

Conservación de suelos mediante la modificación de la frecuencia de labranza: un caso en Costa Rica

Soil Conservation by Changing the Frequency of Tillage: A Case in Costa Rica

Natalia Gómez-Calderón¹, Raciél Javier Estrada-León²

[Recibido: 16 de julio 2019, Aceptado: 27 de setiembre 2019, Corregido: 10 de octubre 2019, Publicado: 1 de enero 2020]

Resumen

[Introducción]: En Costa Rica, los productores hortícolas labran el suelo cada seis meses, usando sistemas convencionales que pulverizan la capa arable y provocan degradación. **[Objetivo]:** Se evaluó el efecto de diferentes tipos de labranza con el fin de recomendar variaciones en la gestión de la mecanización de suelos. **[Metodología]:** Se establecieron tratamientos de labranza cero (T1), convencional (T2) y reducida (T3) en un suelo franco-arenoso (Fa). Se determinó el contenido de materia orgánica (MO), densidad aparente (Da), conductividad hidráulica (k), resistencia a la penetración (RP) y retención de humedad (RH), antes de cada tratamiento (T0) y después de seis meses. También, se midieron variables de operación del tractor usado. **[Resultados]:** Se determinó la necesidad de lastrar el tractor para rotar el suelo y tener mejor eficiencia, debido al derrape del eje delantero en T2 (-34.81 %). T2 mostró aumentos de MO ($p < 0.05$), por efecto a corto plazo del corte superficial de la cobertura vegetal y Da aumentó ($p < 0.05$) a los 30-45 cm en T1, debido a que no hubo pase de arado de cincel. Ningún tratamiento cambió la condición de k moderada hasta los 30 cm de profundidad. T3, mejoró RP ($p < 0.05$) hasta esa misma profundidad debido al pase de arado de cincel. La RH no experimentó cambios ($p < 0.05$). **[Conclusiones]:** Por la ineficiencia de operación y a que no hay mejora física del suelo en el corto plazo, no es necesario labrar cada seis meses, lo que reduciría las tasas de erosión de la zona.

Palabras clave: degradación de suelos; labranza de conservación; maquinaria agrícola; propiedades físicas.

Abstract

[Introduction:] In Costa Rica, horticultural producers till the soil every six months, using conventional systems that pulverize the arable layer and cause degradation. **[Objectives:]** The effect of different types of tillage was evaluated to recommend variations in the management of soil mechanization. **[Methodology:]** Treatments based on zero (T1), conventional (T2), and reduced (T3) tillage were established in a loamy-sandy soil (Fa). The organic matter content (MO), apparent density (Da), hydraulic conductivity (k), penetration resistance (RP), and moisture retention (RH) were determined before each treatment (T0) and after six months. Also, operation variables of the used tractor were measured. **[Results:]** The need to ballast the tractor to rotate the ground and have better efficiency was identified due to the skid of the front axle at T2 (-34.81%). T2 showed increases in MO ($p < 0.05$) due to the short-term effect of the surface cut of the vegetation cover, and Da increased ($p < 0.05$) at 30-45 cm in T1 because there was no chisel plow pass. No treatment changed the condition of moderate k to 30 cm deep. T3 improved RP ($p < 0.05$) up to 30 cm deep due to the chisel plow pass. HR did not change ($p < 0.05$).

1 Escuela de Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. ngomez@itcr.ac.cr, <https://orcid.org/0000-0001-7961-7529>
2 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Calkiní en el Estado de Campeche, México. rjestrada@itescam.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-0987-9053>



[Conclusions:] Due to the inefficiency of operation, and because there is no physical improvement of the soil in the short term, it is not necessary to till every six months; this would reduce the erosion rates of the area.

Keywords: agricultural machinery; conservation tillage; physical properties; soil degradation.

1. Introducción

La actividad humana ejerce gran presión sobre la tierra, lo que exacerba los procesos de degradación de esta. Adoptar soluciones en el corto, mediano y largo plazo, son clave en la lucha contra el cambio climático (IPCC, 2019). Se han identificado las diez principales causas de degradación del suelo, siendo la erosión la primera en Latinoamérica, principalmente derivada de las labores agrícolas (FAO y ITPS, 2015). Afecta la calidad de infiltración y la capacidad de retención del agua, disponibilidad de nutrientes, contenido de materia orgánica, actividad biológica, profundidad efectiva del suelo y su productividad (Gómez-Calderón, Villagra-Mendoza y Solórzano-Quintana, 2018). Es fuente de sedimentos en las cuencas, contaminando los cuerpos de agua con residuos de agroquímicos, materia orgánica e impactando la capacidad de reservorios e hidráulica de los ríos (Gómez-Calderón, Solórzano-Quintana, y Villagra-Mendoza, 2017). Según Salem *et al.* (2015), hay disminuciones significativas en las tasas de erosión de suelo, donde la labranza reducida ha sido adaptada. En la región existe poca información que permita asociar la labranza mecanizada con las pérdidas de suelo; sin embargo, en las laderas se evidencia que la mecanización es una de las variables más importantes (Vignola, McDaniels, y Scholz, 2013). Se ha demostrado que la erosión por labranza es tan degradante como la erosión hídrica (Hillel, 1998; Horne y Hartge, 2016).

