede estar limitando el crecimiento de algunas

especies arbóreas. La clasificación actualizada de los suelos de Puerto Rico lo define como oxisol húmedo de desarrollo mínimo y sencillo de horizontes, lo cual está de acuerdo con lo que encontramos en este estudio (Beinroth *et al.* 2003). Es posible que el origen de este suelo sea fuera del carso y por eso es ácido. Este suelo fue transportado a los valles del

FIGURA 2. Variación con la profundidad en la concentración total de elementos químicos en una calicata excavada en un bosque de *Castilla elastica* en El Tallonal, Arecibo, Puerto Rico. La escala para los valores de concentración es logarítmica. Los puntos se ubican en el centro de cada uno de los cuatro horizontes observados en la calicata.

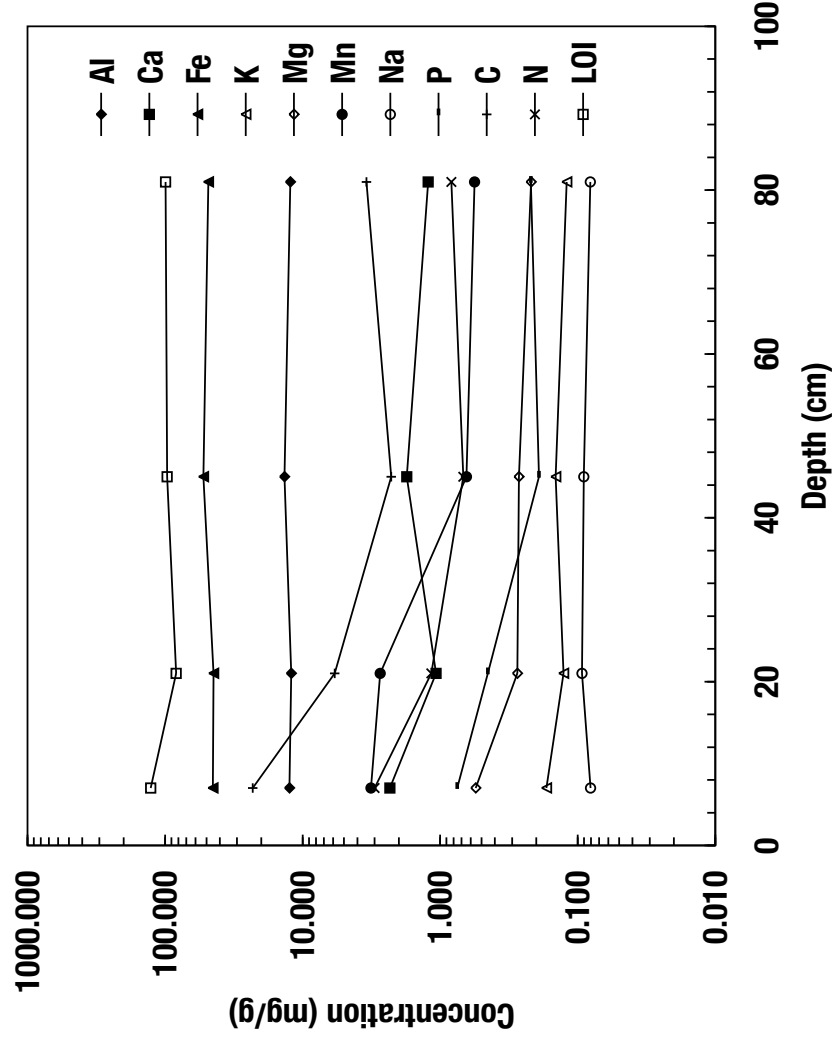


TABLA 2. Concentración (mg/g) de elementos disponibles de acuerdo a la extracción con el método de Olsen. El número en paréntesis, al multiplicarse por la concentración en la celda correspondiente, resulta en la concentración total (mg/g) del elemento en esa muestra. Los horizontes de la calicata están identificados en orden de profundidad como A, E, B y C (Tabla 1). La calicata se excavó en un bosque de *Castilla elastica* en El Tallonal, Arecibo, Puerto Rico.

