

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN
MODALIDAD PASANTÍA

“Resistencia mecánica del suelo a la
penetración”

ALUMNO: YOEL FARID NICOLAS LOVEY.

DIRECTOR: ING. AGR. (Dr.) HUMBERTO CARLOS DALURZO.

TRIBUNAL EVALUADOR:

- Ing. Agr. (Dra.) Tania Soledad Rey Montoya
- Ing. Agr. (Mag.) Marcos Chaval.
- Ing. Agr.(Mag.) Nicolás Hitoshi Sugita.

AÑO: 2023

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mi familia por estar y apoyarme en cada paso dado y brindarme siempre lo mejor para poder lograr mis objetivos y mi meta que fue recibirme de Ing. Agrónomo. A mis amigos y compañeros de la Facultad, pilares fundamentales para no decaer en este camino.

Agradecimiento especial a mi asesor Ing. Agr. (Dr.) Humberto Carlos Dalurzo por su predisposición, en brindarme todos los conocimientos y ayudarme de manera incondicional en cada paso que tuve que realizar a lo largo de las prácticas profesionalizantes como así también en la vida personal, por su gran motivación a seguir aprendiendo y formarme en esta hermosa carrera.

También doy gracias a todos los miembros de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE; como los integrantes del Centro de Estudiantes, Alumnado, personal de la Biblioteca BAUNE, y a todo el cuerpo no docente de esta querida institución que trabajan incansablemente para el bienestar y confort de los estudiantes, en un ambiente agradable y acompañados durante nuestra formación en esta casa de estudios.

INDICE

INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS	6
LUGAR DE REALIZACIÓN	6
DESCRIPCIÓN DE TAREAS DESARROLLADAS	11
RESULTADOS OBTENIDOS	16
COMENTARIOS FINALES	20
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	21

1. INTRODUCCIÓN

Por acción de presiones, una masa de suelo puede comprimirse, disminuyendo su volumen, modificándose el número y tamaño de los poros y aumentando la densidad aparente. Este proceso se conoce como compactación. Los cambios que ocurren establecen condiciones desfavorables para la entrada del agua en el suelo, en la conductividad hidráulica y en la difusión de gases en la capa afectada. Todo el conjunto de alteraciones afecta el crecimiento de las plantas, en principio porque comprometen el desarrollo radical al aumentar la resistencia del suelo a ser atravesado por las raíces (Atwell, 1993).

La resistencia mecánica a la penetración (RMP) es un indicador del nivel de compactación de un suelo. La compactación limita el crecimiento radicular y la cantidad de aire y agua de que disponen las raíces (Herrick & Jones, 2002; Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2003).

El uso prolongado de sistemas de labranza (SL) muy agresivos como la utilización de arados de rejas o rastras de discos pesadas con alta frecuencia e intensidad de laboreo pueden provocar un deterioro de las propiedades físicas del suelo (Fabrizzi et al., 2005). La siembra directa (SD) surge como una alternativa para contrarrestar los efectos negativos producidos por el exceso de labranzas (Ferrerías et al., 2000), actuando directamente a través de la reducción del laboreo e indirectamente a través del incremento de la materia orgánica (MO) en los primeros centímetros del perfil (Domínguez et al., 2009). Sin embargo, en los últimos años los sistemas de producción agropecuaria fueron evolucionando hacia ciclos agrícolas cada vez más extensos y, en algunos casos, hacia el monocultivo, el cual provoca un bajo aporte de residuos (Domínguez et al., 2005). El manejo del aporte de residuos de cultivo debe estar orientado a mantener y/o aumentar los niveles de carbono orgánico del suelo (CO). Éste es considerado un indicador de la salud del suelo y su mantenimiento resulta fundamental para la sustentabilidad de los sistemas de producción, debido a su gran influencia sobre muchas de las propiedades biológicas, químicas y físicas del suelo, ya que es determinante de su capacidad para reorganizarse ante las alteraciones provocadas por el uso (Franzluebbers, 2002; Duval et al., 2013).

La condición física de los suelos bajo pasturas también es afectada, entre otros factores, por las operaciones de laboreo y por el pastoreo directo. Esto último incluye al pisoteo animal, que es la presión mecánica ejercida por el ganado sobre el suelo, el pasto y la cobertura vegetal (Kurtz et al. 2023). El efecto es más severo en lugares donde el pisoteo se reitera con alta frecuencia y la humedad edáfica es elevada. Si el contenido de humedad del suelo es alto, el impacto de la pezuña suele provocar deformación superficial (Sosa et al., 1995), generando aumento en la densificación y disminuciones de la porosidad, la estabilidad estructural y la capacidad de infiltración (Denoia et al., 2000).

El impacto del fuego sobre los suelos depende de numerosos factores, como tipo de vegetación, intensidad y severidad del fuego, tipo de suelo, contenido de humedad en el momento de la quema, duración e intensidad de precipitación postincendio, como la calidad y el grado de incorporación de cenizas (Agee 1993; DeBano et al. 1998 citados por Minervini et al. 2018).

Según la intensidad del incendio y el tipo de suelo, los cambios serán más o menos evidentes. Generalmente se observa que el fuego produce una fragmentación de agregados, densificación y una pérdida de estabilidad debido a la ruptura de los cementos orgánicos a temperaturas elevadas (Badía y Martí, 2003).

La compactación de los suelos puede ser evaluada a través de varios parámetros. La medida de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) es una vía sencilla para detectar los cambios en el perfil que pueden relacionarse con la exploración de las raíces (Pires da Silva et al., 2003). La variación espacial de la RMP es más apropiada que la densidad aparente en la determinación de capas limitantes al crecimiento radical, porque presenta mayor sensibilidad en la detección de sectores diferenciados en grados de compactación (Jorajuria Collazo, 2004).

