

Estudio de la variabilidad espacial de la resistencia de penetración en un vertisol pélico de la cuenca del río Cauto

Study of the spatial variability of penetration resistance in a pelico vertisol of the Cauto river basin

Ramón Candelario Núñez Tablada^{1*}, Vilma Anastasia López Cruz², Adolfo Alvarez Rodríguez³

¹Universidad de Holguín / Cuba / Holguín; rcnunez1958@gmail.com <https://orcid.org/00090001-2496-4627>

²Universidad de Holguín / Cuba / Holguín; <https://orcid.org/0009-0004-3126-4305>

³Universidad de Holguín / Cuba / Holguín; adolfoalvarezrod@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-5989-2931>

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.10>

Resumen

La investigación se realizó en la cuenca del río Cauto provincia Holguín, durante el periodo de marzo/agosto del 2024 en un *Vertisol pélico* con el objetivo de determinar la variabilidad espacial de la Resistencia de penetración del suelo en tres áreas, una sembrada de *Sacharum officinarum* (Caña de azúcar), otra dedicada al pastoreo intensivo y la tercera sembrada de *Musa paradisiaca* (plátano). Se seleccionó una hectárea por área, utilizando el Diseño de Muestreo Aleatorio Sistemático o en rejilla de celdas cuadradas de 20 m² con 16 puntos de muestreo por hectárea en el punto medio de cada celda, las muestras se extrajeron cada 10 cm hasta los 50 cm de profundidad, en cada punto se tomaron cinco muestras de suelo 90 por hectárea y 180 total; utilizándose la barrena de Simpsons¹⁰. Para determinar la Resistencia de penetración del suelo se utilizó el penetrómetro de impacto¹². Según la cantidad de impactos por profundidad se clasificó el grado de compactación. Entre los resultados alcanzados se resaltan que tanto en el área de caña de azúcar como del cultivo del plátano existió una alta variabilidad en cuanto a la Resistencia de penetración del suelo.

Palabra clave: caña de azúcar, resistencia de penetración, compactación, penetrómetro de impacto.

Abstrac

The research was conducted in the Cauto river basin, Holguín province, from March to August 2024, in a Pélico Vertisol. The objective was to determine the spatial variability of soil penetration resistance in three areas: one planted with *Saccharum officinarum* (sugarcane), another dedicated to intensive

grazing, and the third planted with *Musa paradisiaca* (banana). One hectare was selected per area, using a Systematic Random Sampling Design (SRS) or a grid of 20 m² square cells with 16 sampling points per hectare at the midpoint of each cell. Samples were extracted every 10 cm to a depth of 50 cm. At each point, five soil samples were taken (90 per hectare and 180 total). A Simpson auger was used.¹⁰ Soil penetration resistance was determined using an impact penetrometer.¹² The degree of compaction was classified according to the number of impacts per depth. Among the results obtained, it is noteworthy that both the sugarcane and banana plantations exhibited high variability in soil penetration resistance.

Keywords: Sugarcane, penetration resistance, compaction, impact penetrometer.

Introducción

La resistencia de penetración del suelo es uno de los problemas que más afectan las áreas dedicadas a la agricultura en Cuba y este fenómeno se ha hecho extensivo a todas las provincias de territorio nacional en menor o mayor grado, su campo no ha sido totalmente explorado y existen grandes tendencias a continuar sus estudios en cada una de las localidades afectadas debido a su variable comportamiento. Los Vertisoles de la cuenca del río Cauto pertenecientes a la provincia de Holguín, han sido explotados por más de 40 años por el monocultivo de la caña de azúcar, lo que ha influido en gran medida a su degradación, debido a la aplicación de diferentes tecnologías empleadas de forma irracional, como tecnologías de preparación de suelo, donde la maquinaria ha jugado un papel fundamental en los procesos de compactación, lo que ha provocado que más del 84 % de los suelos dedicados a la agricultura presenten algún tipo de compactación, afectando los rendimientos de los cultivos en las áreas productivas de la provincia. Teniendo en cuenta los problemas presentados en los suelos de la provincia la investigación tiene como objetivo el estudio de tres áreas agrícolas en la cuenca de río Cauto para determinar la variabilidad de la Resistencia de penetración a diferentes profundidades.

