Revisión documentada de la respuesta edáfica y productiva del maíz (*Zea mays* L.) a sistemas de labranza y tráfico vehicular

Documented review of the edaphic and productive response of maize (*Zea mays L.*) to tillage systems and vehicular traffic

Joan francisco Saltos Guerrero [1]
agp2017085@uea.edu.ec

Brando Slender Solórzano Cerna[1]
agp2017087@uea.edu.ec

Javier Domínguez Brito, Dr. PhD [2]
jdominguez@uea.edu.ec

[1] Estudiantes de la Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Tierra, Carrera de Ingeniería Agropecuaria

[2] Profesor Académico Titular Agregado 3

Resumen

En este artículo se presenta una revisión bibliográfica sobre trabajos relacionados con el efecto de sistema de labranza y tráfico vehicular sobre propiedades edáficas y productividad del cultivo de maíz. En la agricultura actual de muchos países se está incrementando la mecanización con tractores y máquinas cada vez más pesadas, trayendo consigo la afectación de las propiedades del suelo y por ende la reducción de la productividad de los cultivos. La investigación que se ha desarrollado es no experimental y se utilizó el método de investigación secundaria y la técnica de recolección con fuentes secundarias a través de literatura científica. Entre los principales resultados está la superioridad de la labranza cero sobre la labranza convencional destacándose por ser la de menor compactación superficial, mayor retención de agua, mayor capacidad portante y mayor desarrollo del sistema radicular para los cultivos agrícolas. Sin embargo, se demuestra que aún existen contradicciones entre los resultados de diferentes investigaciones relacionadas con los sistemas de labranza y el tráfico vehicular que son utilizados actualmente en la agricultura, siendo de vital importancia profundizar las investigaciones experimentales y de campo.

Palabras claves: densidad aparente, resistencia a la penetración, humedad, rendimiento agrícola.

Abstract

This article presents a bibliographic review of works related to the effect of the tillage system and vehicular traffic on edaphic properties and productivity of the corn crop. In the current agriculture of many countries, mechanization with tractors and increasingly heavy machines is increasing, bringing with it the affectation of soil properties and therefore the reduction of crop productivity. The research that has been developed is non-experimental and the secondary research method and the collection technique with secondary sources through scientific literature were used. Among the main results is the superiority of zero tillage over conventional tillage, standing out for being the one with less surface compaction, greater water retention, greater bearing capacity and greater development of the root system for agricultural crops. However, it is shown that there are still contradictions between the results of different investigations related to farming systems and vehicular traffic that are currently used in agriculture, being of vital importance to deepen the experimental and field investigations.

Keywords: apparent density, resistance to penetration, moisture, agricultural yield.

1. INTRODUCCIÓN

La labranza es una de las formas de preparación del suelo más antiguas y comunes que se aplica en casi todas las zonas agrícolas de cada país, y la investigación continúa sobre cómo afecta las propiedades del suelo y la producción de cultivos. Pueden mejorar el potencial de productividad de los cultivos en una variedad de sistemas y regiones, pero las prácticas de labranza también tienen consecuencias negativas que pueden reducir la productividad del suelo a largo plazo, incluida una mayor susceptibilidad a la erosión y disminución de la materia orgánica del suelo (Reicosky, 2015). Por lo tanto, una gran cantidad de literatura tiene como objetivo identificar cómo maximizar los beneficios de la labranza para la producción de cultivos y minimizar los inconvenientes del suelo a largo plazo.

En el año 1992 fue presentado, en el simposio sobre rizósfera en Minneapolis Estados Unidos, el trabajo de los investigadores Unger y Kasper, en esta revisión se expusieron los efectos adversos de los horizontes compactos del suelo sobre el crecimiento de las raíces de las plantas y el pobre crecimiento y rendimiento de los cultivos concomitantes se han reconocido durante muchos años. Catón el Viejo (234-149 a. C.) escribió que el primer principio de una buena agricultura es arar bien y el segundo principio es arar de

nuevo. Bowen (1981), fue más explícito cuando escribió que "un semillero suave con sus muchos poros bien aireados permite que las raíces crezcan sin obstáculos en todas y cada una de las direcciones y coloquen sus superficies absorbentes en contacto vital con los granos y la humedad del suelo. De esta manera, la nutrición de la semilla proporciona la máxima superficie de las raíces en el menor tiempo".

