

04

Fecha de presentación: enero, 2020

Fecha de aceptación: febrero, 2020

Fecha de publicación: abril, 2020

IMPACTOS CRÍTICOS DEL PENETRÓMETRO COMO CRITERIO PARA ESTIMAR LA COMPACTACIÓN DEL SUELO Y DECIDIR LABORES EN CAÑA DE AZÚCAR

CRITICAL IMPACTS OF THE PENETROMETER AS CRITERIA TO ESTIMATE THE COMPACTION OF THE SOIL AND DECIDE LABORS IN THE SUGAR CANE

Inoel García Ruiz¹

E-mail: inoel.garcia@inicavc.azcuba.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7149-7750>

Manuel L. Vidal Díaz¹

E-mail: manuel.vidal@inica.azcuba.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1248-5135>

¹ Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar Centro Villa Clara. Ranchuelo. Villa Clara. Cuba.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

García Ruiz, I., Castillo Ontaneda, A. L., & Vidal Díaz, M. L. (2020). Impactos críticos del penetrómetro como criterio para estimar la compactación del suelo y decidir labores en caña de azúcar. *Revista Científica Agroecosistemas*, 8(1), 29-38.

RESUMEN

La compactación del suelo es una limitante de la producción de caña de azúcar en Cuba y su origen se vincula al tráfico de la maquinaria y al contenido de humedad del suelo durante la cosecha mecanizada. El objetivo del trabajo fue diseñar una metodología para diagnosticar la compactación en áreas de cosecha mecanizada, basado en impactos críticos del penetrómetro en los suelos Pardo Mullido Carbonatado, Gley Vértico y Ferralítico Rojo. Se evaluaron los tres suelos en condiciones perturbadas por el tráfico de los equipos de cosecha mecanizada en humedad variable y también, en ambientes no perturbados por la actividad humana o el pisoteo de animales y con 5 años o más con cubierta vegetal permanente. La resistencia a la penetración se midió con un penetrómetro de impacto que, para el límite crítico de 3 MPa y humedad en capacidad de campo, tiene como constante de penetración 0.029 m impacto⁻¹ del mazo y 7.0 y 3.5 impactos en los perfiles 0-20 y 20-30 cm de profundidad, respectivamente. El efecto del tráfico sobre la resistencia a la penetración en humedad variable, permitió determinar los rangos de humedad por suelo donde el tráfico disminuyó o aumentó la resistencia y asumir dichos rangos como categorías de humedad baja, media y alta. En los suelos no perturbados se estudió la variación de la resistencia en función de la humedad, se obtuvieron ecuaciones exponenciales patrones para estimar impactos (y) vs humedad (x), que permitieron calcular los Δ impactos (ΔI) atribuible al efecto de la humedad sobre la resistencia del suelo. Si las constantes de impactos para 0-20 cm (7.0) y 20-30 cm (3.5) y los ΔI promedio de las categorías de humedad baja, media y alta, se suman se obtienen valores de impactos críticos según suelo y contenido de humedad.

Palabras clave:

Compactación, humedad, penetrómetro, resistencia, tráfico, suelo.

ABSTRACT

Soil compaction is a limitation of sugarcane production in Cuba and its origin is linked to machinery traffic during mechanized harvesting and soil moisture content. The objective of the research was to design a methodology to diagnose compaction in areas of mechanized harvest, based on critical impacts of the penetrometer on the soils of Pardo Mullido carbonatado, Gley Vértico and Ferralitic Red. The three soils were evaluated in disturbed conditions by the traffic of mechanized harvesting equipment in variable humidity and also, in environments not disturbed by human activity or animal trampling and with 5 years or more with permanent vegetation cover. The penetration resistance was measured with an impact penetrometer which, for the critical limit of 3 MPa and humidity in field capacity, has as penetration constant 0.029 m impact⁻¹ of the hammer and 7.0 and 3.5 impacts on the profiles 0-20 and 20-30 cm deep, respectively. The effect of the traffic on the resistance to penetration in variable humidity, allowed to determine the ranges of humidity by soil where the traffic decreased or increased the resistance and assume these ranges as low, medium and high humidity categories. In the undisturbed soils, the variation of the resistance as a function of humidity was studied, standard exponential equations were obtained to estimate impacts (y) vs humidity (x), which allowed to calculate the Δ impacts (ΔI) attributable to the effect of moisture over soil resistance. If the impact constants for 0-20 cm (7.0) and 20-30 cm (3.5) and the average ΔI of the low, medium and high humidity categories are added, critical impact values are obtained according to soil and humidity content.

Keyword:

Compaction, humidity, penetrometer, resistance, traffic, soil.

INTRODUCCIÓN

La disposición de partículas del suelo en estado natural forma una armazón o estructura, con espacios porosos interconectados entre sí que, junto a las galerías producidas por organismos vivos o por la descomposición de raíces y otros restos de origen vegetal, garantizan el necesario intercambio gaseoso y movimiento del agua, logrando así el adecuado balance suelo-agua-aire para el buen desarrollo de las plantas. Sánchez (1996), especifica que un suelo está compacto cuando el equilibrio estructural y la estabilidad de poros se rompen, trayendo consigo poca aireación e insuficiente contenido de humedad para el crecimiento de las plantas. El autor añade que, el sistema poroso del suelo influye directamente sobre el balance de agua, en la difusión de gases y en el desarrollo y crecimiento de las raíces y puntualiza que, la porosidad es tal vez la propiedad más fácil, frecuente y ampliamente alterada por la labranza y manejo del suelo.