Materiales and Métodos

La investigación se realizó en la cuenca del río Cauto provincia Holguín, durante el periodo de marzo/agosto del 2024 en un *Vertisol pélico*. Para el desarrollo de las investigaciones se seleccionaron tres áreas, de manera que su ubicación geográfica fuera representativa. Cada área cuenta con la extensión de una hectárea, las mismas presentan características similares, estas fueron explotadas por el monocultivo de la caña de azúcar por más de cuatro décadas.

Área 1. Cultivada por el monocultivo de caña de azúcar, las cosechas en los últimos 10 años fueron mecanizada, realizándole las labores culturales establecidas después de cada cosecha.

Área 2. Se encontraba en barbecho (reposo) por más de cinco años, en los momentos actuales se dedica al pastoreo intensivo.

Área 3. Sembrada de caña de azúcar, dejándose en barbecho (reposo) y actualmente sembrada de *Musa paradisiaca* (plátano vianda).

Esta área estuvo explotada por el cultivo de la caña de azúcar por más de cuatro décadas, demoliéndose en el año 2022 al realizarle la última cosecha, se mantuvo en barbecho hasta enero del 2024, año en que se preparó el suelo de forma convencional para la siembra del cultivo plátano vianda.

Diseño de la red de muestreo

La red de muestreo usada en la investigación, se presenta en la figura 1, corresponde al diseño de Muestreo Aleatorio Sistemático o en rejilla de celdas cuadradas (puntos de muestreo en el centro de las celdas) ¹².

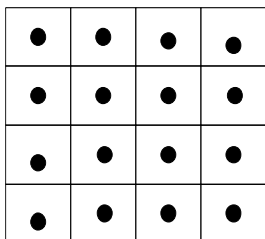


Figura 1.- Diseño de la red de muestreo.

Toma de muestra

Se formaron 16 cuadrículas de 20 m² por hectárea, para las mediciones se utilizó una cinta métrica de 50 metros de largo, seleccionándose un punto por cada cuadrícula (16 puntos). En cada punto se tomaron cinco muestras de suelos a intervalos de 10 cm hasta la profundidad de 50 cm, para 90 muestras por hectárea y un total de 180 muestras; las mismas se extrajeron utilizando la barrena de ¹¹.

Medición de la resistencia del suelo a la penetración

La variable experimental que se utilizó para evaluar la compactación fue la resistencia a la penetración (RP). La misma se determinó con el penetrómetro de impacto, formado por una asta graduada en centímetro, un cono en la punta de la asta, y un peso de recorrido constante (1 Kg) para provocar su penetración, con principio de medición de profundidad por impacto.

Metodología del penetrómetro de impacto

Para determinar los niveles de compactación del suelo en las diferentes profundidades, se consideró que la resistencia se obtenía en kilogramos fuerza /cm² = (kgf/cm²).

La metodología para la conversión de los (kgf/cm²) en Mega Pascal (MPa), unidad internacional reconocida para determinar la RP del suelo, y, clasificar los niveles de compactación de las áreas objeto de estudio a las diferentes profundidades establecidas. Para efectuar esta conversión fue necesario utilizar la siguiente expresión matemática: ¹⁵

$$R = \frac{(M + m) \cdot g}{A} + \frac{f \cdot M \cdot g \cdot h}{10 \cdot A} \cdot N$$

Donde:

M: Masa de impacto= 2 Kg

m: Masa del cuerpo del Penetrometro= 2,5 Kg

g: Aceleración de la gravedad= 1cm²/segundos

f: Frecuencia de energía para promover el Penetrómetro

h: Altura de recorrido = 48 cm

N: Número de golpe de la masa de impacto

A: Área de base del Penetrometro de punta fina =1.01 cm²

Esta ecuación puede ser resumida en:

$$R \text{ (kgf/cm}^2\text{)} = 5,6 + 6,89 \cdot N$$

Y finalmente, para transformar kgf.cm⁻² en Mega Pascal (MPa)

Basta utilizar a ecuación siguiente

$$R \text{ (MPa)} = 0,0980665 \times \text{kgf/cm}^2$$

Tabla 1: Metodología de clases de la RP del suelo. (USDA¹⁵)

Clases.	Resistencia de penetración (MPa).
Extremadamente pequeña	< 0,01
Pequeña	< 0,1
Muy baja	0,01 – 0,1
Baja	0,1-1
Intermedia	0,1 - 0,2
Moderada	1 - 2

Grande	> 2
Alta	2 - 4
Muy alta	4 - 8
Extremadamente alta	> 0 = 8

Resultados

Variabilidad espacial

1-. Área de caña de azúcar

En los mapas de la **Figura 2** se representa la distribución espacial de la RP en las distintas profundidades muestreadas. Teniendo en cuenta los resultados se observa la heterogeneidad que existe entre los diferentes niveles de compactación en cada una de las profundidades estudiadas, apreciándose en la profundidad de 0 cm -10 cm que existe una alta distribución espacial de las zonas con mayor compactación, esto puede estar influenciado por el efecto de la mecanización, es decir cosecha, las pasadas de los implementos, peso y patinaje de la maquinaria para realizar las diferentes labores de cultivo; estos resultados se corroboran con los obtenidos por Taylor y Gill¹³,