Existen diversos procedimientos de laboratorio y campo para medir la resistencia mecánica del suelo, pero el más utilizado es la medición directa en campo mediante un implemento llamado penetrómetro cónico (Herrick & Jones, 2002). Un penetrómetro cónico o probador de resistencia es un equipo que mide la resistencia que opone el suelo al paso de una punta cónica con área de la base y ángulo de punta estandarizada (ASAE, 1998). En general, se conocen dos tipos de penetrómetros, los estáticos y los dinámicos. Los primeros miden la resistencia del suelo con un desplazamiento del cono a una velocidad constante, por lo que generalmente se construyen con dispositivos motorizados para mantener una velocidad constante. Los segundos se basan en la energía lograda por el impacto de un martillo como resultado de su caída libre a una altura determinada (Bengough et al., 2001; Vanags et al., 2004). Los probadores de resistencia estáticos son más sofisticados y costosos porque requieren de una velocidad constante de avance en el suelo, y cuando los prototipos son menos sofisticados la velocidad de penetración depende de la habilidad del operador, generando datos de baja repetitividad (Fritton, 1990). Los penetrómetros dinámicos son baratos, y con un manejo adecuado generan datos reproducibles, ya que la energía empleada no depende del operador sino de la altura de caída, peso del martillo y la fuerza de gravedad (Klvac et al., 2010; Herrick & Jones, 2002).

2. OBJETIVOS

- Adquirir destreza y habilidad en la determinación de resistencia mecánica a la penetración en un suelo clasificado como Argiudol ácuico.
- Brindar información sobre la Resistencia Mecánica a la Penetración (RMP) en esta clase de suelo después de haber sufrido un incendio.

3. LUGAR DE REALIZACION.

Se trabajó en un ensayo instalado en la E.E.A. INTA Corrientes (**Figura 1**), en un suelo perteneciente a la Serie Treviño, clasificado como Argiudol Ácuico. En este suelo se evaluó la influencia de los distintos tipos de labranzas y secuencias de cultivos sobre la RMP, obteniendo las determinaciones con un instrumento llamado penetrómetro de impacto y la posterior evaluación de los resultados en la cátedra de Manejo y Conservación de Suelos de la FCA - UNNE.



Figura 1: Imagen aérea del lugar de toma de muestras. EEA INTA Corrientes.

Caracterización climática

El clima de Corrientes es subtropical, cálido en verano, pero con heladas en invierno (**Figura 2**). Cuenta con clima húmedo, con excesos hídricos desde fin de verano y otoño y deficiencia de precipitaciones en invierno y comienzo de primavera.

La temperatura media anual en la provincia fluctúa entre 19,5°C y 22°C, encontrándose más próxima a 22°C durante la mayoría de los años.

Las isotermas del mes más cálido del verano fluctúan entre 26°C y 27,5°C y las del mes más frío del invierno, entre 13,5°C y 16°C. Las temperaturas de verano son más homogéneas que las de invierno. La amplitud anual promedio es de 12°C, propia de los climas subtropicales.

Los rangos de la amplitud anual de la temperatura media en la provincia se encuentran entre 10 y 14°C. Las precipitaciones se distribuyen en forma irregular en todo el territorio: varía entre los 1.000 mm anuales hasta los 1.500 hacia los límites con Misiones.

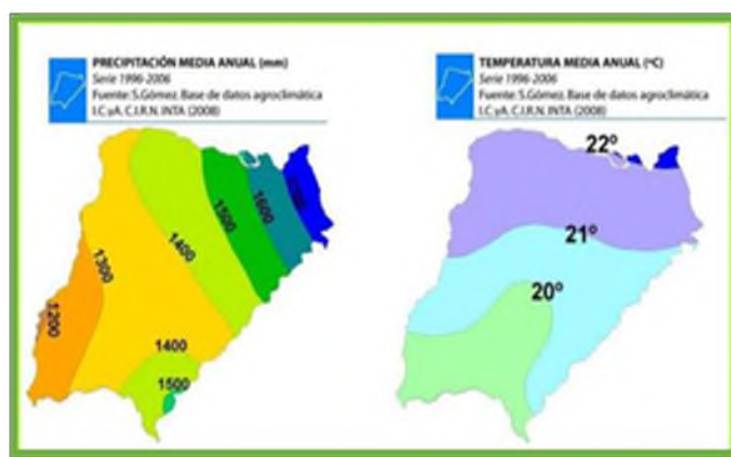


Figura 2: Precipitación media anual (mm) y temperatura media anual (°C) en la Provincia de Corrientes.

Fuente: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (citado por Panigatti, 2010)

Caracterización edáfica:

La Serie Treviño es un suelo clasificado como Argiudol Ácuico (Escobar et al., 1996). Son suelos moderadamente bien drenados, con escurrimiento medio a lento y permeabilidad moderadamente lenta a moderada, encharcables por cortos períodos. Presenta un horizonte superficial mólico de 40 cm de espesor, que incluye un BAt de textura franco-arenosa, de color pardo grisáceo muy oscuro y reacción débilmente ácida. Posee un horizonte argílico (Bt), franco arcillo arenoso, fuertemente estructurado de color negro y reacción neutra. Los moteados y concreciones de hierro-manganeso comienzan a los 17 cm y la profundidad efectiva es de 65 cm. Son suelos moderadamente fértiles, con valores intermedios en bases de cambio, especialmente en el Bt y de materia orgánica en el epipedón, con pobres contenidos en fósforo.

Los datos del perfil de la Serie Treviño que se presentan en la Tabla 1 (Escobar et al., 1996).

Tabla 1: Datos del perfil de la Serie Treviño (Escobar et al., 1996).