El tráfico de la maquinaria agrícola se considera la causa principal del deterioro físico de los suelos, existiendo un rango entre el límite inferior de plasticidad y la capacidad de campo donde el suelo es más compactable. Matías (2010), plantea que la consistencia del suelo transita por los estados sólido, semisólido y plástico según aumenta la humedad, lo que hace variar su susceptibilidad a la compactación por el tráfico.

La resistencia a la penetración, según Nacci & Pla Sentis (1992), es un buen parámetro para conocer la dinámica del estado físico del suelo. Los autores agregan que el penetrómetro de impacto es un equipo barato y tan efectivo como el más caro y sofisticado de los instrumentos. Estudios comparativos demuestran que el penetrómetro de impacto es tan eficiente como el digital en la caracterización de la compactación, porque los valores de resistencia obtenidos correlacionan mejor con la densidad aparente que los alcanzados con el digital (Roboredo, et al., 2010), lo que demuestra mayor eficiencia para estimar las condiciones de compactación del suelo. Además, otros elementos como la sencillez constructiva del penetrómetro de impacto, fácil manipulación, rusticidad que asegura lecturas de resistencia en cualquier grado de compactación y contenido de humedad del suelo, mínimo de roturas, así como su bajo costo, lo convierten en el instrumento ideal para el diagnóstico de la compactación.

La resistencia del suelo se asocia inversamente al contenido de humedad (Monroy, Álvarez & Alvarado, 2017), lo que puede conducir a sub o sobreestimaciones de sus valores. Por esa razón, la capacidad de campo se acepta universalmente como la humedad

estándar para evaluar las propiedades físicas de los suelos, aunque Elisei (2017), plantea que también puede evaluarse en humedad arbitraria si se dispone de un procedimiento adecuado para su corrección. En este sentido, Paredes, et al. (2009) señalaron que la corrección de la resistencia a la penetración puede hacerse a través de modelos matemáticos simples.

La humedad del suelo puede determinarse mediante muestras de suelo, sondas neutrónicas y hasta por imágenes satelitales, pero todas esas técnicas requieren de recursos humanos y materiales especializados que restringe su utilización a centros de investigación y sectores productivos que disponen de regadío. Sin embargo, el productor cañero y los agricultores en general, manejan cotidianamente y de forma empírica todas labores culturales manuales o mecanizadas como la aradura y mullido del suelo, plantación, cultivo de desyerbe y descompactación, aplicación de herbicidas, cosecha y otras, en base a su experiencia y percepción visual acerca del grado de humedecimiento y saben, con bastante exactitud, cuándo el contenido de humedad del suelo les permite hacer una u otra labor. En este sentido, la estimación de humedad por el tacto y apariencia del suelo es un método práctico, sencillo y económico que permite, a personas adiestradas, hacer estimaciones con sólo 5% de error que puede ayudar al productor a conocer, con bastante exactitud, si el contenido de humedad del suelo es bajo, medio o alto, a partir del amasamiento de una porción de suelo y observar su color y forma.

Tomando en cuenta lo anterior se trazó como objetivo de este trabajo la creación de una metodología para diagnosticar la compactación a través de impactos críticos del penetrómetro por tipo de suelo y contenido de humedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación abarcó los principales suelos dedicados al cultivo de la caña de azúcar en Cuba: Pardo Mullido Carbonatado (PMC), Gleysol Vértico (GV) y Ferralítico Rojo (FR) (Hernández, et al., 2015). Se realizaron análisis en laboratorio de muestras de suelo hasta 30 cm de profundidad, para determinar la composición mecánica por el método de Kachinskii, densidad aparente por el método del cilindro y capacidad de campo por la técnica de saturación de suelo y determinación de humedad base suelo seco; así como materia orgánica por Walkley-Black (Cuba. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, 2015), cuyos resultados (Tabla 1), indican predominio de arcillas en los suelos GV y PMC mientras la arena lo hace en el FR, con texturas arcillosa y arcillo arenosa, respectivamente.

Tabla 1. Propiedades hidrofísicas de los suelos.

Suelos*	Composición mecánica (%)			Textura	MO (%)	Da (g cm ⁻³)	CC (%bss)
	Arcilla	Limo	Arena				
PMC	57.2	14.6	28.2	Arcillosa	2.6	1.15	48
GV	73.2	20.5	6.3	Arcillosa	2.9	1.05	54
FC	37.0	16.9	46.1	Arcillo arenosa	2.4	1.33	30

*: PMC: Pardo Mullido carbonatado, GV: Gley Vértico, FR: Ferralítico Rojo MO: Materia orgánica
Da: Densidad aparente CC: Capacidad de campo

Calibración del PDI

La resistencia a la penetración (R_p) se evaluó con un penetrómetro de impacto (PDI, Figura 1) de peso total (pt): 6.4 kg, peso del mazo (m): 4 kg, caída libre del mazo (h): 0.40 m, área de la base del cono (a): 0.000113 m² y punta de cono de 30°. El principio de funcionamiento del PDI se basa en el golpe de una maza de peso invariable, cuya caída libre desde altura constante genera una fuerza igual por impacto que hace penetrar un cono de área conocida. Se supone entonces que, la mayor o menor tasa de penetración por golpe del mazo dependerá sólo de la R_p del suelo.

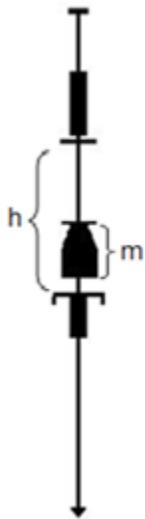


Figura 1. Penetrómetro de impacto.