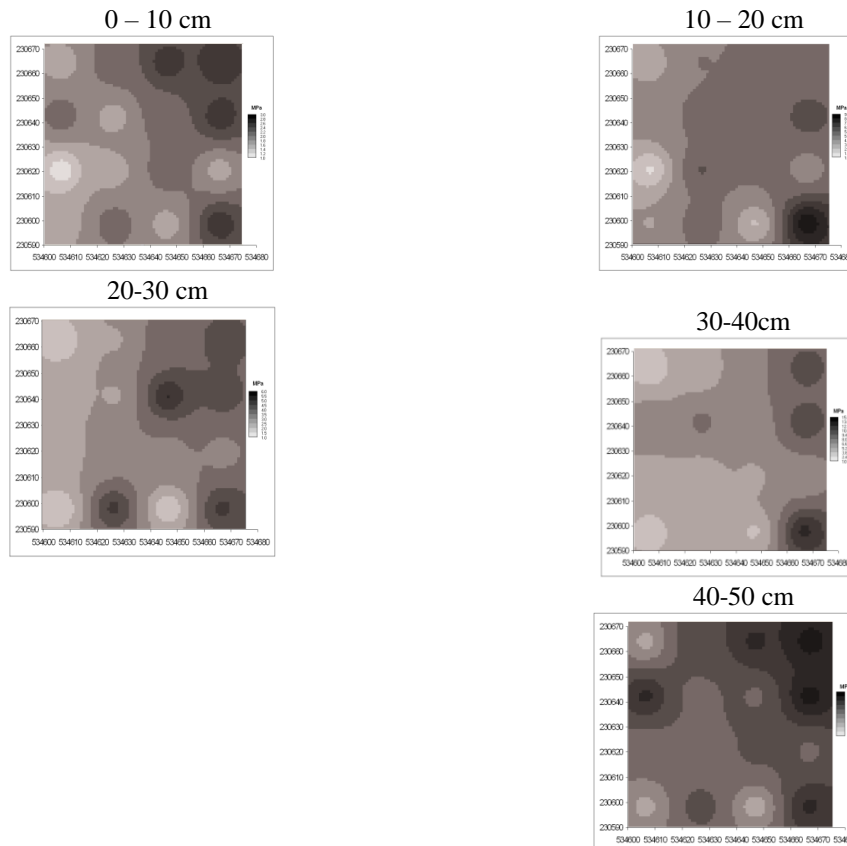


Figura 2.-

Mapas de variabilidad de Rp en el área de caña de azúcar

donde plantean que la principal fuente de compactación es el tráfico vehicular, el cual puede causar, de acuerdo con Jorajuría⁶, disminución del espacio poroso, menor capacidad para retener agua y una mayor impedancia para el desarrollo radicular. Smith y Dickson¹¹, indicaron que la compactación de las capas superficiales está influenciada principalmente por la presión superficial en la zona de contacto rueda-suelo, mientras que la compactación subsuperficial está directamente influenciada por el peso.

Al respecto, Hakansson et al.⁴, determinaron que cargas mayores de 60 KN por eje, u 80 a 100 KN para ejes en tandem, provocarían compactación a profundidades superiores a los 400mm. Sin embargo, la compactación subsuperficial depende no solo del peso del vehículo sino también del número de pases que se efectúe, Jorajuría y Draghi⁷. Gameda et al.³, indicaron que la compactación en los horizontes superficiales de suelos agrícolas estuvo más fuertemente emparentada con el número de pases que con la presión de contacto ejercida.

En las profundidades de 10cm hasta 40cm aparecen mayores zonas espaciadas con diferentes niveles de compactación, aunque no dejan de ser representadas zonas con altos niveles, lo que queda demostrado por las diferentes intensidades de los colores que la representan. A partir de esta profundidad y hasta los 50cm se aprecia un incremento de las zonas de mayor compactación; este resultado puede estar vinculado con lo planteado por Hernández⁵ cuando expresa que los suelos Vertisoles pueden sufrir altos niveles de compactación en las capas superficiales que están influenciadas por factores externos y las capas inferiores pueden sufrir niveles de compactación de forma natural debido a su formación y a los altos niveles de arcillas que poseen. En la representación de la RP en cada gráfica teniendo en cuenta la leyenda se observa que los rangos en que se mueve la resistencia de compactación bajo caña de azúcar oscilan de medianamente resistente a fuertemente resistente (1–10 Mpa), lo que evidencia que las labores de cultivo después del corte mecanizado no fueron adecuadas para realizar una descompactación uniforme.

2.- Área en barbecho

En la **Figura 3** se representa la distribución espacial de la RP en las distintas camadas muestreadas en el suelo en barbecho.

En los mapas se observa la variabilidad que existe en la interpolación espacial de la RP en esta área, predominando los colores menos intensos en los primeros 10cm, intensificándose hasta los 20cm, sin embargo, se nota que comienzan aclararse los colores nuevamente a partir de esta profundidad hasta los 40cm, intensificándose nuevamente hasta los 50 cm.

Si se analizan detenidamente las áreas que reflejan los mayores valores de compactación mantienen una inestabilidad, pasando de colores menos intensos a más intensos y viceversa, no siendo así para las áreas de los colores menos intensos que reflejan una menor compactación donde se van intensificando hasta pasar a colores que representan valores de extrema compactación.

Analizando los registros del área, estos reflejan también el hecho de que ha sido utilizada para el pastoreo libre intensivo de ganado vacuno tres años después de su demolición, Oquendo⁹ en estudios realizados sobre el fomento y explotación de los pastos manifiesta que las áreas dedicadas a esta actividad deben

ser divididas en cuartones, para no provocar un exceso de carga animal y afectar el desarrollo de los pastos, si se maneja esto se puede deducir que, aunque estas áreas no hayan sido explotadas por la mecanización después de demolidas, al ser destinadas a un pastoreo libre intensivo, sin conocer la carga a que está sometida, puede provocar un alto grado de compactación, justificando que la disminución de la misma a partir de los 25cm está dado a que el peso de los animales no provoca una fuerte compactación a esa profundidad, y si puede estar asociado a la compactación que estos suelos están propensos de forma natural; además la variabilidad puede estar dada, también, por una vegetación que surgió de modo espontáneo y se encuentra distribuida heterogéneamente, provocando que los animales se concentren en las áreas de mejores condiciones para pastar, así como al paso de otros animales y equipos que atraviesan el áreas para su traslado de lugar, todos estos fenómenos pueden haber influido en los altos niveles de variabilidad espacial de la RP.