HZTE.	PROF. cm.	GRANULOMETRIA					CATIONES DE CAMBIO								
		M.O.	Arena				pH	Ca	Mg	K	Na	H	T	S/T	PSI
			Arcilla	Limo	Fina	Gruesa									
			%	%	%	%									
A1	0/17	1,72	11,6	21,5	64,7	2,2	5,6	3,5	2,9	0,1	0,3	1,0	6,8	100	3,8
A2	17/30	1,09	13,7	21,4	63,1	1,8	5,8	5,7	2,4	0,1	0,4	1,0	7,3	100	4,1
BAt	30/39	1,16	20,0	22,3	55,4	2,3	6,0	8,9	2,9	0,1	0,5	2,6	13,9	89	3,3
Bt1	39/66	0,90	32,6	16,1	49,6	1,7	6,3	13,9	3,9	0,2	0,8	3,2	20,2	93	3,6
Bt2	66/87	0,66	32,9	16,6	48,4	2,1	7,0	14,6	4,0	0,3	0,7	1,4	20,8	94	3,3
Btk	87/+	0,28	30,5	16,6	51,4	1,5	7,4	14,2	4,1	0,3	0,7	1,5	18,6	100	3,3

Referencias: MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, K: potasio, Na: sodio, S: suma bases intercambiables; H: acidez intercambiable; T: capacidad de intercambio catiónico (suma de S y H); S/T= (V): porcentaje de bases cambiables, cociente entre bases intercambiables y capacidad de intercambio catiónico; PSI: porcentaje de sodio intercambiable, cociente entre sodio intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico.

Posteriormente el suelo fue reclasificado según las modificaciones del Soil Taxonomy como Argiudol Acuertico (Panigatti, 2010). Ver **figura 3**.



Información brindada por: Ing. Agr. Darvín Luján y Lic. Fabiana Navarro (INTA SEA Corrientes).

Figura 3. Características del suelo. (Panigatti, 2010)

La práctica y entrenamiento realizado en esta pasantía, se efectuó empleando un diseño experimental de larga duración que realizó la Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos conjuntamente con la EEA INTA Corrientes en el año 2004.

La finalidad de usar este ensayo previo fue la de contar con situaciones contrastantes en un mismo sitio con la certeza de la historia de cada parcela.

El citado ensayo empleado fue en parcelas completamente aleatorizadas (DCA) en un arreglo factorial (3 x 4), donde los factores fueron: a) Sistemas de labranzas, con tres niveles: Labranza Convencional (LC), Labranza Reducida (LR) y Siembra Directa (SD); y b) Secuencias de cultivos, con cuatro niveles de rotaciones. Rotación 1 (R1) con un cultivo por año: Maíz-Descanso (M-D), rotación 2 (R2) con dos cultivos por año: Maíz-Avena (M-Av), rotación (R3) con tres cultivos por año: Maíz-Caupí-Avena (M-Ca-Av) y la rotación 4 (R4) con pastura perenne (Pasto cambá).

Los tratamientos fueron doce (Tabla 1), cada uno con cuatro repeticiones y totalizando 48 unidades experimentales, y el tamaño de la parcela utilizada fue de 140 m².

Tabla 1. Descripción de los tratamientos y acrónimos usados en cada uno de ellos

Sistemas de labranzas	Secuencias de cultivos	Tratamientos
Labranza convencional (LC)	1 cultivo por año: maíz-descanso	LC-R1 (1)
	2 cultivos por año: maíz-descanso-avena	LC-R2 (2)
	3 cultivos por año: maíz-caupí-avena	LC-R3 (3)
	4 pasto cambá	LC-R4 (4)
Labranza Reducida (LR)	1 cultivo por año: maíz-descanso	LR-R1 (5)
	2 cultivos por año: maíz-descanso-avena	LR-R2 (6)
	3 cultivos por año: maíz-caupí-avena	LR-R3 (7)
	4 pasto cambá	LR-R4 (8)
Siembra Directa (SD)	1 cultivo por año: maíz-descanso	SD-R1 (9)
	2 cultivos por año: maíz-descanso-avena	SD-R2 (10)
	3 cultivos por año: maíz-caupí-avena	SD-R3 (11)
	4 pasto cambá	SD-R4 (12)

Manejo y seguimiento del trabajo que realizó la EEA INTA Ctes con la Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos de la FCA desde la campaña 2024

Los sistemas de labranzas empleados fueron:

- **Labranza convencional (LC):** Se preparó el suelo previo a la siembra de los mismos con remoción e incorporación de rastrojos por método mecánico, para ello se utilizó una rastra de disco de tiro excéntrico, realizando cuatro pasadas y además una rastra de dientes para la preparación de la cama de siembra.
- **Labranza reducida (LR):** La operación de labranza consistió en la semi-incorporación de rastrojos del cultivo, dejando parte de los mismos en superficie. Esta labor se realizó con dos pasadas sucesivas con una rastra de discos.
- **Siembra Directa (SD):** El manejo de las malezas se realizó con herbicidas dejando los rastrojos en superficie.

Los cultivos empleados fueron:

- ❖ **Caupí (*Vigna unguiculata L.*),** Época de siembra: primera quincena de febrero. Densidad de siembra 60.000 semillas ha⁻¹. Espaciamiento: 0,7 m entre líneas.
- ❖ **Avena negra (*Avena strigosa L.*),** variedad avena negra. Época de siembra: primera quincena de mayo, al voleo con una densidad de 80 kg de semilla ha⁻¹.
- ❖ **Maíz amarillo (*Zea mays L.*),** Época de siembra: primera quincena de septiembre. Densidad: 12 kg de semilla ha⁻¹, Espaciamiento: 0,7 m entre líneas.
- ❖ **Pasto Cambá (*Paspalum atratum*)** sembrado en líneas, la segunda quincena del mes de Septiembre.

4. DESCRIPCION DE LAS TAREAS REALIZADAS

Descripción de tareas desarrolladas:

Al emplear este ensayo en macroparcels que fue afectado por la quema desde campos vecinos, se hicieron las mediciones de RMP en las 48 parcelas. En cada parcela se hicieron 2 determinaciones a diferentes profundidades: 0-7 y 7-20 cm (**Figura 4**). Además, se extrajo muestras de suelo con un barreno para determinar gravimétricamente el contenido de humedad presente a las mismas profundidades dando un total de 192 muestras (48 parcelas x 2 mediciones x 2 profundidades). Las muestras de humedad tomaron se transportaron hasta el laboratorio de la FCA para su evaluación y registro.