El PDI se calibró en términos de impactos porque es una unidad de medida más entendible por el productor y se realizó basado en la fórmula de los holandeses (1) que es, entre las fórmulas más usadas en ingeniería civil para transformar impactos en unidades de presión, la que mejor se ajusta a los requerimientos de las mediciones de R_p en la agricultura (Stolf, 1991). Además, (1) incluye el factor e que, al depender del estado físico del suelo, permite determinar la constante de penetración por impacto del mazo para una R_p elegida, bajo el supuesto de humedad (HA) equivalente a la capacidad de campo (CC), en coincidencia con Letey (1985), quien, al describir cualitativamente el concepto de intervalo de agua óptimo,

adoptó la CC como límite crítico máximo del potencial mátrico para el crecimiento de las plantas.

$$\text{donde: } R_p = \frac{m^2 \cdot g \cdot h}{pt \cdot a \cdot e} \quad (1)$$

R_p = Resistencia a la penetración (Pa)

m = Peso del mazo

g = Gravedad (9.81 m seg⁻²)

h = Altura de caída libre del mazo

pt = Peso del penetrómetro

a = Área de la cabeza del cono

e = Penetración promedio por impacto (m)

Despejando e en (1) y evaluando (2) para los parámetros constructivos del PDI y asumiendo 3 MPa como R_p crítica para el crecimiento de las raíces de plantas monocotiledóneas (Dexter, 1986), se obtiene la constante de penetración e , representativa de la tasa promedio de penetración por impacto del mazo, para una condición física del suelo limitativa para el desarrollo de las raíces de la caña de azúcar.

$$e = \frac{m^2 \cdot g \cdot h}{pt \cdot a \cdot R_p} \quad (2)$$

Basado en la constante de penetración e se calcularon por (3) los impactos en el límite crítico (ILC) para los perfiles de suelo 0-20 y 20-30 cm, los cuales representan la profundidad estipulada para el cultivo de descompactación superficial y profundo, respectivamente, en retoños de caña de azúcar en Cuba. Los ILC son valores constantes válidos sólo para el PDI utilizado con una condición de suelo de HA en CC y R_p de 3 MPa.

$$ILC = \frac{PS}{e} \quad (3)$$

ILC = Impactos en el límite crítico de R_p elegido

PS = Perfil de suelo a evaluar (m)

Estimación de la humedad del suelo

El método propuesto para para estimar la HA del suelo en el marco de la metodología del penetrómetro, no contempla determinaciones exactas del contenido hídrico del suelo, porque sería inviable para evaluaciones in situ hechas por el agricultor y en su lugar, se propone una forma más sencilla basada en rangos de HA para las categorías baja, media y alta por tipo de suelo en combinación con la técnica de la estimación de la HA por el tacto y apariencia.

La determinación de los rangos de HA se realizó por la variación que se produce en la Rp por el tráfico de la cosechadora y camiones al cambiar la HA en cada uno de los 3 suelos estudiados. Se evaluaron los suelos PMC (23 campos y 159 ha), GV (15 campos y 120 ha) y FR (15 campos y 108 ha), cuantificando el número de impactos del mazo del PDI en 9 puntos por campo, hasta 30 cm de profundidad, antes e inmediatamente después del tráfico (García & Sánchez, 2011).

También se cogieron muestras de suelo en los perfiles 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad para determinar la HA por gravimetría en base al peso del suelo seco. La diferencia del número de impactos (ΔnI) entre la evaluación posterior y anterior al tráfico se asumió como variable dependiente (y) y se ajustó a un modelo polinomial grado 2 en función de la HA (x). Las curvas obtenidas permitieron determinar los rangos de HA donde ΔnI fue negativa (asumida como categoría de HA baja), ΔnI entre cero y la máxima ΔnI (asumida como categoría de HA media) y ΔnI del valor máximo hasta el mínimo valor positivo (asumida como categoría de HA alta).

A partir del método de tacto y apariencia propuesto por la Fundación CIAB (2017), se elaboró, por criterio de experto, una tabla adaptada a la clase textural y rangos de HA en las categorías baja, media y alta de los 3 suelos estudiados. Entonces, tomando porciones de suelo y amasándolas entre los dedos hasta la conformación de una bola, cintas o cilindros y observando su color, humedecimiento y suelo adherido a los dedos y comparándolos con la descripción de la Tabla adaptada se asume la categoría de HA correspondiente al suelo evaluado. Además, el evaluador puede auxiliarse también de su experiencia cognitiva sobre el tema y otros elementos del entorno como la presencia de grietas, días sin lluvia y suelo adherido a la varilla cónica del penetrómetro para mejorar la precisión de la estimación.

Cuantificación del efecto de la HA sobre la Rp en suelos no perturbados

La relación inversa entre la Rp y la HA determina que toda lectura de Rp hecha en HA \neq a CC incluye un Δ impactos (ΔI) negativo o positivo para HA $>$ o $<$ a CC, respectivamente. La obtención de valores promedios

de ΔI por tipo de suelo permite reducir riesgos de errores del manejo de tecnologías agrícolas basadas en la Rp del suelo. La determinación de los ΔI para los suelos involucrados se realizó en áreas no perturbadas por el tráfico de máquinas, pisoteo de animales o personas y con cubierta vegetal permanente durante 5 o más años, lo que se consideró como un suelo no alterado desde el punto de vista físico. Al respecto, Hernández, Urcelai & Pastor (2002), indican que al cabo de 4 años de barbecho las variables edáficas coincidían, en gran medida, con los agrosistemas considerados como referencia de sostenibilidad, destacándose entre otras propiedades, el aumento de la MO, nitrógeno total y la estabilidad estructural del suelo. Por su parte, Blanco (2016), señala que las coberturas vegetales a corto plazo controlan la erosión, incrementan la MO y mejoran las propiedades físicas del suelo.