En la zona norte de Cartago, Costa Rica, el 77 % de los productores realizan la preparación del terreno intensivamente dos veces por año, usando formas de labranza convencionales con arados de discos, cincel, rotadores y azadas mecánicas (Gómez-Calderón *et al.*, 2018). Se ha cuantificado que las combinaciones de arados de cincel con rotador y azada mecánica (palín), superan las 60 ton/ha/año de suelo perdido, en pendientes del 15 % en suelos franco arenosos de la zona, excediendo las tasas permitidas de erosión establecidas entre 10-12 ton/ha/año (Gómez-Calderón *et al.*, 2017). Se estima que en Costa Rica, los sistemas de labranza son responsables del 28 % de la degradación de suelos de uso agrícola, por causa de tratamientos de labranza convencionales que pulverizan la capa arable (COMCURE, 2016). Sin embargo; las investigaciones disponibles sobre erosión por labranza en la zona norte de Cartago, coinciden en que existe un vacío en la determinación del tipo de labranza idóneo para esta zona de producción agrícola (Gómez-Calderón *et al.*, 2016; Gómez-Calderón, Villagra-Mendoza, y Rímolo-Donadio, 2015; Gómez-Calderón *et al.*, 2018; Mehuys *et al.*, 2009; Villalobos-Araya, Guzmán-Arias, y Zúñiga-Pereira, 2009).

Por lo anterior, es imperante conocer los efectos de la labranza y recomendar cambios que deberían implementarse en los sistemas utilizados de preparación de suelos, en función de las tasas de erosión y la modificación de las propiedades requeridas (COMCURE, 2016). Es común



evaluar las ventajas y las desventajas de los diferentes sistemas de labranza, refiriéndose a consideraciones de sus efectos sobre las propiedades físicas del suelo (Horne y Hartge, 2016; Lal, 2001; Lal y Shukla, 2005), y a su incidencia en la trabajabilidad del terreno (Alvarado, 2004; Arrazate-Oropeza, Gómez-Calderón *et al.*, 2016; Gómez-Calderón, 2016). Cuando se cambia de labranza convencional (corte y volteo) a la reducida (vertical) o de conservación, la distribución de tamaños de los poros del suelo se torna más homogénea y efectiva, el consumo de agua es más constante, alcanza mayores profundidades en el perfil durante el ciclo del cultivo, se logra mayor estabilidad de los agregados y se reduce la escorrentía (Horne y Hartge, 2016; Kroulík *et al.*, 2011).

El objetivo del estudio, es evaluar el efecto de diferentes tipos de labranza sobre las propiedades físicas de un suelo franco-arenoso en la zona norte de Cartago, con el fin de recomendar las variaciones necesarias en la gestión de las labores de mecanización para esta zona de Costa Rica, que permitan reducir la degradación por erosión, disminuyendo las tasas de pérdidas del suelo.

2. Metodología

El estudio fue realizado en una finca hortícola de Llano Grande, Cartago, Costa Rica. Está ubicada en 9.949° N; 83.953° O, a 2 200 m sobre el nivel del mar (**Figura 1**), con una pendiente predominante del 15 %. Acorde a la prueba de Bouyoucos, según el triángulo textural de (USDA, 2014), el suelo es de textura franco-arenosa (Fa) con una composición del 58.42 % de arena, 12.45 % de arcilla y 29.13 % de limo. De clase andisol, posee una estructura pobre, caracterizada como débil, según las pruebas de consistencia en el campo recomendadas por FAO (2009). En la finca, los suelos se preparan convencionalmente cada 6 meses, utilizando un pase de arado de cincel, uno rotador y surcado con tracción animal.



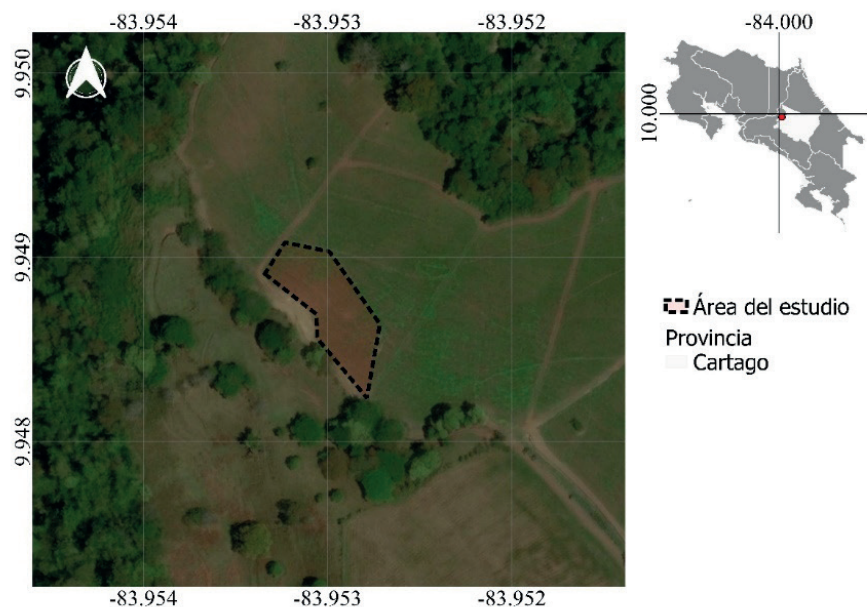


Figura 1. Ubicación del área en estudio.

Figure 1. Location of the area under study.

Se realizaron tres tratamientos, que corresponden a las combinaciones de implementos integrales comúnmente utilizados por los productores de hortalizas de la parte alta de la cuenca del río Reventazón, y los recomendados previamente en estudios de erosión por labranza en la zona por Gómez-Calderón *et al.* (2017); los cuales fueron:

- **T0:** corresponde a las condiciones iniciales del terreno antes de hacer las mecanizaciones.
- **T1:** tratamiento cero labranza.
- **T2:** tratamiento con un pase de arado de cincel + un pase de arado rotador, lo que corresponde a labranza convencional.
- **T3:** tratamiento con un pase de arado de cincel, es decir, labranza vertical reducida o mínima.

Entre los datos obtenidos del tratamiento T0 y los T1, T2 y T3, hubo seis meses de diferencia. En todos los casos se determinaron las propiedades físicas del suelo a las profundidades del perfil de 0-15, 15-30 y 30-45 cm. Se establecieron 9 parcelas experimentales de 10 m x 10 m, en un diseño de bloques al azar. Se realizaron los tratamientos T1, T2 y T3, para los cuales también se determinaron las condiciones operativas de la maquinaria.