Los horizontes compactos que impiden el crecimiento de las raíces pueden ser capas naturalmente densas, o resultar de las fuerzas aplicadas al suelo por implementos o animales. Ejemplos de estos últimos son las capas compactadas resultantes del tráfico en la superficie del suelo o las bandejas de labranza que resultan del laboreo repetido realizada a la misma profundidad. Para aliviar estas condiciones adversas, desde finales del siglo XIX hasta mediados del siglo XX se llevaron a cabo muchos estudios que incluían prácticas como el arado profundo, el cincelado y la dinamita. Sin embargo, esos estudios a menudo arrojaron resultados inconsistentes y no concluyentes, porque las condiciones del suelo que causan los problemas y el entorno del suelo resultante del uso de las prácticas que alivian el problema no se midieron o no se comprendieron completamente (Unger y Kaspar, 1994).

En el mismo trabajo Unger y Kaspar (1994) se refieren que a fines de la década de 1940 y principios de la de 1950, se inició una investigación intensiva para comprender mejor la compactación del suelo y su disminución. Bowen (1981) atribuyó la intensificación de esta investigación a (I) el hallazgo de Veihmeyer y Hendrickson (1948) que demostraron de manera concluyente que los aumentos en la densidad aparente del suelo redujeron el crecimiento de las raíces incluso donde la aireación del suelo no debería haber sido un problema, (II) el énfasis de Lutz (1952) de que existían importantes lagunas en el conocimiento sobre la impedancia mecánica (compactación) y el crecimiento de las plantas, y (III) la revisión de Gill y Bolt (1955) de los estudios de presión sobre crecimiento de las raíces de Pfeffer (1893) que demostraron que las plantas pueden ejercer presiones de hasta 2500 kPa durante el crecimiento. En general, estos factores señalaron interrelaciones complejas entre la compactación del suelo, la densidad, la resistencia, el contenido de agua, la aireación, el crecimiento de las raíces y el crecimiento y rendimiento de las plantas.

El manejo continuo del suelo de la manera tradicional, ya sea de forma manual o mecanizada, ha promovido cambios profundos en las propiedades físicas, químicas y bilógicas del suelo, con efectos negativos en el rendimiento de los cultivos y en el

ambiente. Los argumentos para mantener prácticas de remoción del suelo para la siembra son variados. Se dice que la remoción del suelo es necesaria para controlar las malezas, permitir una mejor aireación del suelo, evitar la compactación y desarrollar un medio adecuado para el desarrollo de las raíces. Sin embargo, la constante remoción destruye los poros del suelo afectando el movimiento de agua, gases y nutrientes y además oxida la materia orgánica (MO) y reduce los contenidos de carbono orgánico (CO). (Boada y Espinosa, 2016)

Las condiciones, antes mencionadas, afectan el crecimiento saludable del cultivo ya que, al contrario de lo que se piensa, se reduce la disponibilidad y el transporte del agua, aire y nutrientes, la resiliencia del suelo a la degradación, compactación, erosión, sequía y otras condiciones de estrés (Craswell y Lefroy, 2001; Kanal y Kolli, 1996; Weil y Magdoff, 2004; Wingeyer et al., 2015; Winters et al., 1988). Según Boada y Espinosa, (2016), en Ecuador no existe información publicada sobre los efectos de la remoción en las propiedades del suelo, pero en el campo son evidentes las condiciones de degradación producidas por el constante movimiento de suelo para la siembra y el posterior control de malezas.

La producción de maíz siempre ha estado vinculada a la cultura del Ecuador, sin duda, es uno de los cultivos más extendidos en todo el país y a nivel mundial, pues se siembra en pequeñas extensiones para seguridad alimentaria y en grandes extensiones. Según Jaramillo (2017), en la provincia de Manabí, los agricultores siembran varios cultivos de ciclo corto preparando el suelo de forma tradicional pasando el arado de discos, dos pases de rastra y surcada para posteriormente sembrar, lo que está ocasionando una excesiva utilización de la maquinaria agrícola sin planificaciones ni labores de rotación y sin usar los sistemas de labranza de conservación, lo que trae como consecuencias que los suelos empiecen a perder su fertilidad propia, la perdida de rendimiento en los cultivos, los altos costos de producción y la compactación y degradación de los suelos.