Las áreas seleccionadas se inundaron en dos días consecutivos y 48 horas después y cada dos días, se monitorio la Rp y la humedad en 5 puntos por sitio, hasta el menor contenido de humedad posible por secado natural. Los datos de impactos (y) y HA (x) en 0-20 y 20-30 cm de profundidad se procesaron por regresión simple y se obtuvieron ecuaciones exponenciales patrones de mejor ajuste, que fueron la base para estimar los ΔI promedio por categoría de HA baja, media y alta por la expresión (4)

$$\Delta I = IEHA - IECC \quad (4)$$

IEHA: Impactos estimados por la ecuación patrón para HA \neq a la CC

IECC: Impactos estimados por la ecuación patrón para HA = a la CC

Cálculo de los impactos críticos de campo (ICC)

Con los valores de ILC del PDI utilizado para la Rp de 3 MPa y los ΔI promedios para las categorías de HA baja, media y alta se calcularon los impactos críticos de campo (ICC) por la fórmula (5), para los perfiles 0-20 y 20-30 cm de profundidad y cuyos valores, al contener el efecto de la HA sobre la Rp de cada suelo, permite utilizarlos como referentes de las lecturas de impacto obtenidas directamente en el campo.

$$ICC = ILC \pm \Delta I \quad (5)$$

ICC = Impactos críticos de campo

Validación de la metodología

Se utilizaron 2 experimentos en condiciones de secano y suelo PMC; el primero fue una cepa de retoño del cultivar Ja60-5 con cosecha mecanizada y el segundo una soca del cultivar C86-12, cosecha manual y compactación artificial del suelo con pases reiterados de un compactador de neumáticos de 7 t de peso. Sobre esas matrices se establecieron los tratamientos de cultivo mecánico hasta 30 cm de profundidad y un

control sin cultivo. La Rp y la HA del suelo se evaluaron a la edad 0 (después de la compactación y antes de la labor de cultivo) y a la edad de 13 meses, cuando también se determinó el rendimiento agrícola. La validación se consideró positiva si la tecnología de manejo recomendada para la condición del suelo en edad 0, alcanza mayor valor absoluto de rendimiento agrícola que el tratamiento control.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del penetrómetro de impacto

La calibración del PDI se realizó evaluando (2) con los valores constructivos del PDI y asumiendo Rp de 3 MPa para obtener la constante de penetración **e**, equivalente a la tasa de penetración promedio por impacto del mazo en una Rp crítica asumida y que permite calcular por (3) el número de impactos (ILC) del PDI para un perfil de suelo de interés, bajo una condición física limitativa para el crecimiento de las raíces de plantas como la caña de azúcar (Tabla 2) y cuyos valores son constantes del PDI utilizado.

Tabla 2. Fórmulas y cálculos para calibrar el PDI según sus parámetros constructivos y Rp asumido de 3 MPa

No.	Fórmulas	Cálculo	Resultado
(2)	$e = \frac{m^2 * g * h}{pt * a * Rp}$	$e = \frac{4^2 * 9.81 * 0.40}{6.4 * 0.000113 * 3000000}$	$e \approx 0.029 \text{ m impacto}^{-1}$
(3)	$ILC = \frac{PS}{e}$	$ILC_{0-20} = \frac{0.20}{0.029}$ $ILC_{20-30} = \frac{0.10}{0.029}$	$ILC_{0-20} \approx 7.0 \text{ impactos}$ $ILC_{20-30} \approx 3.5 \text{ impactos}$

Estimación de la humedad del suelo

Los rangos de HA en las categorías baja, media y alta en cada suelo se establecieron basado en el incremento o decremento de la Rp durante el tráfico de la cosechadora y camiones en diferente grado de humedecimiento (Figura 2). En los 3 suelos se cumple que, si la cosecha se realiza en cierto rango de HA mínima, se obtienen ΔnI negativos debido a que la Rp después del tráfico es inferior a la existente antes de la cosecha.

Al respecto, Nogueira (1998), dijo que el tráfico de la maquinaria sobre suelo seco compacta poco, porque la unión entre las partículas es muy fuerte y evita que el suelo se desplace bajo el efecto de la fuerza externa aplicada. Entonces, el rango de HA con ΔnI negativos se asumió como categoría de HA baja. Si HA en el momento del tráfico aumenta por encima de la categoría baja, los ΔnI son positivos e incrementan su valor hasta una HA próxima a la CC, donde alcanzan su valor máximo.

Proctor (1933), planteó que si la humedad aumenta la compactación se hace mayor hasta un punto, luego del cual disminuye. Así, el rango de HA donde el suelo es más susceptible a ser compactado por el tráfico se denominó categoría de HA media. Por último, si la cosecha ocurre con HA próxima o superior a la CC, los ΔnI son positivos pero menores a los obtenidos en el rango de HA media y por tanto, dicho rango se consideró como HA alta. En este sentido, Raper (2005), señaló que en suelo húmedo la Rp no aumenta porque prevalecen los deslizamientos de las partículas del suelo.