En el **Cuadro 1**, se muestra el resumen de las condiciones de operación utilizadas. Todos los tratamientos se realizaron con los mismos implementos y un tractor agrícola SAME Explorer II, sin contrapesos adicionales, de 60 kW nominal, a la velocidad de operación recomendadas por los fabricantes de los aperos. En todos los pases, fue operado a 1 500 rpm del motor, doble tracción activada. Los implementos utilizados son de tipo suspendidos a los tres puntos del sistema hidráulico del tractor. También, se determinó el porcentaje de patinaje en ambos ejes del tractor para cada uno de los pases, contabilizando las rotaciones completas de cada neumático y la distancia lineal recorrida por la rueda (circunferencia). A partir de estos datos, se verificó la velocidad de avance de los equipos. Con estacas a lo largo de los pases de los implementos, se determinó la profundidad de cada labranza realizada.

Cuadro 1. Condiciones de operación de los implementos utilizados en la labranza mecanizada.

Table 1. Operating conditions of the implements used in mechanized tillage.

Implemento utilizado en el tratamiento	Profundidad de labranza promedio y desviación estándar (m)	Velocidad promedio y desviación estándar de operación (km/h)
Arado de cincel	0.59 ± 0.07	11.13 ± 1.05
Arado rotador	0.19 ± 0.03	6.18 ± 0.95

Las variables estudiadas fueron: contenido de materia orgánica (MO), densidad aparente (Da), conductividad hidráulica (k) y retención de humedad (RH) a partir de muestras inalteradas de suelo de 25 cm³ para cada prueba, y resistencia a la penetración (RP), cuyas mediciones fueron tomadas en campo antes de los tratamientos (T0), y 6 meses después de cada mecanización (T1, T2 y T3), a profundidades de 0-15, 15-30 y 30-45 cm en tres puntos diferentes de cada parcela.

La MO se obtuvo por el método de ignición a 450 °C. Previamente, se conoció el peso de la muestra secada a 105 °C por 48 horas, por lo que el contenido orgánico se expresó como un porcentaje del peso del suelo calcinado a 450 °C y a 105 °C. Da se obtuvo con base en la relación del peso del suelo de la muestra secado a 105 °C por 24 horas, sobre el volumen del cilindro; considerando el criterio de FAO (2009), que indica que los suelos con una densidad aparente menor a 1.3 g/cm³ son porosos y de buenas condiciones para el desarrollo radicular. Para determinar k, se utilizó el método de carga constante aplicando la Ley de Darcy en muestras saturadas de agua, y se clasificó de acuerdo con los criterios de FAO (2009). Las curvas de RH se generaron a partir de métodos gravimétricos, conociendo los pesos de las muestras sometidas a presiones de 0.1 – 0.2 – 1 – 3 – 5 y 15 Bar en platos de succión. RP fue determinada en el campo por medio del índice de cono con un *penetrologer* Eijkelkamp, cono 2. Por otro lado, con la veleta 2, las mediciones realizadas no detectaron la resistencia al corte del suelo.

Para conocer el costo de cada tratamiento de labranza, se midió el ancho de trabajo de cada implemento y se determinó el tiempo en el que abarca una hectárea de extensión con base en las velocidades de trabajo. Se estableció un costo de US\$ 15 por hora de trabajo, según las tarifas vigentes entre los proveedores de servicios de maquinaria de la zona.



Para el análisis estadístico de los datos obtenidos, utilizando un diseño factorial 4x3, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), mediante el programa RStudio (2018) versión 3.5.0, con el fin de determinar el efecto del tipo de labranza, sobre las variables dependientes. La comparación de las medias se realizó mediante la prueba de Tukey con un 95 % de confianza, También, se compararon los datos de las propiedades físicas y mecánicas del suelo con los costos y los tiempos de mecanización y patinaje de la maquinaria, con lo que se generó recomendaciones de los tipos de labranza que mantengan un balance entre los costos y el trato adecuado de la maquinaria y el suelo. El modelo lineal utilizado se describe en la **Ecuación 1**.

$$y = \mu + T_i + P_j + TP_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{E.1})$$

Donde:

Y= variable dependiente (Da, k, MO, RP)

T_i = Efecto el i-ésimo tratamiento (T0, T1, T2, T3)

P_j = Efecto de la j-ésima profundidad (15, 30, 45 cm)

TP_{ij} = Interacción $T_i \times P_j$

ε_{ijk} = Efecto del error aleatorio.

3. Resultados

3.1 Patinaje del tractor con cada implemento

La comparación del patinaje durante la operación se muestra en el **Cuadro 2**. Durante las pruebas, el suelo contenía 23 % de humedad gravimétrica (rango friable). Cuando el tractor operó el arado de cincel, el patinaje no excedió el 15 %, por lo que las condiciones de mecanización fueron adecuadas. Por el contrario, el patinaje no fue adecuado en el eje delantero del tractor cuando se mecanizó el suelo con el arado rotador, debido a que este trabajó superficialmente, la capa arable y la resistencia al corte fue muy baja (indetectable por el instrumento).

Cuadro 2. Resumen de los promedios y las desviaciones estándar de la profundidad de labranza y la velocidad de operación y porcentajes de patinaje obtenidos para cada implemento utilizado.

Table 2. Summary of averages and standard deviations of tillage depth and operating speed and skating percentages obtained for each implement used.