Aunque el proceso de la erosión ha tenido lugar a lo largo de toda la historia de la agricultura, se ha intensificado considerablemente en la segunda mitad del siglo XX, fundamentalmente como consecuencia de un laboreo excesivo que deja el suelo desmenuzado, más susceptible al arrastre y sin ninguna protección frente a los agentes causantes de la erosión (las gotas de lluvia, el agua de escorrentía y el viento). La erosión en el Ecuador es uno de los problemas de degradación más serios, la que afecta aproximadamente al 50% de suelo cultivado. Alrededor del 15% de las tierras degradadas

se encuentran en el callejón interandino y sobre las vertientes que lo bordean. (Martínez et al, 2001). Por ejemplo, la erosión por labranza con el arado de discos, en un suelo negro (Carchi) con 30% de pendiente se estimó en 40 t ha^{-1} $año^{-1}$ (Plaster, 2000).

El sistema tradicional de labranza o labranza convencional (LC) utilizado por los pequeños productores de la Sierra se caracteriza por el uso intensivo del arado y rastra movidos por tractor o por bueyes o con herramientas manuales para remover el suelo con el objetivo de preparar la cama de siembra y para controlar malezas (Boada y Espinosa, 2017; Espinosa, José y Moreno, 2018).

Además, todas las labores de la LC eliminan la cobertura dejando expuesto el suelo al proceso erosivo que puede ser intenso en los lotes ubicados en pendientes inclinadas. Un estudio reciente publicado por Haro (2020) indica que, en general, las áreas con algún problema de erosión en la Sierra Norte se han incrementado en aproximadamente 251000 ha en el período entre 1984 y 2017 (16% de incremento). La presión sobre la tierra y el mal manejo del suelo durante los últimos años ha promovido un acelerado proceso erosivo que limita significativamente la producción agrícola en estas áreas del país.

El continuo movimiento del suelo destruye los poros y afecta el normal transporte de agua, gases y nutrientes y disminuye la biota benéfica del suelo. (Báez y Aguirre, 2011; Ekboir, 2001; Lal, Rattan, 2006; Lal, R, et al., 2007; Reicosky y Archer, 2005; Schalamuk et al., 2003).

Podemos resumir que uno de los problemas fundamentales es el desconocimiento y la falta de asesoramiento a los pequeños y grandes productores sobre el uso de la labranza mecanizada para cultivos de ciclo corto, como utilizarla y si es necesario aplicarla, ya que sin darse cuenta estarían afectando el recurso suelo, provocando compactación, la erosión por poca que sea la pendiente del suelo, el mal uso de los sistemas de labranza puede llegar a ser la causa del empobrecimiento del suelo agrícola, provocando el bajo rendimiento de los cultivos, mayores inversiones y menos ganancias a largo plazo.

Debido a la importancia que tiene el cultivo de maíz en el sector agrícola, es conveniente obtener información sobre cuál es el mejor sistema de labranza para realizar la siembra de maíz según los tipos de suelos que se presenten, esto permitirá a los productores tener una idea clara sobre la mejor manera de llevar a cabo un sistema de producción y conservación del recurso suelo. A su vez incentivará a la población agrícola a tomar mejores decisiones en el campo. Los resultados del presente documento aportarán al sector agrícola información coherente, precisa y válida sobre los efectos de los sistemas

de labranza y el tráfico resultante sobre las propiedades físicas del suelo y productivas del cultivo de maíz.

Teniendo en cuenta todo lo planteado anteriormente, el objetivo de este trabajo es analizar documentalmente los efectos de sistemas de labranza y tráfico vehicular sobre parámetros edáficos y productivos del cultivo de maíz (Zea mays L.).

2. METODOLOGÍA

2.1 Tipo de investigación

La investigación a desarrollar es no experimental porque se trabajará con variables e información de la literatura, relacionadas con los sistemas de labranza utilizados en la producción de maíz, el tráfico vehicular y su efecto sobre las propiedades edáficas del suelo y parámetros productivos del cultivo.