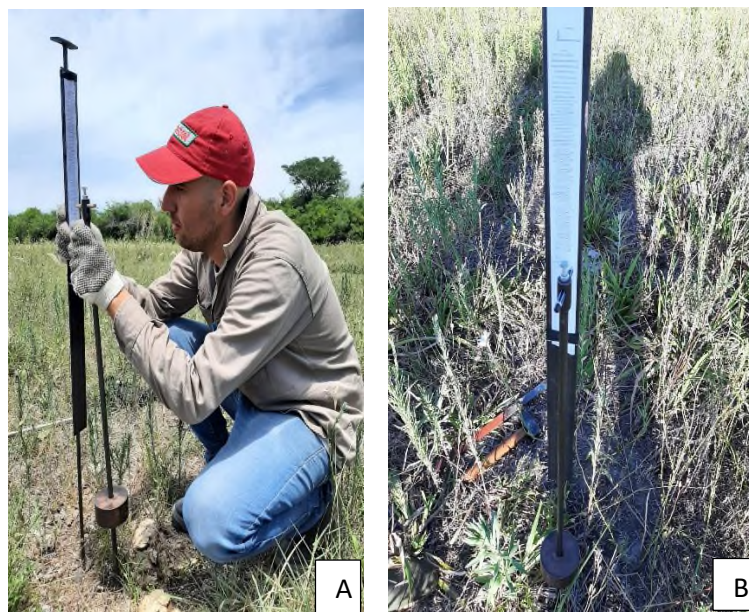


Figura 4. A: medición de la RMP con el penetrómetro de impacto. B: faja donde refleja el número de golpes a diferentes profundidades.

El instrumento utilizado cuenta de un vástago de 50cm de longitud por donde se desliza un pilón de 2 kg. En el extremo basal tiene un cono de 20 mm de alto y 16 mm de diámetro. Cada golpe se registra con una línea en una faja sostenida por una regla que se encuentra enfrentada al instrumento, generando líneas para contabilizar el total de golpes.

El procedimiento consistió, en ubicar el instrumento en cada parcela y soltar el pilón, donde esta caída genera un golpe, este a su vez hace que el cono ubicado en el extremo apoyado sobre el suelo penetre a efectos de este impacto. Cada golpe se registró en una faja de papel donde posteriormente se pueden contabilizar el número de golpes y las profundidades.

Este procedimiento se realizó en los 2 extremos de cada parcela, dando un total de 2 determinaciones de RMP por parcela.

También, mediante un barreno, se extrajeron muestras de suelo en el mismo lugar donde se hicieron las mediciones, para obtener los valores de humedad presente para cada situación y a dos profundidades: de 0-7 cm y de 7-20 cm. Cada una de estas muestras fue envuelta en un papel aluminio, rotulada con el número de parcela y profundidad, luego fueron colocadas en una conservadora para no alterar los contenidos de humedad (**Figura 5**).

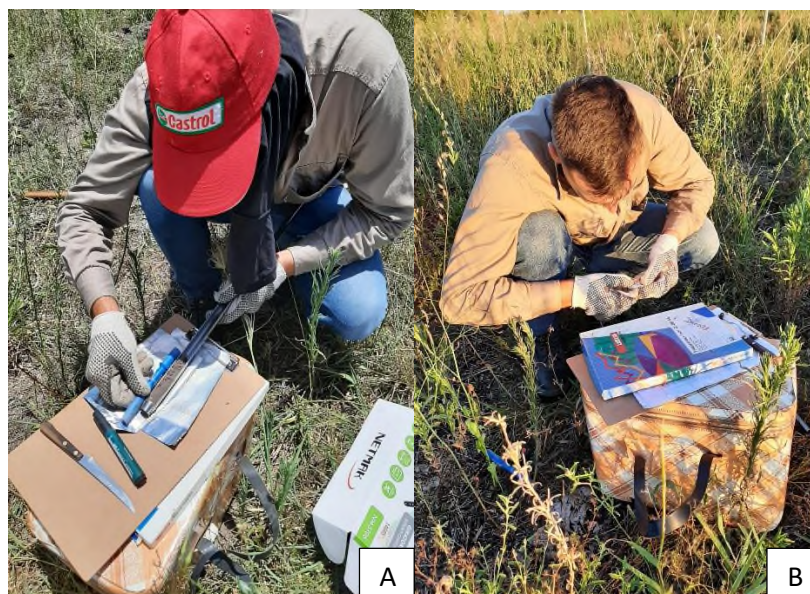


Figura 5. A: extracción de muestras de suelo. B: Acondicionamientos de las muestras para evitar la pérdida de humedad del suelo.

En laboratorio, se pesaron las muestras y registraron los valores para posteriormente llevar a estufa a 105 °C por 24 hs hasta peso constante, tal como se muestra en la (**Figura 6**). Con estos valores de peso húmedo y peso seco se obtuvieron los valores de humedad presente al momento de realizar la determinación.