Implemento utilizado en el tratamiento	Profundidad de labranza (m)*	Velocidad de operación (km/h)*	Patinaje eje delantero (%)	Patinaje eje trasero (%)
Arado de cincel	0.59 ± 0.07	11.13 ± 1.05	7.42	6.06
Rotador	0.19 ± 0.03	6.18 ± 0.95	-34.81	8.66

*Promedio y desviación estándar



3.2 Materia orgánica, densidad aparente, conductividad hidráulica y resistencia a la penetración

Los resultados del ANOVA, mostraron efectos estadísticamente significativos ($p < 0.05$) de tratamiento sobre las variables MO, Da, k y RP. En el **Cuadro 3**, se muestra como después de seis meses de haber realizado los tratamientos de mecanización del suelo, MO aumentó significativamente ($p < 0.05$) a profundidades 0-15, 15-30 y 30-45 solo para T2 con respecto a T0. No hubo efecto de interacción entre los tratamientos por la profundidad de los muestreos, excepto en el T2 a 0-15 cm (superficial). Los resultados de Da obtenidos, son congruentes con las características de suelos con propiedades ándicas y es clasificado como “muy suelto” bajo una condición porosa alta según FAO (2009).

Cuadro 3. Valores promedios y error estándar del contenido de MO, Da, k y RP en función del tipo de tratamiento y la profundidad en el perfil del suelo.

Table 3. Average values and standard error of the content of MO, Da, k and RP according to the type of treatment and the depth in the soil profile.

Tratamiento	Profundidad (cm)	% MO*	Da* (g/cm ³)	k* (cm/día)	RP* (MPa)
T0	0-15	0.83 ± 0.05 ^a	0.96 ± 0.06 ^a	53.27 ± 13.31 ^a	1.63 ± 0.22 ^b
	15-30	0.96 ± 0.06 ^a	0.92 ± 0.03 ^a	72.12 ± 7.08 ^a	1.78 ± 0.20 ^b
	30-45	0.96 ± 0.06 ^a	0.95 ± 0.02 ^a	51.13 ± 6.89 ^a	1.53 ± 0.33 ^b
T1	0-15	1.63 ± 0.25 ^{ab}	0.91 ± 0.03 ^a	160.16 ± 31.19 ^b	0.87 ± 0.22 ^a
	15-30	1.51 ± 0.14 ^{ab}	1.03 ± 0.03 ^a	147.38 ± 24.63 ^b	1.45 ± 0.22 ^b
	30-45	1.68 ± 0.15 ^{ab}	1.11 ± 0.05 ^b	30.93 ± 7.74 ^a	1.68 ± 0.24 ^b
T2	0-15	2.43 ± 0.28 ^c	0.89 ± 0.04 ^a	125.99 ± 5.01 ^b	1.12 ± 0.27 ^a
	15-30	2.09 ± 0.23 ^{bc}	0.98 ± 0.06 ^a	62.63 ± 5.82 ^a	1.49 ± 0.28 ^b
	30-45	2.24 ± 0.26 ^c	0.99 ± 0.06 ^a	28.82 ± 2.65 ^a	1.69 ± 0.16 ^b
T3	0-15	1.74 ± 0.12 ^{ab}	0.91 ± 0.05 ^a	486.36 ± 44.31 ^c	0.69 ± 0.10 ^a
	15-30	1.79 ± 0.08 ^{ab}	1.01 ± 0.02 ^a	92.78 ± 12.42 ^a	1.02 ± 0.25 ^a
	30-45	1.81 ± 0.09 ^{ab}	1.01 ± 0.04 ^a	40.55 ± 16.02 ^a	1.65 ± 0.16 ^b

*Para cada propiedad física, letras iguales no presentan diferencias estadísticamente significativas (95 % de confianza), según la prueba de Tukey.

Los resultados de k, estadísticamente variaron de forma superficial (0-15 cm) respecto a las condiciones iniciales, sin embargo solamente T3 cambio de clasificación según FAO (2009). A la profundidad de 15-30 cm, solamente el T1 tuvo diferencias con respecto a las condiciones iniciales del terreno, aunque todos los valores están dentro del rango de k moderada (FAO, 2009), por lo que edafológicamente no hay diferencias.



En cuanto a la resistencia, debido a la cantidad de arena, el suelo en estudio se clasifica como “ligeramente duro” cuando se verificó la consistencia en seco, “ligeramente adherente” y “ligeramente plástico”. Estas condiciones se deben a que hay poco contenido de partículas finas que permitan una adherencia efectiva por medio del agua en los microporos del suelo (Lal y Shukla, 2005; Reichert *et al.*, 2016). Las medidas se realizaron en el campo para cada tipo de mecanización con un contenido de humedad gravimétrica de 22 %, que corresponde a un rango friable del suelo.

3.3 Curvas de retención de la humedad para cada tratamiento

En el Cuadro 4, se muestran los contenidos de humedad a diferentes presiones de succión para cada tratamiento, entre los cuales no se detectaron diferencias significativas en la curva de retención de agua. El suelo mostró baja capacidad en este indicador, debido a la alta composición de arenas y baja densidad aparente. Su alta macroporosidad, beneficia el drenado, pero no la retención del agua en los microporos.

Cuadro 4. Medias ajustadas de retención de humedad gravimétrica en el perfil del suelo, según el tratamiento de labranza y profundidad analizada.

Table 4. Adjusted gravimetric moisture retention measures in the soil profile according to the tillage and depth treatment analyzed.

Tratamiento	Profundidad (cm)	0.1 Bar *	0.2 Bar *	1 Bar *	3 Bar *	5 Bar *	15 Bar *
T1	0-15	29.87	29.26	20.99	13.58	11.42	9.77
	15-30	28.85	28.25	24.25	15.26	15.45	9.77
	30-45	27.20	27.21	22.72	16.63	14.82	9.77
T2	0-15	32.17	30.34	20.21	15.29	13.47	9.77
	15-30	31.11	31.10	20.67	17.15	15.01	9.77
	30-45	30.97	30.01	19.97	17.16	15.49	9.77
T3	0-15	29.51	28.11	18.11	13.71	12.28	9.77
	15-30	29.53	29.17	22.34	15.46	13.36	9.77
	30-45	29.29	29.49	22.89	17.33	15.43	9.77

*Los valores no muestran diferencias significativas entre profundidades, ni tratamientos a la misma presión de succión, según prueba de Tukey con un 95 % de confianza.