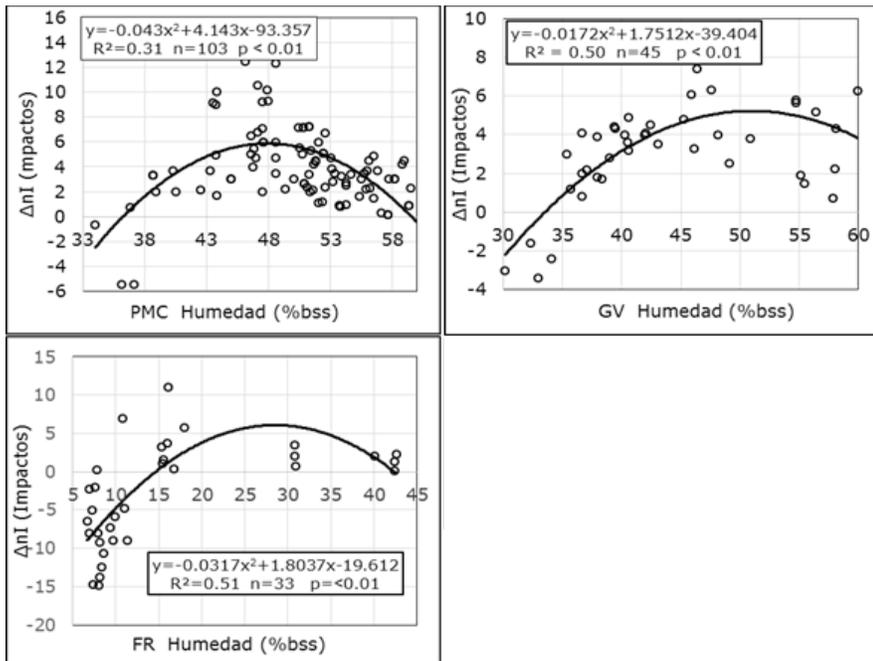


Figura 2. Variación del número de impactos (ΔnI) a causa del tráfico de la maquinaria de cosecha de la caña de azúcar.

Los rangos de las categorías (Tabla 3) fluctúan desde valores inferiores en el suelo FR en correspondencia con su textura arcillo arenosa, hasta rangos superiores y similares entre sí en los suelos PMC y GV ambos de textura arcillosa y mayor presencia de arcilla 2:1. El rango de HA alta rebasa la CC en los 3 suelos debido a que las evaluaciones de campo se realizaron en un año de zafra lluviosa.

Tabla 3. Rango de HA en las categorías baja, media y alta por tipo de suelo.

Suelos	Humedad					
	Baja		Media		Alta	
	Rango (%)	% CC	Rango (%)	% CC	Rango (%)	% CC
PMC	30 - 36	63 - 75	36 - 47	75 - 98	47 - 62	98 - 129
GV	30 - 33	56 - 61	33 - 51	61 - 94	51 - 65	94 - 120
FR	7 - 13	23 - 43	13 - 27	43 - 90	27 - 43	90 - 143

El procedimiento para estimar la HA por el método de tacto y apariencia propuesta por la Fundación CIAB (2017), se adaptó a las categorías de HA baja, media y alta en los 3 suelos (Tabla 4), en la que el evaluador debe apoyarse para estimar el rango de HA al moldear una porción de suelo entre los dedos y observar su forma y apariencia visual y decidir la categoría de HA correspondiente.

Tabla 4. Moldeado y apariencia de los suelos según textura y categoría de humedad.

Textura	Categoría humedad	Tacto y apariencia del suelo
Arcillosa (PMC y GV)	Baja	Seco, no moldeable, terrones no se parten al presionarlos o forman fragmentos duros y angulosos, grietas muy anchas. A la varilla cónica no se le adhiere suelo.
	Media	Moldeable, al presionarlo se forma una bola o cinta no muy larga, fresca sensación al tacto. No hay grietas o son muy finas. Se puede adherir suelo al cono de la varilla.
	Alta	Mojado, forma una bola blanda o cinta larga y fina, aparece agua en la superficie cuando se comprime, el suelo se pega a los dedos, no hay grietas y la varilla cónica debe limpiarse en cada puntada.
Arcillo arenosa (FR)	Baja	Seco, no moldeable, se desgrana, los terrones se desmoronan al ejercer presión. Aparecen grietas.
	Media	Moldeable, al presionarlo se forma una bola. Es difícil formar una cinta al presionarlo, fresca sensación al tacto. No hay grietas. La varilla cónica se mantiene limpia.
	Alta	Mojado, forma una bola blanda o cinta larga y fina, agua en la superficie si se comprime, el suelo se pega a los dedos, no hay grietas y la varilla cónica debe limpiarse en cada puntada.

Cuantificación del efecto de la HA sobre la Rp en suelos no perturbados

El efecto de la HA sobre la Rp en los 3 suelos en condiciones físicas no perturbadas se ajustó al modelo exponencial, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Elisei (2017). Las ecuaciones obtenidas por suelo en los perfiles 0-20 y 20-30 cm de profundidad (Tabla 5) se consideraron patrones para estimar los impactos en función de la HA. Los menores valores de R^2 se obtuvieron en el suelo GV, atribuible a la presencia de grietas en estos suelos con baja HA lo que aumenta la dispersión de las determinaciones de Rp con el penetrómetro.

Tabla 5. Ecuaciones patrones para los perfiles 0-20 y 20-30 cm de profundidad en los suelos PMC, GV y FR no perturbados.

Suelos	Profundidad (cm)	Ecuación	R^2	n
PMC	0 - 20	$y = 23.845e^{-0.045x}$	0.8006	39
	20 - 30	$y = 11.875e^{-0.026x}$	0.3859	39
GV	0 - 20	$y = 142.65e^{-0.061x}$	0.7207	45
	20 - 30	$y = 22.451e^{-0.038x}$	0.4180	45
FR	0 - 20	$y = 58.768e^{-0.073x}$	0.9228	32
	20 - 30	$y = 41.314e^{-0.05x}$	0.6006	32

Los impactos estimados en función de la HA por suelo se muestran sólo en el perfil 0-20 cm (Figura 3), pero de forma similar se estimaron para el perfil 20-30 cm a partir de las ecuaciones patrones. La magnitud de la variación de la Rp en función de la HA es propio de cada suelo, con máxima expresión en el suelo FR, seguido por el GV y el PMC, cuyas variaciones de impactos entre la CC y el menor contenido de HA fue de 28.7, 18.3 y 3.4 impactos, respectivamente. La mayor variación de la Rp en el suelo FR se atribuye a la relativamente alta presencia de arena y grava, que los hace muy tenaces cuando la humedad es baja. En el caso del suelo GV se debe al elevado contenido de arcillas 2:1 que maximiza los procesos de dilatación-contracción ante los cambios de HA. El suelo PMC es el de menor variación de impactos porque sus tenores de arcilla y arena no alcanzan valores extremos, su composición mecánica es más balanceada y por tanto, su Rp es menos susceptible a los cambios de humedad.