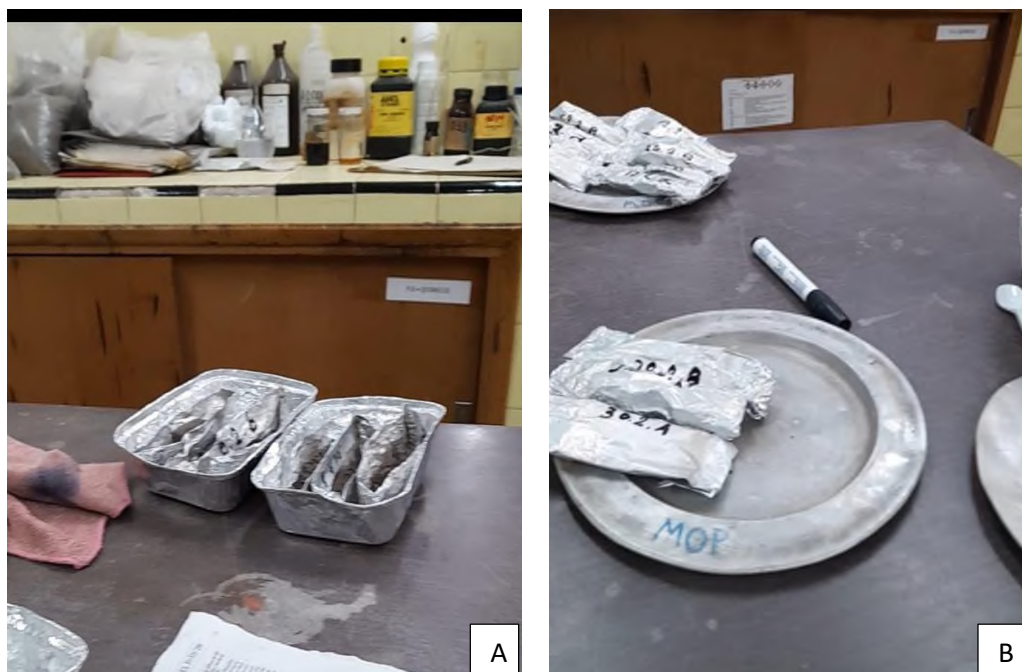


Figura 6. A: muestras listas para llevar a estufa. B: muestras acondicionadas traídas del campo.

Una vez que obtuvimos los valores de humedad de cada parcela, se procedió a contabilizar el número de golpes en cada parcela para llegar a las 2 profundidades de estudio, con estos datos se obtuvieron valores de Resistencia Mecánica a la Penetración (RMP) en base al contenido de humedad.

Como los valores de RMP mayores de 1.67 a 2.45 fueron elevados (Greacen and Sands, 1980) y muy bajos valores de humedad debido a la extrema sequía al momento de la determinación, se eligieron al azar 8 parcelas las cuales fueron: 4, 6, 9, 11, 12, 14, 19 y 21. En estas parcelas se colocaron anillos de infiltración, se agregó agua hasta obtener un suelo saturado de humedad (**Figura 7**). Luego de obtener el suelo saturado, se dejó 2 días de reposo sin agregar agua para trabajar con un suelo en capacidad de campo (CC). Con este suelo en CC, nuevamente se procedió a realizar las mediciones de RMP con el penetrómetro de impacto dentro y fuera del anillo con sus respectivas extracciones de muestras para determinar contenido de humedad. Las determinaciones se hicieron dentro del anillo para tener valores de RMP en condición de capacidad de campo y fuera del anillo para obtener la misma información, pero con humedad inferior al contenido en CC o sea con valores intermedios entre la capacidad de campo mencionada y el suelo en las condiciones de humedad que presentó a campo en una campaña de sequía donde los contenidos de humedad fueron inferiores al 6,4%.



Figura 7. A: instalación del anillo de infiltración. B: llenado del anillo con agua. C: recarga y protección del anillo de infiltración.

Una vez que obtuvimos los valores de RMP con suelo seco y suelo húmedo, se hizo un análisis de regresión con todos los valores hallados para evaluar la variación de la RMP con el contenido de humedad presente, al momento de la medición.

Mediante un análisis de varianza se buscó definir posibles diferencias estadísticas entre tratamientos (Di Renzo et al., 2011).

5. RESULTADOS OBTENIDOS

En la **Tabla N°3** se presentan los resultados promedios de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) obtenidas en los 12 tratamientos evaluados.

Tabla 3: Análisis de la varianza de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) e interacciones entre los factores y medias por sistemas de labranzas (SL) y secuencias de cultivos agrupadas por profundidad.

Resistencia Mecánica a la Penetración (RMP)		RMP (MPa)	
Factor		0-7 cm	7-20 cm
Labranza convencional (LC)		2,20 ns	7,64 ns
Labranza reducida (LR)		1,98 ns	6,56 ns
Siembra directa (SD)		2,25 ns	6,84 ns
Rotación de 1 cultivo/año (R1)		2,19 ns	6,32 ns
Rotación de 2 cultivos/año (R2)		2,32 ns	7,78 ns
Rotación de 3 cultivos/año (R3)		2,20 ns	7,56 ns
Rotación con pastura perenne (R4)		1,18 ns	6,37 ns
"F"	Sistemas de Labranza (SL)	1,26 ns	1,59 ns
"F"	Rotaciones	1,52 ns	2,31 ns
Coeficiente de variación (Cv)		34,16	35,64
Número de observaciones (n)		96	96

Referencias: n: número de observaciones; CV (%): coeficiente de variación; ns: sin diferencias significativas

Con los datos obtenidos se aplicó un análisis de varianza, para comparar los valores de RMP entre los sistemas de labranzas y rotaciones. Teniendo en cuenta los sistemas de labranzas a una profundidad de 0-7cm arrojaron valores de RMP que variaron entre 1,98-2,25 MPa, sin diferencias significativas para estos 3 tratamientos. De sistemas de labranzas para la segunda profundidad de 7-20 cm, los valores hallados fueron de 6,56 – 7,64 MPa, también sin significación estadística para los tipos de labranzas, pero con valores restrictivos por superar los 2 MPa (Greacen & Sands, 1980), mientras que otros autores (Pla Sentís & Ovalles, 1993) reportaron valores limitantes para el desarrollo de raíces de 0,8 – 5,0 MPa.