2.2 Método de investigación

Se utilizará el método de investigación secundaria y la técnica de recolección con fuentes secundarias donde se realizarán revisiones de la literatura científica, lo que permitirá recopilar información, que será analizada y sintetizada para darle cumplimiento a los objetivos de esta investigación, por lo que se trabajará con investigaciones científicas originales, relacionadas con los sistemas de labranza utilizados en la producción de maíz y su efecto sobre las propiedades edáficas del suelo y parámetros productivos del cultivo. Para obtener la información se consultarán las bases de datos científicas como Scopus, Scielo, Redalyc, Latindex, Google Académico, al igual la revisión de libros, tesis de doctorados, maestría y pregrado. También se recopilarán datos que reflejen los parámetros edáficos (densidad aparente, resistencia a la penetración e infiltración del agua) y productivos del cultivo de maíz (rendimiento agrícola)

En este estudio se utilizará un diseño de investigación exploratoria documental acerca del efecto de los sistemas de labranza y tráfico vehicular sobre las propiedades edáficas y productivas del cultivo de maíz.

La (Tabla 1) muestra los resultados de la búsqueda en Web of Science: la colección (realizada hasta el 16 de diciembre de 2021) de varios términos relacionados con sistemas de labranza y tráfico vehicular agrícola. Como se observa, la investigación sobre labranza y propiedades del suelo es la más extensa, con el 67% del total de los artículos. Abracando artículos que se remontan a finales del siglo XIX, cubriendo una gran cantidad de temas, que incluyen la respuesta de los cultivos, retención del agua, compactación del suelo a través de las variables resistencia a la penetración y densidad aparente entre otros.

Tabla 1.

Resultados de búsqueda en la Web of Science: Colección realizada hasta el 16 de diciembre de 2021.

Término de búsqueda	Aciertos	Revista
Sistemas de labranza	22	– *Revista Siembra* – *Sathiri*
Tráfico vehicular	9	– *Revista agropecuaria* – *Field Crops Research*
Propiedades del suelo	36	– *Soil Biology and Biochemistry* – *Soil Science Society of America Journal (2)*
Rendimiento del cultivo	16	– *Journal of soil and water conservation,* – *Soil and Tillage Research (8)* – *In Limitations to Plant Root Growth* – *Agrociencia Uruguay* – *Journal of soil and water conservation* – *Modifying the root environment to reduce crop stress (USA)* – *Agronomy Journal (8)* – *Terra Latinoamericana (4)* – *Soil Science Society of America* – *CIMMYT PROCIANDINO (2)* – *La Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo y del Instituto de Edafología* – *Ciencia Rural* – FAO (5) – *Soil Science* – *Plant and soil* – *Journal of Political Economy* – *American Economic Review* – Food & Agriculture Org – *No-Till Farming Systems. Special Publication* – *Applied and Environmental Soil Science* – *Revista Mexicana Ciencias Agricolas* – *Australian Journal of Croup Science (2)* – *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* – *Investigación agrícola tropical* – *Revista Brasileña de Ciencias del Suelo* – *Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental* – *Acta Zool, Mex* – *RUMIPAMBA* – *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (2)*
	83	35

( ) Números entre paréntesis significa las veces que se repite la revista

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Densidad aparente

Los resultados que se muestran en la (Tabla 2), son promedios que se obtuvieron de 10 observaciones por cada tratamiento. En los tratamientos con labranza en franjas y cero labranzas, se dejó de 60 a 70% de residuos sobre la superficie del suelo y en labranza tradicional los residuos se sacaron del terreno antes del laboreo; a esto se le atribuye el mayor contenido de humedad en los tratamientos con residuos después del laboreo (Bravo et al., 2000). Otros estudios realizados por Gutiérrez et al. (2001) indicaron que el análisis estadístico de esta variable manifestó diferencias significativas entre tratamientos de labranza, se observó un aumento de densidad aparente en el tratamiento de labranza cero a la profundidad de 0 a 15 cm comparado con labranza convencional, tanto al inicio como al final del ciclo del cultivo. Estos resultados coincidieron con los reportes de Cassel (1982), Bolaños (1989), Laffite (1989), Bravo y Andreu (1995), Sharrat (1996) y Secco et al. (1997), en donde mencionaron que hay una mayor densidad en los primeros 15 cm de profundidad, algunos cambios que se han reportado en la literatura varían con los tipos de suelo.