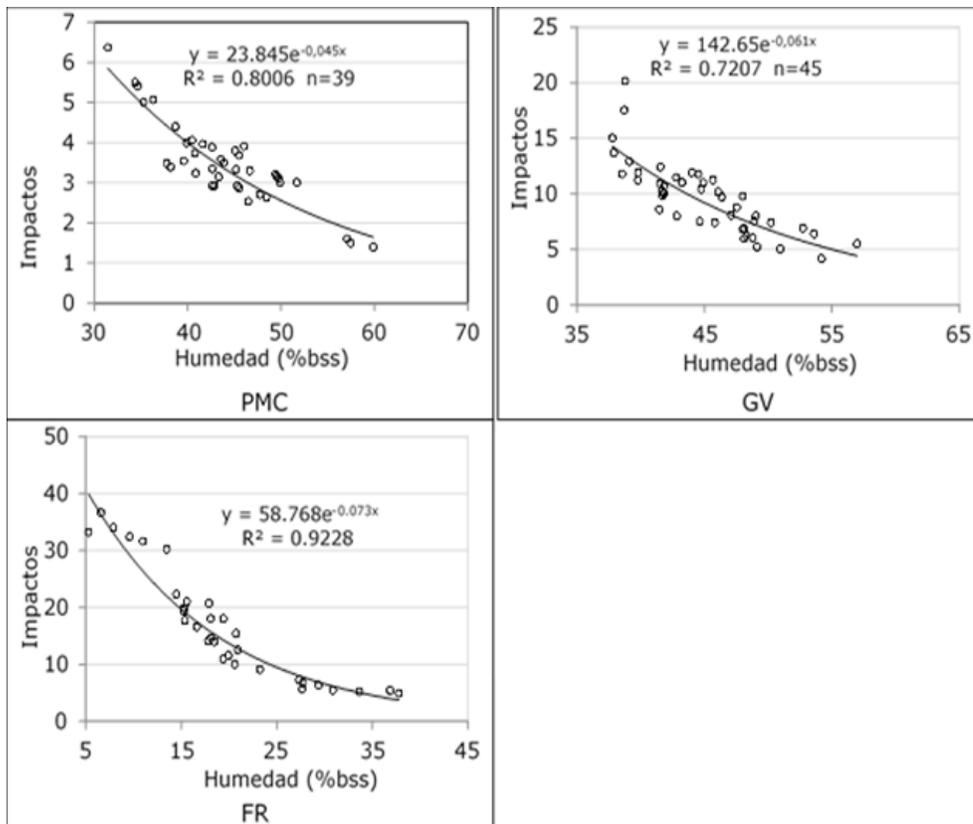


Figura 3. Variación del número de impactos del penetrómetro según la humedad en los suelos no perturbados.

Un estudio de caso permite mostrar el cálculo de los Δ impactos (ΔI) por la variación de HA (Figura 4), representativo del suelo PMC en el perfil 0-20 cm. Si la HA en **CC** (48%) se prolonga hasta cortar la curva patrón **a-b** del suelo y perfil mencionados, se genera el punto **IECC** (2.75 impactos), cuya prolongación horizontal origina la recta **c-d**. Entre **a-b** y **c-d** se forman las zonas ΔI y $-\Delta I$ para humedad menor y mayor a CC, respectivamente, porque la Rp se sobreestima o subestima según el suelo se seca o humedece. Entonces, para calcular el ΔI correspondiente a una evaluación de penetrometría realizada en HA = 40%, la ecuación exponencial patrón se evalúa para $x = 40\%$ y obtiene Rp (y) = 3.94 impactos (IEHA) y aplicando la fórmula (4) obtiene $\Delta I = 1.19$ impactos, equivalente al incremento de la Rp por la contracción del suelo al disminuir la humedad respecto a la CC.

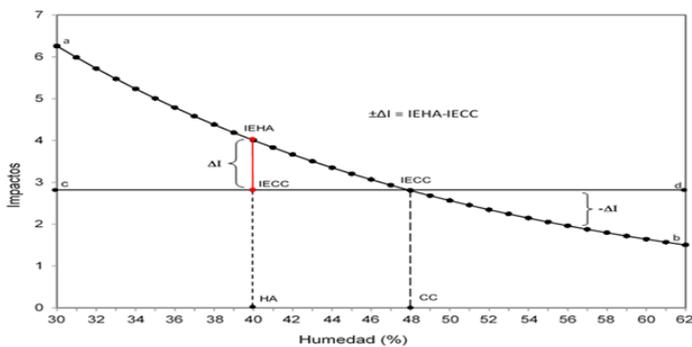


Figura 4. Diagrama representativo del ΔI .

Aplicando el mismo procedimiento se calcularon los ΔI promedio para las categorías de HA baja, media y alta en los perfiles 0-20 cm (Tabla 6) y 20-30 cm de profundidad de los 3 suelos.

Tabla 6. Valores ΔI por suelo y categoría de humedad. Perfil 0-20 cm.