Teniendo en cuenta las rotaciones de cultivos, se pudo observar que en la primera profundidad de 0 – 7 cm arrojaron valores de RMP que fluctuaron de 1,18 – 2,32 MPa sin diferencias significativas entre las rotaciones. Cabe comentar que la rotación que presentó la menor compactación en la primera profundidad fue la R4 dando valores promedios de 1,18 MPa que se consideran no restrictivos. En cambio, en la segunda profundidad de 7 – 20 cm, los resultados fueron mayores, en rangos de 6,32 – 7,78 sin diferencias significativas entre las rotaciones evaluadas a esta profundidad.

El coeficiente de variación fue de 34,16 – 35,64 para la primera y segunda profundidad respectivamente, siendo un valor alto pero común para este tipo de determinaciones por la gran variabilidad que presenta.

En la **Tabla 4** se presentan los valores obtenidos de RMP en condiciones de humedad halladas en el ensayo, de baja humedad (suelo seco), a capacidad de campo y a contenidos de humedad inferiores a capacidad de campo, como fue explicado en la descripción de las tareas desarrolladas.

Tabla 4: Resultados de RMP a diferentes contenidos de humedad en 8 parcelas seleccionadas al azar

PARCELA	MUESTRA	PROF	RMP	% HUMEDAD		RMP de suelo seco	%H ^o de suelo seco
4	1	00-07	0,44	12,78	Humedad inf. a capacidad de campo	2,18	3,92
4	1	07-20	0,99	12,83	Humedad inf. a capacidad de campo	9,45	4,01
4	1	20-30	0,69	SD			
4	2	00-07	0,40	15,42	Humedad a capacidad de campo	2,00	2,88
4	2	07-20	0,78	16,26	Humedad a capacidad de campo	12,72	3,74
4	2	20-30	0,74	SD			
6	1	00-07	0,45	13,22	Humedad inf. a capacidad de campo	4,87	4,87
6	1	07-20	0,82	12,29	Humedad inf. a capacidad de campo	5,51	5,51
6	1	20-30	0,77	SD			
6	2	00-07	0,73	17,47	Humedad a capacidad de campo	3,95	3,95
6	2	07-20	1,78	14,66	Humedad a capacidad de campo	3,24	3,24
6	2	20-30	2,52	SD			
9	1	00-07	0,56	14,38	Humedad inf. a capacidad de campo	1,09	4,55
9	1	07-20	1,04	14,00	Humedad inf. a capacidad de campo	3,09	6,23
9	1	20-30	0,85	SD			
9	2	00-07	0,61	18,43	Humedad a capacidad de campo	2,91	5,38
9	2	07-20	1,09	14,80	Humedad a capacidad de campo	9,08	5,39
9	2	20-30	0,52	SD			
11	1	00-07	0,61	13,36	Humedad inf. a capacidad de campo	2,73	4,38
11	1	07-20	1,04	13,49	Humedad inf. a capacidad de campo	8,54	3,46
11	1	20-30	0,70	SD			
11	2	00-07	0,50	14,48	Humedad a capacidad de campo	2,18	3,80
11	2	07-20	1,02	13,66	Humedad a capacidad de campo	9,63	5,30
11	2	20-30	0,82	SD			
12	1	00-07	0,18	14,15	Humedad inf. a capacidad de campo	1,82	5,68
12	1	07-20	0,58	12,50	Humedad inf. a capacidad de campo	10,72	5,33
12	1	20-30	0,58	SD			
12	2	00-07	0,78	15,82	Humedad a capacidad de campo	3,82	4,49
12	2	07-20	2,16	14,75	Humedad a capacidad de campo	9,99	6,73
12	2	20-30	1,31	SD			
14	1	00-07	0,34	14,51	Humedad inf. a capacidad de campo	1,45	4,12
14	1	07-20	1,00	13,10	Humedad inf. a capacidad de campo	6,18	3,52
14	1	20-30	0,80	SD			
14	2	00-07	0,73	15,06	Humedad a capacidad de campo	2,18	3,81
14	2	07-20	1,08	13,93	Humedad a capacidad de campo	7,27	5,79
14	2	20-30	0,72	SD			
19	1	00-07	0,55	13,48	Humedad inf. a capacidad de campo	2,00	4,23
19	1	07-20	1,03	13,84	Humedad inf. a capacidad de campo	6,18	3,26
19	1	20-30	0,62	SD			
19	2	00-07	0,61	14,93	Humedad a capacidad de campo	1,27	4,66
19	2	07-20	1,04	14,93	Humedad a capacidad de campo	5,45	6,43
19	2	20-30	0,74	SD			
21	1	00-07	0,49	15,45	Humedad inf. a capacidad de campo	2,36	3,51
21	1	07-20	1,29	15,29	Humedad inf. a capacidad de campo	8,72	3,16
21	1	20-30	1,00	SD			
21	2	00-07	0,67	16,82	Humedad a capacidad de campo	3,09	4,91
21	2	07-20	1,43	16,93	Humedad a capacidad de campo	9,63	6,03
21	2	20-30	0,77	SD			

Referencias: SD (sin datos).

Con los valores de RMP que se obtuvo en las 8 parcelas en condición de suelos con baja humedad inferiores a 6,4% y los resultados medidos en condición de humedad en las parcelas seleccionadas, se realizó un análisis de regresión para definir el efecto del contenido de humedad que explica el comportamiento de esta variable. La RMP del suelo fue inversamente proporcional a los contenidos de humedad. La RMP aumentó en condiciones reducidas de humedad a diferentes profundidades, situación resultante en las 48 parcelas evaluadas con dos repeticiones, disminuyendo en capacidad de campo y en condiciones intermedias de humedad (**Figuras. 8 y 9**).