3.4 Costos de las mecanizaciones realizadas

En el Cuadro 5, se muestra el costo económico de cada pase con los implementos utilizados en cada tratamiento. En la Figura 2, se observa el costo de las combinaciones para cada tratamiento. El costo de T2 es mayor, debido a que se realizaron dos pases de equipos.



Cuadro 5. Área de cobertura por unidad de tiempo y costo de la mecanización con cada implemento utilizado en los tratamientos de labranza.

Table 5. Coverage area per unit of time and cost of mechanization with each implement used in tillage treatments.

Implemento	Velocidad de avance promedio (km/h)	Ancho del implemento (m)	Indicador de tiempo y área cubierta (h/ha)	Total US\$/ha
Rotador	11.13	1.60	0.56	8.42
Cinzel	6.18	1.80	0.90	13.48

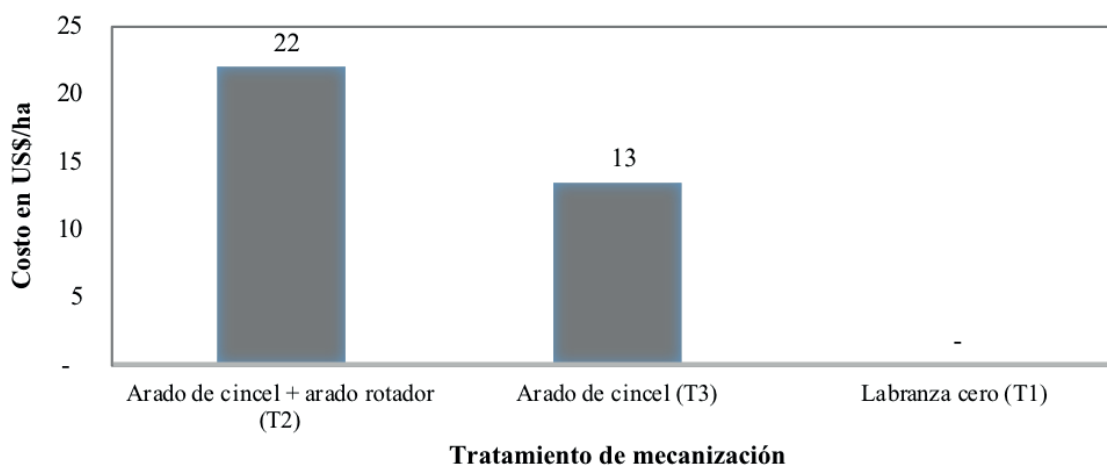


Figura 2. Costos totales de cada tratamiento de mecanización.

Figure 2. Total costs of each mechanization treatment.

4. Discusión

4.1 Patinaje del tractor con cada implemento

El efecto negativo que presentó el patinaje del tractor con el arado rotador, representó derrape de los neumáticos en el eje delantero, mientras que en el trasero opera en condiciones favorables de tracción, por lo que faltaron contrapesos delanteros cuando se utilizó el arado rotador. Las mecanizaciones se realizaron cercanas a las velocidades de avance recomendadas por los fabricantes, por lo que no se identifica la relación entre el patinaje y la velocidad de operación, pero si con el balanceo estático de los pesos del tractor en conjunto con el implemento de levante hidráulico. El implemento que se desempeñó mejor por eficiencia de operación fue el arado de cinzel. Resultados similares en cuanto patinaje en un suelo franco arenoso en la zona fueron expuestos por Arrazate-Oropeza, Gómez-Calderón, y Villagra-Mendoza (2016) y Gómez-Calderón, Solórzano-Quintana y Villagra-Mendoza (2017). Colocar contrapesos adicionales cuando



se opere el arado rotador, repercute en un mayor consumo de combustible de la máquina y compactación, por lo que sería una variable a considerar en futuros estudios.

4.2 Materia orgánica

La descomposición de la cobertura vegetal cortada con las cuchillas del arado rotador fue más acelerada, considerando que el promedio de profundidad de labranza del implemento fue de 19 cm, por lo que la acumulación de material orgánico superficialmente, fue mayor que en los otros tratamientos en los que solo se utilizó un implemento de labranza vertical. Para T2, el efecto de rayado hasta 0.5 m del arado de cincel, provocó un aumento de MO con respecto a T0, debido a que la cobertura cortada se depositó en los surcos dejados por el cincel. Asimismo, Para T1 y T3, las condiciones iniciales del terreno no variaron. Los tratamientos T1 y T3, mostraron aumentos de MO con la profundidad a pesar de no ser significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Con respecto a lo anterior, [Báez y Aguirre \(2011\)](#) indicaron que la labranza convencional reduce el contenido de MO. El uso intensivo de implementos de corte y volteo favorecen la incorporación de los residuos de cosecha o cobertura vegetal, y los expone a ciclos acelerados de descomposición. [Báez y Aguirre \(2011\)](#), observaron acumulaciones de MO entre 0 y 10 cm en el corto plazo. Sin embargo, mencionan que el efecto de la labranza en menos de 10 años en la dinámica del carbono (C), es complejo y variable, y que después de tres años consecutivos de cero labranzas, se promueve la recuperación sucesiva de MO. Por esta razón, el aumento observado de MO en T2, corresponde a un aumento notable a corto plazo, pero no será un proceso eficiente de secuestro de carbono en el suelo con el tiempo. Lo contrario ocurre con la labranza cero, con la que el secuestro de carbono es más eficiente a largo plazo, lo que causa el aumento sucesivo de MO disponible en la rizosfera ([Reichert et al., 2016](#)). Al respecto, [Quintero y Comerford \(2013\)](#), determinaron para un suelo andisol, que la labranza de conservación aumentó el contenido de C en el subsuelo en un 177 % con respecto a la convencional en 7 años, lo que también mejoró la capacidad de retención del agua.