Elemento	A	E	B	C
P	0.025 (30.1)	0.010 (45.0)	0.001 (192.0)	0.004 (54.75)
K	0.071 (2.38)	0.041 (3.098)	0.066 (2.197)	0.060 (2.017)
Ca	1.288 (1.801)	0.608 (1.762)	1.045 (1.677)	0.777 (1.577)
Mg	0.153 (3.614)	0.046 (5.957)	0.030 (8.9)	0.014 (15.643)
Mn	0.303 (10.531)	0.127 (21.512)	0.043 (15.0)	0.063 (8.937)
Fe	0.076 (590.6)	0.075 (592.6)	0.041 (1,284.4)	0.053 (914.64)
Na	0.167 (0.485)	0.114 (0.816)	0.081 (1.123)	0.068 (1.191)
Al	0.005 (2,492)	0.002 (6,053)	0.004 (3,392)	0.003 (4,133)

TABLA 3. Almacenaje de elementos químicos en una calicata ubicada en un bosque de *Castilla elastica* en El Tallonal, Arecibo, Puerto Rico. Los valores se reportan en Mg/ha y fueron redondeados. A, E, B y C corresponden a los cuatro horizontes de suelo encontrados entre la superficie y un metro de profundidad (Tabla 1). La pérdida de peso por ignición es LOI, por sus siglas en inglés.

Elemento	A	E	B	C	Total
N	3.9	2.5	2.7	4.8	13.9
P	1.0	1.0	0.8	1.3	4.0
K	0.2	0.3	0.6	0.7	1.8
Ca	3.0	2.3	7.0	7.1	19.4
Mg	0.7	0.6	1.1	1.3	3.6
Mn	4.2	5.9	2.6	3.3	15.9
Al	16.4	26.0	54.3	71.0	168.0
Fe	58.9	95.3	210.6	279.8	644.7
Na	0.1	0.2	0.4	0.5	1.1
C	30.2	12.5	9.1	20.0	71.7
LOI	167.0	178.4	386.0	572.6	1,303.8

TABLA 4. Almacenaje de nutrientes (Mg/ha) en varios bosques de Puerto Rico. Los datos de 0 a 30 cm en la segunda columna corresponden a un bosque de *Spathodea campanulata* con suelos aluviales (Abelleira Martínez y Lugo 2008) y los datos en esa columna para un metro de profundidad corresponden al promedio de ocho calicatas (error estándar en paréntesis) en la zona de *Dacryodes excelso* (tabonuco) del Bosque Experimental de Luquillo (Lugo 1992). Los datos de *Castilla elastica* son de este estudio.

Nutriente	<i>Spathodea/Dacryodes</i>	<i>Castilla</i>
	0 a 30 cm de profundidad	
N	4.1	6.4
P	1.2	2.0
K	1.4	0.5
Ca	17.6	5.3
Mg	13.8	1.3
Materia Orgánica	261	85
	0 a 100 cm de profundidad	
N	8.0 (0.7)	13.9
P	1.7 (0.2)	4.0
K	24.7 (1.8)	1.8
Ca	5.6 (1.7)	19.4
Mg	20.7 (8.1)	3.6
Materia Orgánica	134 (15.8)	143

carso por procesos aluviales según Monroe (1976). Monroe los designó *blanket sands* por su textura y cobertura extensa entre los mogotes.

Los datos de concentración total y almacenaje de elementos químicos (Tablas 2 y 3) reflejan suelos fértiles y favorables para el crecimiento arbóreo. Las cantidades de nutrientes como N y P en los primeros 30 cm de profundidad de la calicata son más altas y las de K, Ca, y Mg más bajas que las reportadas para suelos aluviales más cercanos a la costa en la misma región (Tabla 4). Sin embargo, la mayor parte de los elementos químicos están almacenados en los dos horizontes más profundos comparado con el almacenaje en el volumen de suelo con raíces. Si comparamos ocho calicatas de un metro de profundidad en bosques muy húmedos en el Bosque Experimental de Luquillo (Lugo 1992), la calicata en el bosque de *C. elastica* contiene más N, P y Ca, menos K y Mg y materia orgánica similar (Tabla 4).