Humedad (HA)	IEHA	IECC	ΔI	Categoría	ΔI promedio
Suelo PMC					
30	6.18	2.75	3.43	Baja	2.67
⋮	⋮	⋮	⋮		
36	4.72	2.75	1.97		

Tabla 7. Impactos críticos de campo (ICC) por suelo, categoría de humedad y profundidad del perfil.

Suelos	Categoría	Rango de humedad	ILC		ΔI promedio		ICC	
			0-20	20-30	0-20	20-30	0-20	20-30
PMC	Baja	30-36	7.0	3.5	2.67	1.6	10	5
	Media	36-47	7.0	3.5	0.9	0.6	8	4
	Alta	47-60	7.0	3.5	-0.6	-0.5	6	3

36	4.51	2.75	1.76	Media	0.9
⋮	⋮	⋮	⋮		
47	2.88	2.75	0.13		
47	2.75	2.75	0.00	Alta	-0.6
⋮	⋮	⋮	⋮		
60	1.60	2.75	-1.15		
Suelo GV					
30	23.6	5.3	18.3	Baja	16.1
⋮	⋮	⋮	⋮		
33	19.7	5.3	14.4		
33	17.9	5.3	12.6	Media	5.9
⋮	⋮	⋮	⋮		
51	6.4	5.3	1.1		
51	6.0	5.3	0.7	Alta	-0.5
⋮	⋮	⋮	⋮		
60	3.7	5.3	-1.6		
Suelo FR					
7	35.25	6.58	28.7	Baja	22.0
⋮	⋮	⋮	⋮		
13	22.75	6.58	16.2		
13	21.15	6.58	14.6	Media	7.2
⋮	⋮	⋮	⋮		
27	8.19	6.58	1.6		
27	7.61	6.58	1.0	Alta	-1.5
⋮	⋮	⋮	⋮		
40	3.17	6.58	-3.4		

Cálculo de los impactos críticos de campo (ICC)

Con la expresión (5) se calcularon los impactos críticos de campo (ICC) por suelo y contenido de HA (Tabla 7), cuyos valores son de referencia para comparar lecturas de penetrometría y decidir in situ, el tipo de tecnología agrícola a utilizar acorde a la resistencia del suelo, siendo entonces, una herramienta para ayudar al productor de forma práctica y sencilla y sin apelar a medios sofisticados, a mejorar el manejo de las tecnologías de cultivo y residuos de cosecha en los retoños de caña de azúcar.

GV	Baja	30-33	7.0	3.5	16,1	3.9	23	7
	Media	33-51	7.0	3.5	5.9	1.7	13	5
	Alta	51-60	7.0	3.5	-0.5	-0.2	6	3
FR	Baja	7-13	7.0	3.5	22.0	16.0	29	20
	Media	13-27	7.0	3.5	7.2	5.9	14	10
	Alta	27-40	7.0	3.5	-1.5	-1.5	5	2

Validación de la metodología

Al inicio de los experimentos (edad 0) se estimó por tacto y apariencia la HA en categoría media y seguidamente se evaluaron los impactos por perfiles (Tabla 8) y se compararon con los respectivos valores de ICC para el suelo, perfiles y categoría de humedad correspondientes, siendo detectado niveles de impactos superiores a los ICC en el perfil 20-30 cm y por tanto, la recomendación fue cultivo profundo en ambos experimentos.

Tabla 8. Impactos del PDI por edades, perfiles, tratamientos cultivado y no cultivado y rendimiento agrícola por tratamientos.

Experimentos	Edad (meses)	Tratamientos	Perfil 0-20		Perfil 20-30		t caña ha ⁻¹
			Impactos	HA (%)	Impactos	HA (%)	
I	0	Cultivado	6.4	40.6	7.3	41.8	-
		Sin cultivo	7.0	40.3	8.8	41.5	
	13	Cultivado	2.2	45.4	5.7	43.7	
		Sin cultivo	3.3	43.5	5.2	42.8	
II	0	Cultivado	5.7	38.7	10.7	39.1	-
		Sin cultivo	5.2	38.4	5.7	39.4	
	13	Cultivado	2.6	39.3	3.2	40.2	
		Sin cultivo	3.2	37.2	4.0	39.8	

Categoría humedad media suelo PMC: 36-47% ICC suelo PMC humedad media perfil 0-20 cm: 8 impactos ICC suelo PMC humedad media perfil 20-30 cm: 4 impactos

A la edad de 13 meses se cosecharon los experimentos y el rendimiento agrícola del cultivo profundo fue superior al control sin cultivo en 2.5 y 3.9 t de caña ha⁻¹ en los experimentos I y II, respectivamente, incrementos que están dentro del rango obtenido por el cultivo profundo en otras experiencias realizadas en Cuba. Tales aumentos del rendimiento agrícola se lograron en condiciones de secano donde, por lo general, el cultivo profundo en los meses secos contribuye a intensificar la pérdida de humedad del suelo. En la etapa inicial de los 2 experimentos (edad 0, x=14/3) la humedad en el perfil 0-20 cm, era muy similar en ambos tratamientos, pero la situación cambió de forma radical en los 2 meses siguientes, debido a que la humedad disminuyó drásticamente en las parcelas cultivadas, para mantenerse por debajo del control sin cultivo hasta inicios de junio donde comenzaron las lluvias de primavera.