4.3 Densidad aparente

Respecto a la densidad aparente (D_a), en seis meses no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$), entre tratamientos ni entre profundidades, excepto en T1 de 30 a 45 cm. A partir de las condiciones iniciales del suelo, la D_a experimentó un aumento del 14 %, diferencia que no se observa en los tratamientos T2 y T3, debido a que la profundidad de mecanización con el arado de cincel osciló entre los 0.5 y 0.6 m de profundidad en ambos casos. El implemento fue la única variable que afectó esa profundidad del perfil del suelo, por lo que el pase de arado de cincel cumple la labor de subsolado.

Diversos estudios señalan valores de D_a mayores en suelos bajo labranza cero con respecto a la convencional ([Castilla, 2013](#); [Gutiérrez-Rodríguez et al., 2012](#); [Kovalevski, García, Ferreras, Magra, y Besson, 2007](#)), o bien no han reportado diferencias significativas entre ambos tipos de tratamientos ([Kroulík et al., 2011](#); [Reichert et al., 2016](#); [Reynolds, Drury, Yang, y Tan, 2008](#); [Rivas, Velásquez, y Tenías, 2004](#)). También, [Báez y Aguirre \(2011\)](#), señalaron que el efecto



inconsistente de la labranza de suelos en el corto plazo en la Da, ha sido ampliamente reportada. El efecto de MO debe ser contemplado, porque altos contenido de MO reducen la Da en los suelos por el aumento de la porosidad total. Ben, Gallali, Ben, Jemai, y Ben-Hammouda (2012) encontraron incrementos de Da con la profundidad luego de 3 años de evaluar sistemas de labranza de conservación. Sin embargo, a los 7 años, Da disminuyó debido al incremento de la porosidad total por efecto de la actividad biológica. Estudios de siembra directa, reafirman que bajo sistemas de labranza cero, la Da tiende a aumentar, a diferencia de la porosidad total, por la mejora en la distribución e interconectividad de los poros (Castilla, 2013; Xue, Zhao, Dikgwatlhe, Chen y Zhang, 2013).

Sin embargo, en los estudios señalados no se indicó el efecto de la profundidad de trabajo del implemento utilizado. Tal y como se demostró, en los resultados obtenidos para esta variable, la única diferencia fue la afectación que produjo la profundidad de labranza con el arado de cincel en T1.

4.4 Conductividad hidráulica

Para cada tratamiento, la tendencia de la media para la conductividad hidráulica disminuyó con la profundidad, hasta valores moderadamente lentos a 30 - 45 cm, a la cual las diferencias no son significativas entre los tratamientos, ni con respecto a las condiciones iniciales del terreno. De 30-45 cm varió de moderada a moderadamente lenta después de seis meses, sin que afectara el pase de arado de cincel en T2 y T3. Por esta razón, se descartó que el tipo de tratamiento tuviera alguna influencia (a corto plazo) en la conductividad hidráulica del suelo Fa en el presente estudio.

De manera similar, para un suelo andisol, Ceballos, Hernández, y Vélez (2010), tampoco reportaron diferencias a través del tiempo de k, Da, ni porosidad total entre labranza convencional y reducida. Por el contrario, en suelos de textura franca, Báez y Aguirre (2011) determinaron diferencias significativas entre ambos tipos de labranza, siendo la mayor k para la de conservación. Sin embargo, ninguno de los estudios reportó las profundidades de trabajo de los implementos utilizados en el establecimiento de los experimentos. Álvarez, Mart, y Aires (2006), compararon sistemas de siembra directa y de labranza reducida para distintos tipos de suelo, donde encontraron que la infiltración del agua aumentó un 40 % en suelos con sistemas de siembra directa después de varios años.

4.5 Resistencia a la penetración

Antes de los tratamientos de mecanización, no se mostraron diferencias significativas de RP en relación a la profundidad ($p > 0.05$), pero excedieron de 1.5 MPa. En todos los tratamientos se encontraron reducciones significativas de RP superficial (0-15 cm) con respecto al estado inicial, pero entre ellos no hubo variación; es decir, las condiciones se mejoraron debido a las labores culturales realizadas por el productor y no en función de la labranza. Las condiciones tampoco variaron entre los tratamientos aplicados de 15-30 cm y de 30-45 cm, excepto en el T3, que presenta valores de RP más bajos que los demás entre 15-30 cm.



Para el T2, el pase adicional de maquinaria mecanizando con arado rotador hasta 0.19 cm en promedio, causó una diferencia de RP en T3 de 15-30 cm con respecto a T1 y T2, máxime que T3 solo tuvo un pase de cincel con respecto a T1. El arado de cincel se usa para descompactar el suelo y romper el piso (Alvarado, 2004; Bangita y Rao, 2012; Gómez-Calderón *et al.*, 2018), pero, entre 30-45 cm no hubo diferencias de RP con respecto a las condiciones iniciales ni entre tratamientos, por lo que no se justifica este tipo de mecanización en el corto plazo para el suelo Fa en estudio, aunque al aplicarlo solamente con un pase, si mejora las condiciones de resistencia de 0-30 cm de profundidad.

Al respecto, Álvarez *et al.* (2006) no encontraron variaciones de RP entre labranza convencional y reducida por debajo de los 15 cm, aunque sí encontraron aumentos con la profundidad. No reportaron relaciones de las diferencias de RP por efecto de la labranza, ni con los años, ni con la textura del suelo, ni con el rendimiento de la producción. De manera similar, Rivas *et al.* (2004), compararon siembra directa y tratamiento con cincel y rastra, para los que no encontraron que RP fuese significativa. Lal y Shukla (2005) indicaron la dificultad de relacionar RP debido a su comportamiento poco uniforme, lo que lo hace difícil de predecir.

Con respecto a la resistencia al corte (RC), las medidas realizadas no fueron detectables por el instrumento de veleta No. 2 utilizado en el campo, debido a que la resistencia friccional que ofreció el suelo a la fuerza tangencial al plano fue muy baja, en función de la poca cohesión (Hillel, 1998). Lo anterior se comprobó durante la operación de los equipos.