El bosque de *C. elastica* está sujeto a lluvias y escorrentías fuertes con dos efectos sobre la estructura y química del suelo. Inundaciones periódicas y los horizontes identificados en la Fig. 1 reflejan un nivel freático alto de suerte que la distribución de raíces se limita a los primeros 50 cm del perfil. En ese volumen de suelo la concentración y cantidad de N y P son altos y superan lo observado en los suelos aluviales costeros conocidos por su alta productividad (Tabla 4). Además, la alta infiltración de agua lixivía elementos como el K, Na, Ca, Mg y otros que se acumulan en los horizontes más profundos de la calicata (Tabla 3). A pesar de la lixiviación y acumulación de elementos fuera del alcance de las raíces superficiales, los horizontes superficiales contienen altas concentraciones y cantidades de los nutrientes requeridos para sostener la alta productividad del bosque.

AGRADECIMIENTOS

Iván Vicens proveyó ayuda técnica durante la excavación de la calicata. Lucy Gaspar, Jessica Fonseca Da Silva y el personal de AlACiMa y del Servicio Forestal, organizaron y ayudaron en la

operación del campamento de verano del 2008 en el que se realizó este estudio. Jéssica Fonseca escogió y proveyó información acerca del lugar de estudio. Abel Vale proveyó información sobre la historia de uso del lugar y nos permitió realizar este trabajo en su propiedad, la Reserva Natural El Tallonal. Este estudio se hizo en colaboración con la Universidad de Puerto Rico. Mildred Alayón editó el manuscrito y los siguientes colegas revisaron y mejoraron el artículo: Ernesto Medina, Elvira Cuevas, Mary Jean Sánchez, y Edwin López.

LITERATURA CITADA

- Abelleira Martínez, O. y A.E. Lugo. 2008. Post sugar cane succession in moist alluvial sites in Puerto Rico. Páginas 73-92 en R. W. Myster, editor. Post-agricultural succession in the Neotropics. Springer, New York.
- Acevedo, G. 1982. Soil survey of Arecibo area of northern Puerto Rico. USDA Soil Conservation Service and UPR, Mayagüez.
- Anderson, J.M. y J.S.I. Ingram. 1993. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods, second edition. C.A.B. International, Wallingford.
- Báez Jiménez, J.A., A. Otero Colón, y N.A. Trejo Ricaño. SF. Plan de manejo de recursos múltiples y custodia de bosques privados para la Reserva Natural Mata de Plátano – El Tallonal, propiedad de Abel Vale Nieves y Evelyn Moreno Ortiz. Envirosurvey, Inc.
- Beinroth, F.H., R.J. Engel, J.L. Lugo, C.L. Santiago, S. Ríos, y G.R. Brannon. 2003. Updated taxonomic classification of the soils of Puerto Rico. College of Agricultural Sciences and Agricultural Experiment Station, UPR, Mayagüez.
- Brady N.C. y R.R. Weil. 2002. The nature and properties of soils, 13th ed. Pearson Education, New Jersey.
- Hobbs, R.J., S. Arico, J. Aronson, J.S. Baron, P. Bridgewater, V.A. Cramer, P.R. Epstein, J.J. Ewel, C.A. Klink, A.E. Lugo, D. Norton, D. Ojima, D.M. Richardson, E.W. Sanderson, F. Valladares, M. Viliá, R. Zamora, y M. Zobel. 2006. Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order. Global Ecology and Biogeography 15:1-7.
- Leco Corporation. 2005. Carbon and nitrogen in soil and sediment. Organic Application Note TruSpec CN, Form No. 203-821-275, St. Joseph, MI.
- Leco Corporation. 2009. Modification of method Moisture and Ash Determination in Flour. Organic Application Note TGA701, Form No. 203-821-359, St. Joseph, MI.

- Lugo, A.E. 1992. Comparison of tropical tree plantations with secondary forests of similar age. *Ecological Monographs* 62:1-41.
- Lugo, A.E. 2009. The emerging era of novel tropical forests. *Biotropica* 41:589-591.
- Luh-Huang, C.Y. y E.E. Schulte. 1985. Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 16:943-958.
- McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. Páginas 199-209 *en* *Methods of Soil Analysis, Part 2*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Monroe, W.M. 1976. The karst landforms of Puerto Rico. U.S. Geological Survey Professional Paper, U.S. Government Printing Office, Washington, DC. 93 p + mapa.
- Munsell. 1994. Munsell Soil Color charts. Kollmogren Instruments Corp., New York.