Al corroborar los resultados alcanzados en las investigaciones con otros autores estudiosos de la temática como Lima⁸, cuando explica que los determinados grados de compactación que presentan los suelos en sus diferentes niveles es debido a que han estado sometidos a determinadas presiones externas, que pueden ser causadas por el paso de las máquinas agrícolas, equipos de transporte o paso de los animales. Otros autores como Bertoni et al.¹, en investigaciones realizadas sobre esta temática manifiestan que los pastos son buenas coberturas para los suelos, sin embargo un incorrecto manejo de los mismos como: poca o ninguna fertilización, un pastoreo excesivo, provocan un aumento en la densidad del suelo y una reducción de la macroporosidad debido a una pérdida de la capacidad de generación del pasto natural escaseando la cobertura del suelo, culminando en una compactación del suelo por el pisoteo de los animales.

Con los resultados de estas investigaciones queda demostrado el efecto del pastoreo intensivo y el uso de los diferentes implementos agrícolas sobre los diferentes niveles de compactación en el suelo.

Por el indiscriminado pastoreo intensivo a que está sometida el área, esto conlleva a que existan diferentes niveles de compactación y una distribución heterogénea en la misma capa muestreada, así como en diferentes profundidades, influyendo de forma directa en el desarrollo de los pastos y a su vez en las diferentes propiedades del suelo, conduciendo en un futuro, que puede ser de mediano a largo plazo, a un deterioro de este agroecosistema no sólo en el desarrollo de pastizales para la alimentación animal, sino, en el establecimiento y desarrollo de cultivos que se precisen establecer para la producción de alimentos, por lo que urge la elaboración de estrategias tecnológicas de forma inmediata para el manejo y conservación de los mismos.