Debido a que los tratamientos en los que se utilizó el cincel (T2 y T3), no disminuyeron RP de 30-40 cm con respecto a las condiciones iniciales, no se considera necesario hacer un subsolado a corto plazo, es mejor dos veces al año como se realiza en las áreas de uso agrícola de la zona, lo que contribuye a disminuir costos de operación y pases maquinaria innecesarios sobre el suelo.

4.6 Retención de la humedad

Considerando que los productores de la zona hacen labranza de suelos dos veces al año, y con base en los resultados de retención de humedad, no es justificable hacer mecanizar cada seis meses, pues no influenció la mejora de la distribución de la porosidad, ni de la retención de humedad gravimétrica, que puede ser reflejada en bajas eficiencias en el uso de agua de riego del cultivo.

Ben *et al.* (2012), encontraron aumentos significativos de retención de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente en un suelo franco-arcilloso sometido a labranza cero con respecto a la convencional en los primeros 30 cm de profundidad. Detectaron un mejoramiento en la redistribución de poros y en la estructura comparada con un suelo Fa sometido a los mismos tratamientos. Por otro lado, en uno andisol Ceballos *et al.* (2010) no encontraron afectación en la macroporosidad, la mesoporosidad y la microporosidad entre métodos de labranza mínima o convencional a distintas profundidades evaluadas durante un año. Amezcua (1996), Ben *et al.* (2012) y Ceballos *et al.* (2010) consideraron que, en el corto plazo, el sistema de labranza no



altera fácilmente el porcentaje de microporos, por lo que la retención de humedad es consecuente entre tratamientos T1, T2 y T3 al no mostrar diferencias significativas en seis meses.

En cuanto al costo de los sistemas de mecanización, debido a que está directamente relacionado con el tiempo en el que abarque una extensión del área, entre mayor sea la velocidad de operación, mayor área será cubierta en menor tiempo.

5. Conclusiones

Para las condiciones del suelo franco arenoso evaluado, el uso del arado rotador requiere ajustar el balance de pesos del tractor por parte de los productores, con el fin de evitar gastos innecesarios de energía. El de cincel mostró condiciones adecuadas de operación en los tratamientos aplicados. El adicionamiento de contrapesos para disminuir patinaje con el arado rotador, ocasionaría mayor consumo de combustible y compactación, y debería ser considerado como una variable adicional en futuros estudios de labranza.

El arado rotador aceleró la descomposición de la materia orgánica superficialmente, pero el efecto de mejora en el tratamiento de labranza convencional es de corto plazo. Acorde a los resultados, la frecuencia de mecanización de dos veces al año, puede reducirse con el fin de aumentar la materia orgánica, lo que hace más eficiente el secuestro de carbono en el suelo y más retención de agua, reduciendo la escorrentía y por lo tanto la erosión.

Al no encontrarse diferencias en la densidad aparente entre la labranza convencional y la reducida, se considera que esta última es ventajosa porque menor número de pases de los equipos y consecuentemente un menor costo para el productor. La pobre estructura del suelo estudiado, causa que los tratamientos de mecanización no afecten la densidad aparente en el corto plazo.

Se recomienda utilizar la labranza reducida, la que permite un aumento significativo en la conductividad hidráulica en la superficie, promoviendo mejores condiciones de drenaje y menor escorrentía. Los tratamientos en los que se utilizó el arado de cincel (cincel + rotador y solamente cincel), no disminuyeron la resistencia a la penetración de 30-40 cm con respecto a las condiciones iniciales, por lo que no se considera necesario hacer un subsolado a corto plazo, dos veces al año.

Considerando los costos, a que no hay mejora física del suelo, ni de secuestro de carbono, y a que no hay diferencias significativas entre las curvas de retención con ninguno de los tratamientos en el corto plazo, no es necesario realizar la labranza de este tipo de suelo cada 6 meses. Se recomienda mecanizar el terreno cada dos ciclos de cultivo con un tratamiento reducido, por medio del uso del arado de cincel y surcar con tracción animal. Se deben realizar los análisis correspondientes para evaluar la frecuencia anual y determinar si es posible ampliar el intervalo de labranza cada 18 meses, lo que ayudaría a mermar la degradación del suelo en la zona norte de Cartago, Costa Rica.



6. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

7. Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, al equipo de investigación de erosión por labranza de la Escuela de Ingeniería Agrícola de la misma institución, especialmente a los investigadores Milton Solórzano-Quintana y Karolina Villagra-Mendoza. Adicionalmente, a las personas revisoras anónimas de la revista por sus aportes, los cuales enriquecieron el presente documento.

8. Referencias

- Alvarado, A. (2004). *Maquinaria y mecanización agrícola*. (S. Delome, Ed.) (Primera ed.). San José, Costa Rica: EUNED.
- Álvarez, R., Mart, S. y Aires, B. (2006). ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana? Recuperado de [http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/\\$webindex/ACDD9C4F17B4C5CE0325728E00689057/\\$file/Steinbach.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/$webindex/ACDD9C4F17B4C5CE0325728E00689057/$file/Steinbach.pdf)
- Amezquita, E. (1996). *Diseño y construcción de un microrelievímetro para evaluar la dinámica de la erosión en zonas de ladera*. Cali, Colombia.
- Arrazate-Oropeza, B., Gómez-Calderón, N. y Villagra-Mendoza, K. (2016). Comparación de patinaje bajo diferentes tipos de labranza de suelo. In *XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola* (p. 649). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Báez, M. y Aguirre, J. F. (2011). Efecto de la labranza de conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 113–121. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/573/57321257001.pdf>
- Bangita, B. y Rao, B. K. R. (2012). Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. *Geoderma*, 189–190, 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.07.002>
- Ben, S., Gallali, T., Ben, N., Jemai, I. and Ben-Hammouda, M. (2012). Impact of three and seven years of no-tillage on the soil water storage, in the plant root zone, under a dry sub-humid Tunisian climate. *Soil and Tillage Research*, 126, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.008>