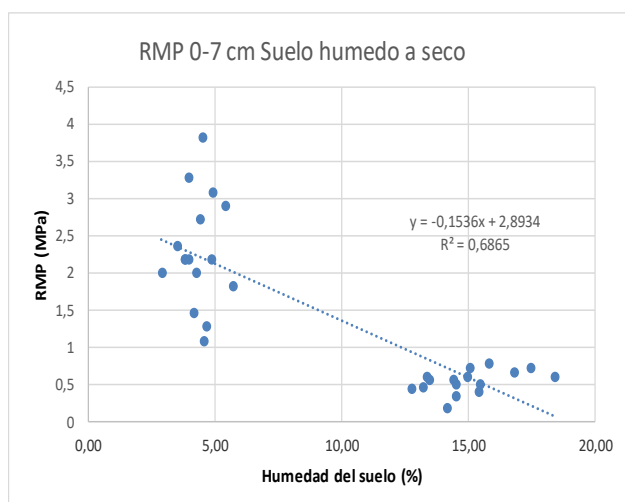


Fig. N°8: RMP en la primera profundidad.

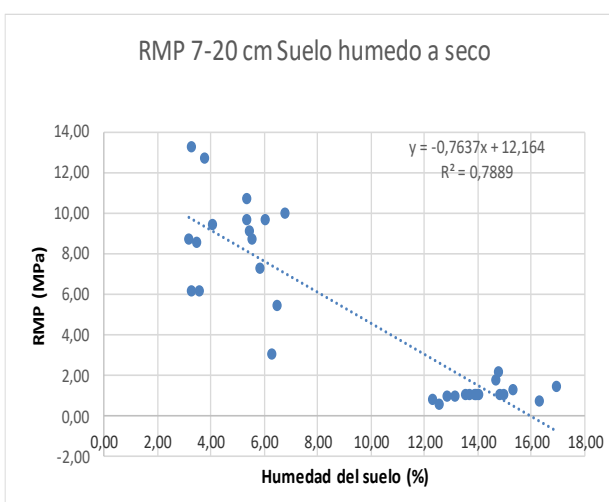


Fig. N°9: RMP en la segunda profundidad.

En **Fig.8** (izquierda), se puede observar que el análisis arrojó un valor de R^2 de 0,687 indicando que el 68% del incremento en la compactación del suelo medida por la resistencia mecánica a la penetración (RMP) fue explicado por la variación del contenido de humedad a la primera profundidad (0 – 7cm).

En la segunda figura (derecha), la relación fue similar, pero arrojó un valor de R^2 de 0,789 reflejando que el aumento en la RMP a la segunda profundidad (7 – 20cm) fue explicado en un 78% por el contenido de humedad.

Si bien se determinó la RMP en condiciones de máxima retención de humedad del suelo, y con suelos de baja humedad en todo el ensayo (menores de 6.4%) hubiesen sido necesarios datos de RMP y de humedad del suelo dentro del rango intermedio comprendido entre valores de 6,45 y 12% de humedad.

La condición ideal para la corrección de las determinaciones de RPM hubiese sido realizar evaluaciones con contenidos de humedad, para este tipo de textura del suelo, entre los valores mencionados pero la escasa cantidad de anillos de infiltración y la necesidad de ir al ensayo, al menos 3 o 4 veces para llenar los anillos de agua y así arribar a CC, e ir instalando anillos en una elevada cantidad de parcelas, resulta costoso pues luego hay que regresar para hacer las determinaciones a campo para ambas profundidades (de 0-7 y de 7 a 20 cm). Dichos datos hubiesen resultado necesarios para lograr corregir y comparar las determinaciones evaluadas en las condiciones de suelos secos halladas en el campo a posteriori del incendio.

Para reflejar los datos que se obtuvieron en un suelo con bajo contenido de humedad y en humedad a capacidad de campo en la **Figura 10**, se muestran dos fajas donde se registraron los golpes necesarios del pilón del penetrómetro para llegar a las distintas profundidades de estudio, en la faja “A” con el suelo seco para llegar de 0 – 7 cm de profundidad donde se necesitaron 10 golpes mientras que para pasar de 7 – 20 cm se necesitaron 58 golpes, totalizando 68 golpes para ir de 0 – 20 cm de profundidad. En la faja “B” con el suelo a capacidad de campo se necesitaron 1 golpes de 0 -7 cm, 3 golpes para pasar de 7 – 20 cm y 3 golpes más para ir de 20 – 30 cm, totalizando 7 golpes para llegar de 0 – 30 cm.



Figura 10. A: faja de RMP con suelo seco. B: con un suelo en condición de capacidad de campo.

En forma simultánea a la determinación de RMP en un trabajo paralelo se evaluó la densidad aparente del suelo en ambas profundidades encontrando que en la primera profundidad se halló una menor densidad aparente y mejor condición del suelo para su funcionamiento en SD con valores de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ que bajo LC y LR, que presentaron valores de $1,59$ y $1,58 \text{ g cm}^{-3}$ respectivamente, significativos a un nivel de probabilidad $P < 0,0255$ (Dalurzo et al., 2023) lo cual no pudo lograrse con la RMP al no poder ajustarse los resultados por humedad.

La RMP, antes de los incendios fluctuaron dentro de valores muy bajos en los SL de 0-7cm de 0,19 a 0,23 MPa sin diferencias significativas. La misma fue mayor en LC de 7-20 cm a 20-30 cm que varió de 1,7 a 1,33 MPa (Dalurzo et al., 2023).

Luego del incendio y con humedad del suelo muy bajas los valores de RMP variaron de 0-7 cm de 1,98 a 2,25 y de 7 a 20 cm de 6,56 a 7,64 MPa.

6. COMENTARIOS FINALES:

Con el presente trabajo se logró adquirir la suficiente capacitación para la determinación de resistencia mecánica a la penetración del suelo.

Cuando las determinaciones de Resistencia Mecánica a la penetración del suelo se realizan en condiciones de humedad a capacidad de campo, luego de transcurridos 24 a 48 hs de haber logrado la saturación del espesor considerado, los resultados son comparables y pueden definirse diferencias entre tratamientos que se estén evaluando.