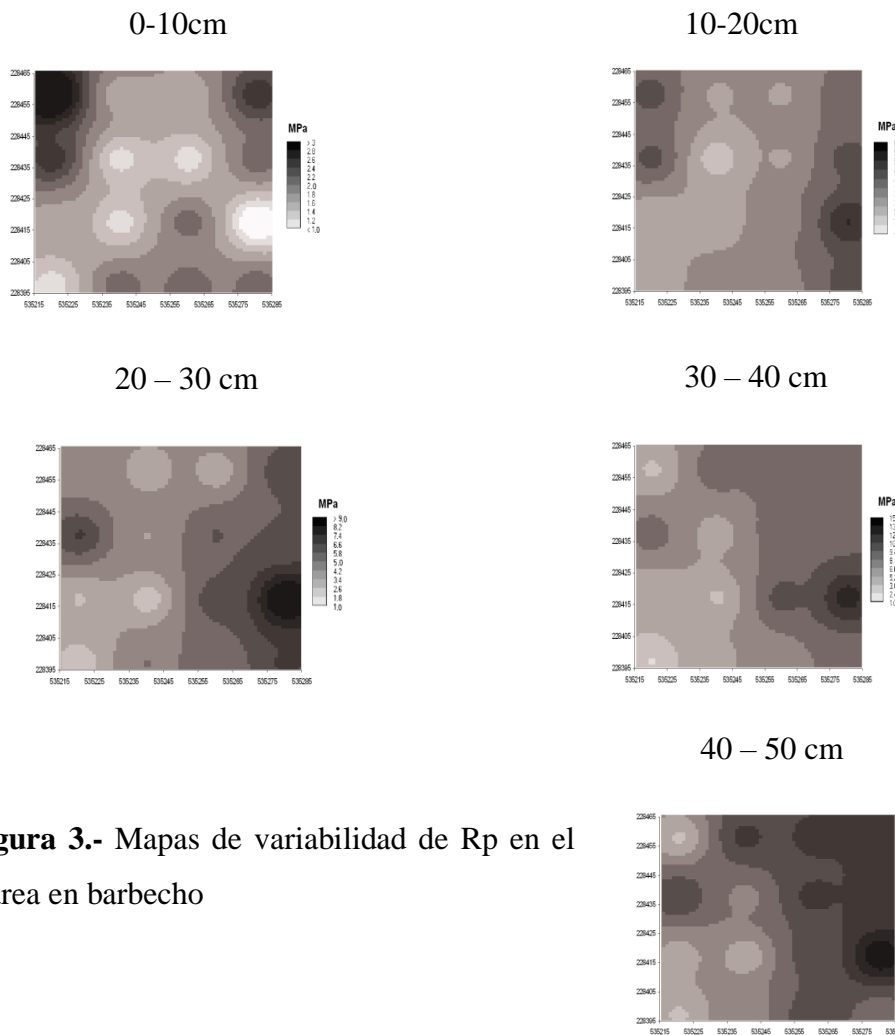


Figura 3.- Mapas de variabilidad de Rp en el área en barbecho

3-. Área de reconversión

En los mapas siguientes (figura 4) se representa la distribución espacial de la RP en las distintas capas muestreadas en el suelo para las parcelas que representan etapa de reconversión. En primer lugar se observa la alta heterogeneidad que existe en las diferentes capas muestreadas en cuanto a los niveles de RP, sin embargo la mayor variabilidad espacial se encuentra entre 0-10cm, ya que la distribución de los colores demuestra que a partir de los 10cm se forman capas más homogéneas hasta los 40cm de profundidad, a partir de donde se incrementa nuevamente la variabilidad espacial, aunque la escala de colores representa que en todas las capas los valores de la RP son altos (2-9 Mpa).

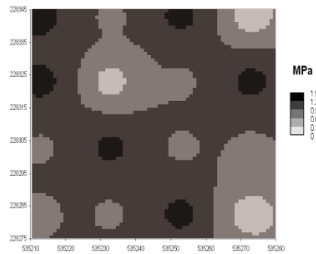
Según Hernández⁵, hay que tener en cuenta que los Vertisoles presentan altos niveles de arcillas (más de un 40%), y que esto permite que se compacten fácilmente, tanto influenciado por fuerzas externas como de forma natural, en las sucesivas fases de humectación-desección.

Las representaciones de los mapas, demuestran a simple vista que no ha existido una adecuada preparación del suelo para la siembra del plátano, ya que para el establecimiento de cualquier cultivo los suelos deben ser descompactados de forma uniforme tanto en el largo y el ancho del área como en las distintas profundidades en las que se realicen las labores, permitiendo que exista una adecuada aireación y percolación del agua para que los elementos nutritivos puedan ser absorbidos por las plantas ⁶.

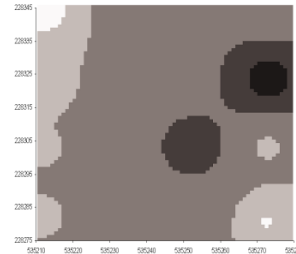
Thomasson¹², y Erickson², manifiestan que uno de los elementos fundamentales para el desarrollo de los cultivos es la macro y microporosidad que están directamente relacionadas con la difusión de oxígeno en el suelo para las raíces, y que éstas determinan la capacidad de aireación del suelo, por tales motivos la preparación de un suelo debe estar dirigida a realizar una adecuada descompactación.

En trabajos realizados por los mismos autores demostraron que valores de porosidad de aireación por debajo del 10-15% son, generalmente considerados como restrictivos para el crecimiento de las plantas y la productividad en la mayoría de los cultivos.