Tabla 2.

Densidad aparente y porcentaje de humedad en dos suelos antes y después del laboreo

Tratamiento	Suelo arcilloso				Suelo migajón arenoso			
	Humedad		Densidad aparente		Humedad		Densidad aparente	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
	%		g cm^{-3}		%		g cm^{-3}	
LTD	32.28	12.25 a	1.18	0.92 a	14.28	7.97 a	1.24	1.12 a
TLJ	29.99	15.96 a	1.07	0.96 a	14.28	5.58 a	1.26	1.12 a
LFC	33.03	21.19 b	1.09	1.01 b	16.64	12.43 b	1.23	1.14 a
LFA	32.32	17.80 b	1.04	0.98 b	14.18	11.41 b	1.24	1.16 a
LC	33.52	31.29 c	1.11	1.12 c	13.36	12.72 b	1.26	1.25 b

Fuente: Adaptado de (Bravo et al., 2000).

Tukey ($P<0.05$). tratamientos con distinta letra son diferentes. LTD = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción motriz con arado y rastra de discos). LTJ = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción animal con arado reversible japonés). LFC = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción motriz con arado de cincel). LFA = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción animal con arado combinado). LC = Labranza cero (sin movimiento del suelo).

En un estudio realizado por Bravo y Andreu (2011) sobre las propiedades físicas del suelo bajo dos sistemas de labranza, obtuvieron valores de densidad aparente por encima

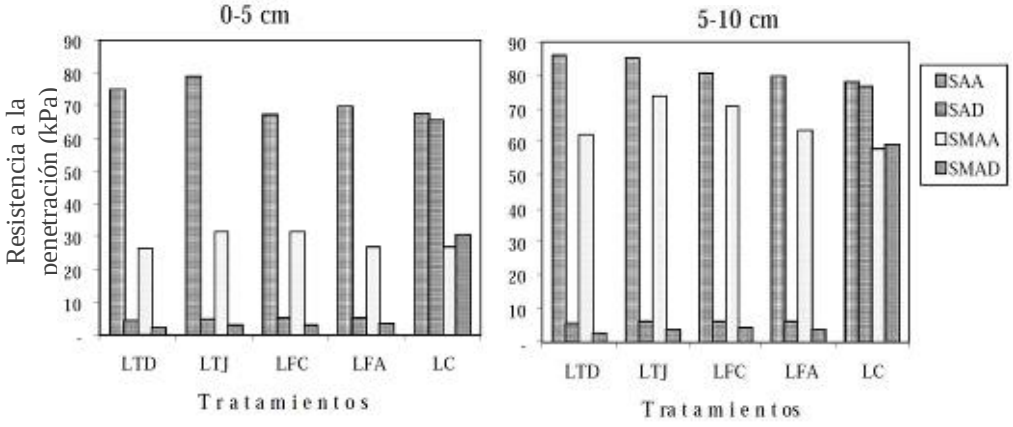
de 1.6 Mg m^{-3}, tanto para la labranza convencional como para la siembra directa, valor crítico para suelos franco arenosos, sugiriendo cierta susceptibilidad de estos suelos al proceso de compactación natural, debido a la baja cohesión de las partículas predominantes y quizás a la forma laminar de las mismas. También sugieren que, los altos valores de densidad aparente pueden estar influenciados por la presencia de un alto contenido de arena finas y limo en estos suelos.

3.2 Resistencia a la penetración

En la (Figura 1) se puede observar que la resistencia a la penetración antes de la labranza es mayor en ambos suelos y que después del laboreo del suelo, disminuyó considerablemente. En el sistema tradicional, donde se empleó el barbecho y el rastreo la resistencia disminuyó en la capa arable (10 cm) hasta 95% de su valor inicial. En el suelo arcilloso, la labranza en franjas disminuyó la resistencia del suelo hasta un 94% (en la parte donde se laboreó).