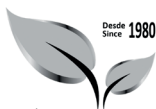


- Castilla, F. (2013). Siembra directa. La elegida para conservar el suelo: una decisión agronómica que combina rotación de cultivos, fertilizantes y agricultura de precisión para aumentar la producción y preservar los recursos naturales. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 39(2), 118–123.
- Ceballos, D., Hernández, O. and Vélez, J. (2010). Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas en un andisol del Departamento de Nariño. *Revista de Agronomía*, XXVII(1), 40–48. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5104154.pdf>
- COMCURE. (2016). Generalidades de la Cuenca del Río Reventazón - Parismina. Recuperado de <http://comcure.go.cr/la-cuenca/generalidades>
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*, 100. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-2015/resources/fao-publications/news-detail/es/c/263275/>
- FAO y ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Rome, Italy. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>
- Gómez-Calderón. (2016). *Fundamentos de maquinaria agrícola* (Primera ed.). San José, Costa Rica: EUNED.
- Gómez-Calderón, N., Solórzano-Quintana, M. y Villagra-Mendoza, K. (2017). *Cuantificación de la erosión hídrica en función de diferentes técnicas de mecanización para minimizar la contaminación del agua por sedimentos en la parte alta de la Cuenca del Río Reventazón*. RepositorioTEC. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9164>
- Gómez-Calderón, N., Solórzano-Quintana, M. y Villagra-Mendoza, K. (2016). *Cuantificación de la erosión hídrica en función de diferentes técnicas de mecanización para minimizar la contaminación del agua por sedimentos en la parte alta de la Cuenca del Río Reventazón*. Informe final. Cartago, Costa Rica.
- Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K. y Rímolo-Donadio, R. (2015). Estudio de factibilidad de desarrollo de un sistema de monitoreo aéreo de baja altura para la agricultura en el control de la erosión. VIE.
- Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K. y Solórzano-Quintana, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 170. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>
- Gutiérrez-Rodríguez, F., González-Huerta, A., Pérez-López, D. D. J., Franco-Mora, O., Morales-Rosales, E. J., Saldívar-Iglesias, P. y Martínez-Rueda, C. G. (2012). Compactación inducida por el rodaje de tractores agrícolas en un vertisol. Compaction Induced by Breaking of Agricultural Tractors in Vertisol. *Terra Latinoamericana*, 30(1), 1–7.



- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press; USA.
- Horne, R. y Hartge, K. H. (2016). *Essential Soil Physics*. (R. Horton, R. Horn, J. Bachmann, & S. Peth, Eds.) (First). Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers. Recuperado de www.schweizerbart.com/9783510652884
- IPCC. (2019). Climate Change and Land. Retrieved August 8, 2019, from <https://www.ipcc.ch/report/srccl/>
- Kovalevski, E., García, F., Ferreras, L., Magra, G. y Besson, P. (2007). Indicadores de calidad física en suelo de la Región Pampeana Norte De Argentina Bajo Siembra Directa. *CI Suelo*, 25(2), 159–172.
- Kroulík, M., Kvíz, Z., Kumhála, F., Hůla, J. y Loch, T. (2011). Procedures of soil farming allowing reduction of compaction. *Precision Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9206-1>
- Lal, R. (2001). Soil Degradation by Erosion. *Land Degradation and Development*, 12, 519–539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Lal, R. and Shukla, M. K. (2005). *Principles of Soil Physics*. (I. Marcel Dekker, Ed.). New York, USA: Taylor & Francis e-Library.
- Mehuys, G. R., Tiessen, K. H. D., Villatoro, M., Sancho, F. and Lobb, D. A. (2009). Erosión por labranza con arado de disco en suelos volcánicos de ladera en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 205–215.
- Quintero, M. and Comerford, N. B. (2013). Effects of Conservation Tillage on Total and Aggregated Soil Organic Carbon in the Andes. *Open Journal of Soil Science*, 03(08), 361–373. <https://doi.org/10.4236/ojss.2013.38042>
- Reichert, J. M., da Rosa, V. T., Vogelmann, E. S., da Rosa, D. P., Horn, R., Reinert, D. J. and Denardin, J. E. (2016). Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil and Tillage Research*, 158, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.010>
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M. y Tan, C. S. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146(3–4), 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017>
- Rivas, E., Velásquez, E. y Tenías, J. (2004). Efecto de sistemas de preparación de suelos sobre algunas propiedades físicas del suelo y biométricas en yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en Llanos Altos de Monagas. *Revista Científica UDO Agrícola*, 4(1), 36–41. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2221553.pdf>





- RStudio. (2018). R Studio. Boston, MA: The R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <http://www.rstudio.org/>
- Salem, H. M., Valero, C., Muñoz, M. Á., Rodríguez, M. G. y Silva, L. L. (2015). Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield. *Geoderma*, 237-238(Enero), 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.014>
- USDA. (2014). *Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report N.º 51. Version 2.0*. R. Burt and Soil Survey Staff.
- Vignola, R., McDaniels, T. L. and Scholz, R. W. (2013). Governance structures for ecosystem-based adaptation: Using policy-network analysis to identify key organizations for bridging information across scales and policy areas. *Environmental Science & Policy*, 31, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.03.004>
- Villalobos-Araya, M., Guzmán-Arias, I. y Zúñiga-Pereira, C. (2009). Evaluación de tres tipos de labranza en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*). *Tecnología En Marcha*, 22, 40–50. Recuperado de https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/115
- Xue, J., Zhao, X., Dikgwatlhe, S. B., Chen, F. and Zhang, H. (2013). Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecológica Sinica*, 33(19), 6006–6013. <https://doi.org/10.5846/stxb201305121021>