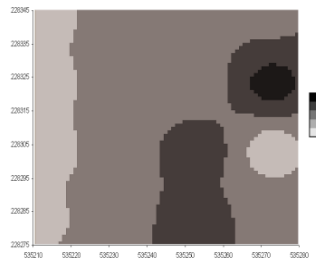
0 – 10 cm



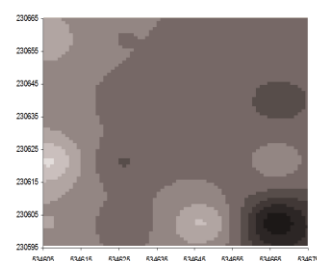
10 – 20 cm



20-30 cm



30-40cm



40-50 cm

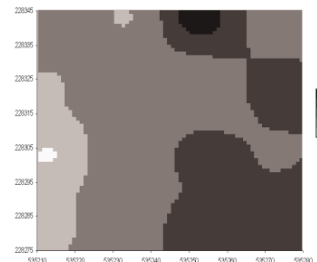


Figura 4.- Mapas de variabilidad de Rp en el área en reconversión

Conclusiones

Existió una alta variabilidad de la compactación en todas las áreas donde se desarrollaron las investigaciones.

En las áreas dedicadas a los cultivos no se cumplió con la disciplina tecnológica, debido a que la preparación del suelo no cumplía con las exigencias de los cultivos.

Referencias

1. BERTONI J, LOMBARDI N. Conservação do solo. São Paulo: Ícone; 1990. 355p.
2. ERICKSON A E. Tillage effects on soil aeration. In: VAN DOREN, D.M. et al. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. Madison: ASA ;1982. 91-104 p.
3. GAMEDA S, RAGHAVAN G S, MC KYES E .et al. Subsoil compaction in a clay soil. I. Cumulative effects. Soil and Tillage Research, Amsterdam. v.10;1987.113-122 p.
4. HAKANSSON I, VOORHEES W R, RILEY H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. Soil and Tillage Research, Amsterdam. v.11; 1988.239-282 p.
5. HERNÁNDEZ A, PÉREZ J M, BOSCH D. et al. Nueva Versión de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. Inst. Suelos, AGRINFOR, Ciudad Habana; 1999. 64p.
6. JORAJURÍA D. El tráfico vehicular, la compactación y la sostenibilidad de la producción de madera. In: Actas del Primer Seminario de Actualización en Sistemas de Cosecha y Transporte Forestal, Eldorado; 1996.45-50p.
7. JORAJURÍA D, DRAGHI L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. Journal of Agricultural Engineering Research , London.v. 66; 1997. p.261-265.
8. LIMA C L R. (2004). Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. [Tese Doutorado em Agronomia]. Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP;2004.70p.
9. OQUENDO G L. Fomento y explotación de pastos y forrajes: ACPA.Proyecto (DWHH: LA1077/ZAK 1001-01); 2002.
10. SIMPSON 1980. Metodo para la extraccion de muestras de suelos; 1980
11. SMITH D, DICKSON J. Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. Journal of Agricultural Engineering Research, London. 1990; 46 (1) :13-29.

12. STOLF R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 15:229-235. Brasil; 1991.
13. TAYLOR J, GILL W (1984). Soil compaction: State-of-art report. Journal of Terramechanics, Oxford. 1984; 21 (3). 195-213.
14. THOMASSON A.J (1978). Towards an objective classification of soil structure. J. Soil Sci., Oxford. v. 29; 1978. 38-46p.
15. USDA. Soil survey manual. Washington, DC, USA, Soil Survey Division Staff. 437p. (Handbook, 18); 1993.

Recibido: [18 diciembre 2025] Aceptado: [24 enero 2026] Publicado: [15 marzo 2026]

Citation: Núñez, R; López, V; Álvarez, A. Estudio de la variabilidad espacial de la resistencia de penetración en un vertisol pélico de la cuenca del río Cauto. Bionatura, 2026. Volumen 11, No 1.

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.01.10>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

[\(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)