Figura 1:

Resistencia a la penetración en (kPa), 0 a 5 y de 5 a 10 cm de profundidad en dos suelos



Nota: Adoptado de "Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo y sobre la germinación y desarrollo del maíz y frijol" por Bravo et al., 2000, *Terra Latinoamericana. 18*(1)

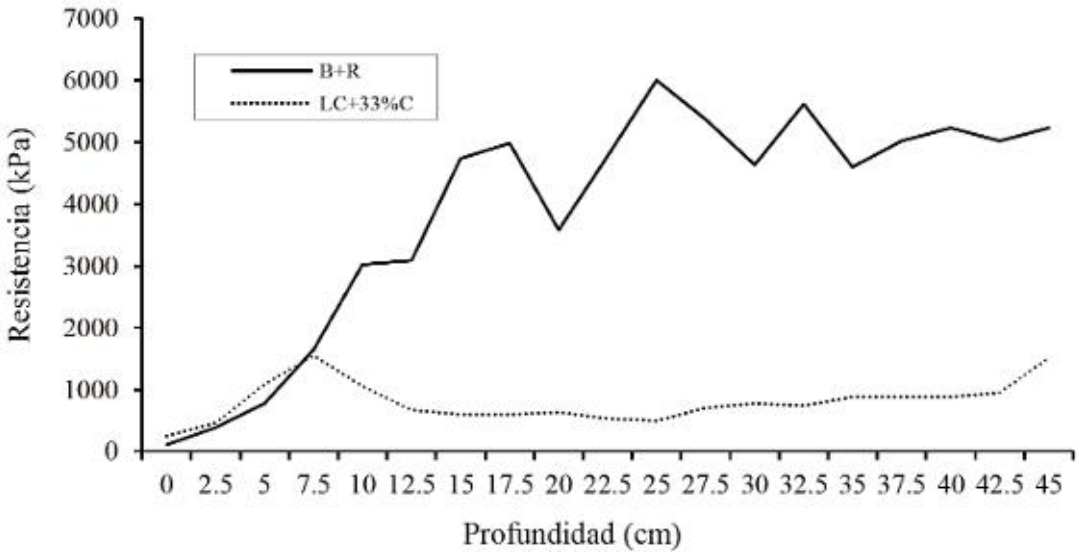
SAA = Suelo arcilloso antes del laboreo; SAD = Suelo arcilloso después del laboreo; SMAA = Suelo migajón arenoso antes del laboreo; SMAD = Suelo migajón arenoso después del laboreo; LTD = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción motriz con arado y rastra de discos); LTJ = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción animal con arado reversible japonés); LFC = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción motriz con arado de cincel); LFA = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción animal con arado combinado); LC = Labranza cero (sin movimiento del suelo).

En el suelo migajón arenoso, disminuyó 96% su resistencia a la penetración. Por otro lado, las pruebas de Turkey con P<0.05, indicaron que existe una diferencia significativa donde hay perturbación del suelo y donde se usa labranza cero. Existe diferencia en la resistencia al corte entre los dos tipos de suelos, presentando valores más altos que el suelo arcilloso que en el migajón arenoso en las dos profundidades (Bravo et al., 2000).

Estudios sobre la resistencia mecánica del suelo en diferentes tratamientos de labranza en cultivo de maíz, fueron realizados por Martínez-Gamiño et al. (2019) y se muestran en la (Figura 2).

Figura 2.

Resistencia mecánica del suelo con diferentes métodos de preparación al final del ciclo de cultivo con maíz de riego



Nota: Adaptado de "Impacto acumulado de la agricultura de conservación sobre las propiedades del suelo y rendimiento del maíz" (p 772), por Martínez-Gamiño, Osuna & Ramírez, 2019. *Revista Mexicana Ciencias Agricolas. 10*(4).

Los resultados mostraron que la compactación del suelo al final del ciclo del cultivo fue mayor en el tratamiento de barbecho + rastra (B + R), a 25 cm de profundidad, con 6000 kPa, mientras que la resistencia en el tratamiento labranza cero + 33% de cobertura (LC + 33% C) en ese mismo la profundidad fue de 491 kPa (Figura 2). Esto muestra el efecto negativo en la calidad del suelo cuando se realiza el barbecho y se pasa la rastra de discos como métodos de preparación del suelo para la siembra, ya que la estructura del suelo se destruye y, debido a la baja contenido de materia orgánica, las partículas se reorganizan de forma masiva y al secarse, compacta y endurece el perfil del suelo.