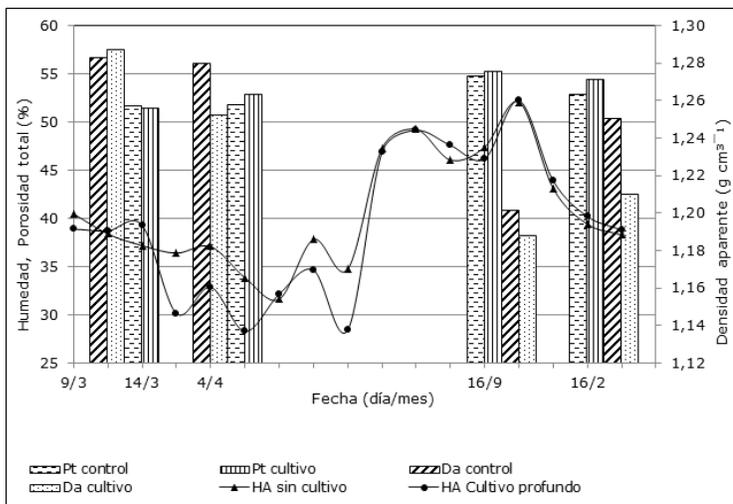


Figura 5. Variación de humedad, densidad aparente y porosidad total por tratamientos. Suelo PMC. Perfil 0-20 cm.

Sin embargo, en la propia figura se aprecia que la labor de cultivo mejoró otros indicadores físicos importantes para el crecimiento de las raíces. Así, la densidad aparente (D_a) fue inferior en la variante cultivada tanto en los meses secos como en los húmedos, lo que trajo consigo incrementos en la porosidad total (P_t) del suelo respecto al control sin cultivo. Los valores de humedad, D_a y P_t en la evaluación del 16/9 son una muestra del ambiente edáfico que prevaleció durante los meses lluviosos en cada tratamiento. Así, la menor D_a y mayor P_t en la variante cultivada se traduce en mayores posibilidades de aireación del suelo, aspecto de mucha importancia y que, en los suelos de textura arcillosa, puede convertirse en limitante del crecimiento de las plantas cuando la humedad ronda la CC.

Los resultados de la validación demuestran que independientemente que el cultivo profundo recomendado disminuyó el contenido de HA en los meses secos respecto al control no cultivado en un manejo cultural de secano, se mejoraron otros indicadores de la calidad física del suelo como la porosidad total que, en los meses lluviosos, aseguraron mejor aireación cuando la HA se mantiene en niveles altos durante tiempo prolongado a causa de las lluvias frecuentes, lo que puede haber influenciado de forma favorable en la producción obtenida.

CONCLUSIONES

La resistencia a la penetración del suelo se relaciona de forma inversa a la humedad, lo cual puede conducir a errores de manejo del cultivo mecánico de descompactación y la cobertura de residuos de cosecha en los retoños de caña de azúcar.

Los valores de impactos críticos propuestos por suelo y rango de humedad, al contener el efecto de la humedad sobre la resistencia, le permite al productor usarlos como referencia para tomar decisiones in situ sobre el manejo de tecnologías en la atención cultural a los retoños.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blanco Valdés, Y. (2016) El rol de las arvenses como componente en la biodiversidad de los agroecosistemas. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 34-56.

Cuba. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (2015). Manual de procedimientos para los laboratorios de suelo y agua. IICA.

Cuba. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. (1999). Manual de procedimientos para los laboratorios de física de suelo. INICA.

Dexter, A. (1986). Model experiment on the behaviour of root of the interface between a tilled seedbed and compaction sub-soil. *Plant and Soil*. 95, 123-133.

Elisei, J. (2017). Influencia de la humedad del suelo en la resistencia a la penetración vertical. *RTA*, 10(33).

Fundación CIAB. (2017). Cálculo de la humedad del suelo por el tacto. Departamento de Agricultura de los EE.UU. <https://www.fundacionciab.com/calculo-de-la-humedad-del-suelo-por-el-tacto/>

García Ruiz, I., & Sánchez Ortiz, M. (2011). Normativas para el uso del penetrómetro de impacto en el diagnóstico de la compactación de los suelos en caña de azúcar. *Cuba & Caña*, 2, 54-60.

Hernández Jiménez, A., Pérez, J. M., Bosch Infante, D., & Castro Speck, C. (2015). Clasificación de los suelos de Cuba. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.

Hernández, A. J., Urcelai, A., & Pastor, J. (2002) Evaluación de la resiliencia en ecosistemas degradados. II Reunión Ciencia Sistemas. Valencia, España.

Letey, J. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1, 277-294.

Matías Sánchez, A. (2010). Ingeniería y morfología del Terreno. Universidad de Extremadura.

Monroy Rodríguez, F. L., Álvarez Herrera, J. G., & Alvarado Sanabria, Ó. H. (2017). Distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo en un transecto de la Granja Tinguavita, Paipa. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 20(1), 91-100.

Nacci, S., & Pla Sentis, I. (1992). Estudio de la resistencia a la penetración de los suelos con equipos de penetrometría. *Agronomía Tropical*, 42 (1-2), 115-132.

Nogueira, J. B. (1998). Mecánica de suelos. Ensayos de Laboratorio.

Paredes, D., D'Amico, J.P., Roba, M., Romito, A., & Florean, R. (2009). Calibración del índice de cono de un suelo argiudol vértico por humedad y profundidad. X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del Mercosur. Santa Fe, Argentina.

Proctor, R. R. (1933). The *Design and Construction of Rolled Earth Dams*. *Engineering-News Record*. Engineering News Publishing Co.

Raper, R. L (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *J. Terramec.*, 42, 259-28.

Roboredo, D., Maia J., De Oliveira O., & Roque C. (2010). Uso de dos penetrómetros en la evaluación de la resistencia en un suelo Latosol Rojo Distrófico. *Eng. Agric., Jaboticabal*, 30(2), 307-314.

Sánchez Girón, R. (1996). Dinámica y Mecánica de suelos. Ed.: Agrotécnicas.

Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 15, 229-235.