Dado que las determinaciones realizadas en este trabajo se realizaron en condiciones de suelos muy secos, las mediciones efectuadas en condiciones de capacidad de campo y con suelo de humedad cercanos a dicha constante de humedad, no cubrieron el intervalo de humedad necesario, y con un bajo número de repeticiones, fueron insuficientes para una corrección de los valores logrados a campo y lograr el segundo objetivo de brindar información de RMP en esta clase de suelo después de haber sufrido un incendio.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- ASAE. American Society of Agricultural Engineers. 1998. ASAE Standards 1998, 45th ed. Standards Engineering Practices Data. Soil Cone Penetrometer. ASAE S313.2 Dec. 94. St Joseph, MI; 820-821.
- Atwell, B. J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environmental and Experimental Botany* 33(1): 27-40.
- Badía, D., Martí, C. 2003. Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Research and Management* 17, 23-41.
- Bengough A. G., Campbell, D. J.; M. F. O'Sullivan, 2001. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In SMITH, K. A.; MULLINS C. E. (eds.). *Soil and Environmental Analysis. Physical Methods*. 2nd Ed. New York. pp. 377-403.
- Bradford, J.M. 1986. Penetrability. p. 468-471. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Dalurzo, H.C., P.G. Caballero, C.A. Szymitowski, V.B. Diaz, F.A Paredes. L Gnoatto. N.I Stahringer. M Sánchez Petris. G.A Dellamea. 2023. Variables de suelo bajo efecto de incendios en un Argiudol de Corrientes. *Comunicaciones Científicas, Técnicas y de Extensión de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNNE)*.
- Denoia, J., Sosa, O., Zerpa G. y B. Martín, 2000. Efecto del pisoteo animal sobre la velocidad de infiltración y sobre otras propiedades físicas del suelo. *Pastos XXX* (1): 129-141.
- Di Rienzo JA, F Casanoves, MG Balzarini, L Gonzalez, M Tablada. 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http>
- Domínguez, GF, GA Studdert & HE Echeverría. 2005. Propiedades del suelo: efectos de las prácticas de manejo. En: García, FO & HE Echeverría (eds) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Pp. 207-229. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.

- Domínguez, GF, NV Diovisalvi, GA Studdert & MG Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the Southeastern Pampas. *Soil Till. Res.* 102(1): 93-100.
- Duval ME, JA Galantini, JO Iglesias, S Canelo, JM Martínez & L Wall. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Till. Res.* 131(1): 11-19.
- Escobar, E. H., H. D. Ligier, R. Melgar, H. Matteio y O. Vallejos 1996. Mapa de Suelos de la Provincia de Corrientes 1:500.000. Ediciones INTA. EEA Corrientes. Argentina, 430 pp
- Fabrizzi KP, FO García, JL Costa & LI Picone. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81(1): 57-69.
- Ferreras LA, JL Costa, FO García & C Pecorari. 2000. Effect of no tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of southern «Pampa» of Argentina. *Soil Till. Res.* 54(1): 31-39.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66(2): 95-106.
- Fritton DD. 1990. A standard for interpreting soil penetrometer measurements. *Soil Science* 150: 542-550.
- Greacen, EL & R Sands. 1980. Compaction of forest soil. *Aust. J. Soil Res.* 18: 163-171.
- Herrick J.E., T.L. Jones 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration on resistance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1320–1324.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Plan de Gestión Integral del Riesgo Agropecuario de la Provincia de Corrientes Estrategia de Gestión Integral del Riesgo Agropecuario. Ministerio de la Producción. Año 2019. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/girsar - corrientes - _ppgira_ago19.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/girsar_-_corrientes_-_ppgira_ago19.pdf)
- Jorajuria Collazo, D. 2004. La resistencia a la penetración como parámetro mecánico del suelo. En: Filgueira, R. y Micucci, F. EDULP (eds.). Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría. 43-53.

- Klvac R., Vrana P., R. Jirousek 2010. Possibilities of using the portable falling weight deflectometer to measure the bearing capacity and compaction of forest soils. *Journal of Forest Science* (Prague) 56: 130-136.
- Kurtz, D.B., Asch, F., Giese, M., ...Goldfarb, M.C., Casco, J.F. 2016. High impact grazing as a management tool to optimize biomass growth in northern Argentinean grassland. *Ecological Indicators* This link, 63, pp. 100–109
- Lampurlanés, J., and C. Cantero-Martinez 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agron. J.* 95, 526–536.
- Minervini, MG, Morrás, HJM, & Taboada, MA. 2018. Efectos del fuego en la matriz del suelo: Consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas. *Ecología austral*, 28(1), 12-27.
- Panigatti, JL. 2010. Argentina 200 años, 200 suelos. Ed. INTA Buenos Aires. 345 pp. ISBN: N° 978-987-1623-85-3. Disponible en: <https://inta.gob.ar/documentos/argentina-200-anos-200-suelos>.
- Panigatti, J.L.; 2010. Argentina 200 años, 200 suelos. Ed. INTA Buenos Aires. P. 106. Ilustraciones y cuadros.
- Pires da Silva, A., Imhoff, S. y M. Corsi 2003. Evaluation of soil compaction in an irrigated short duration grazing system. *Soil & Tillage Research* 70(1): 83-90.
- Pla Sentís, I. & F. Ovalles. 1993. Efectos de los sistemas de labranza en la degradación y productividad de los suelos. FONAIAP. Pp 35.
- Sosa O., Martín B., Zerpa G., y R. Lavado 1995. Acción del pisoteo de la hacienda sobre el suelo y la vegetación: Influencia de la altura del tapiz. *Revista Argentina de Producción Animal* 15(1): 252-255.
- Vanags, C. P., B. Minasny, and A. B. Mc Bratney 2004. The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance *In* Supersoil 2004: Program and Abstracts for the 3rd Australian New Zealand Soils Conference, University of Sydney, Australia, 5-9 December 2004. 8 p