3.3 Tráfico en un lado de la hilera de plantas

En la (Tabla 3) se muestran los resultados obtenidos por Kaspar et al. (1991), ellos encontraron que el tráfico de ruedas redujo consistentemente el crecimiento de las raíces del maíz en los 30 cm superiores con tráfico en los entresurcos para los sistemas de labranza cero, labranza en caballón y sistema con arado cincel. La capa de 0 a 15 cm de entresurcos sin tráfico tenía tres veces más longitud de raíz que los entresurcos con tráfico. Otros investigadores también informaron reducciones en el crecimiento de las raíces del maíz en los entresurcos con tráfico de ruedas, pero el efecto no siempre fue consistente en todos los sistemas de labranza o suelos (Bauder et al., 1985; Chaudhary y Prihar, 1974; Hilfiker y Lowery, 1988).

Tabla 3.

Promedio de longitud de raíz a dos profundidades con y sin tráfico entresurcos en tres sistemas de labranza, en maíz con estadio de sexta hoja

		Longitud de raíces		
Labranza	**Profundidad**	**Sin trafico**	**Con trafico**	**Promedio**
	cm		km m^{-3}	
Cero labranza	0 – 15	4.32+	1.24	2.78
	15 – 30	2.39++	1.61	2.00
Labranza en caballón	0 – 15	3.60	1.50	2.55
	15 – 30	2.13	1.89	2.01
Arado cincel	0 – 15	3.73	1.07	2.40
	15 – 30	4.50	1.86	3.18

Fuente: Adoptado de (Kaspar et al., 1991).

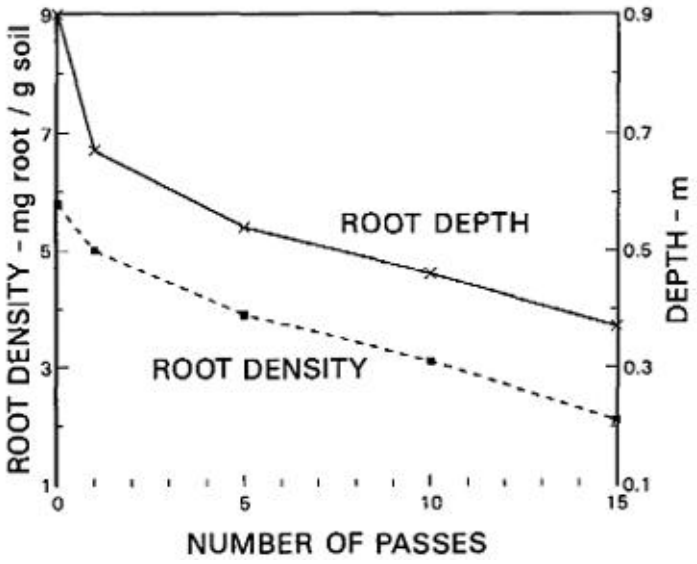
+ LSD (0.05) para la capa de 0 a 15 cm: Labranza (L) = no significativo; Entresurco (E) = 0.97; L x E = 1.69. ++ LSD (0.05) para la capa de 15 a 30 cm: Labranza (L) = no significativo; Entresurco (E) = 0.71; L x E = 1.23.

La compactación por tráfico de ruedas eclipsó cualquier efecto de labranza en los entresurcos con tráfico en el estudio realizado por Kaspar et al. (1991).

En un experimento con maíz, Raghavan et al. (1979), encontraron que la profundidad y la densidad de las raíces eran mayores en las parcelas sin tráfico y disminuían con el número de pasadas (Figura 3).

Figura 3.

Densidad de raíces de maíz en los 20 cm superiores del suelo y profundidad máxima de penetración de raíces para parcelas compactadas uniformemente de 0 a 15 pasadas de neumáticos con una presión de contacto de 62 k Pa.



Nota: Adaptado de "Relaciones tráfico-suelo-planta (maiz)" (p 188), por Raghavan et al., 1979, *Journal of terramechanics, 16*(4).

Por ejemplo, la densidad de raíces en los 20 cm superiores del suelo se redujo de 5.7 mg g^{-1} sin tráfico a menos de 2 mg g^{-1} con 15 pasadas de neumáticos de 62 kPa. La profundidad de enraizamiento disminuyó de 90 cm en las parcelas de control a 37 cm en las parcelas con 15 pasadas. De manera similar, Willatt (1986) observó que en cebada (*Hordeum vulgaris L.*) la densidad de longitud de las raíces en los 30 cm superiores del suelo y la profundidad de las raíces disminuyeron a medida que el número de pasadas de tractor aumentó de cero a seis.

Así mismo en la (Tabla 4) se muestran los valores de rendimiento en maíz con y sin tráfico obtenidos por Dominguez (2003), se puede observar de forma clara como el factor tráfico no tuvo una influencia significativa sobre el rendimiento en grano, pero sí es válido destacar que los subtratamientos con tráfico tuvieron rendimientos menores a los no traficados, en los tres tratamientos. La mayor diferencia se registró entre los subtratamientos de siembra directa (SD) y esta fue de un 10%, coincidiendo con las tendencias de la producción de raíces y de la compactación.

Tabla 4.

Rendimiento del cultivo de maíz, en subtratamientos con (ct) y sin tráfico (st).

Tratamiento	**Subtratamiento**	**Rendimiento**
AR	st	10,8 a
	ct	10,7 a
EC	st	10,9 a

	ct	10,5 a
SD	st	10,8 a
	ct	9,7 a

Fuente: (Domínguez, 2003).

3.4 Tráfico en ambos lados de la hilera de plantas

Considerando que los estudios anteriores compararon las intersecciones de tráfico y no tráfico en lados opuestos de una sola fila de plantas, Voorhees (1992) comparó las distribuciones de raíces de maíz y soja [Glycine max (L.) Merr.] cuando las hileras fueron traficadas o no por ambos lados. El tráfico de ruedas en ambos lados de una hilera aumentó el crecimiento total de las raíces de maíz en el perfil en un 24% en un sistema de labranza reducida (arado de cincel o disco) y disminuyó la longitud total en un 22% en un sistema de arado de vertedera. El tráfico de las ruedas redujo el porcentaje de la longitud total de la raíz del maíz en los 30 cm superiores en el sistema de labranza reducida y en la capa de 15 a 30 cm en el sistema de arado de vertedera. En comparación con el no tráfico, la longitud total de la raíz y el porcentaje de raíces de soja en los 30 cm superiores aumentaron en el sistema de arado de vertedera y disminuyeron en el sistema de labranza reducida.

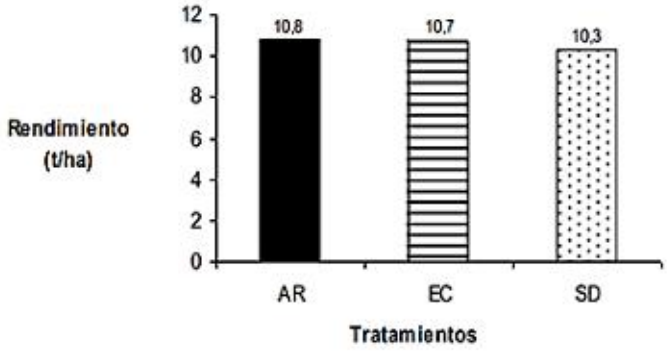
Resultados obtenidos por Draghi et al. (2015) en un estudio sobre el impacto del tráfico sobre dos sistemas de siembra, manejado por 14 años, mostraron que, el suelo bajo siembra directa fue capaz de retener el agua almacenada durante un periodo de tiempo más prolongado, además los suelos sometidos a labranza fueron más compactables a nivel superficial que los que se mantuvieron en siembra directa, mostrándose cambios más evidentes en las propiedades físicas del suelo.

3.5 Rendimiento del cultivo

Estudios realizados por Domínguez (2003), mostraron que el rendimiento en grano no fue afectado de forma significativa por los sistemas de labranza evaluados. No obstante, a no existir diferencias significativas la producción de granos fue menor bajo siembra directa (SD) que bajo los tratamientos con arado de reja (AR) y escarificador de cinceles (EC), mientras que éstos últimos no se diferenciaron entre sí (Figura 4).

Figura 4.

Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento del cultivo de maíz.



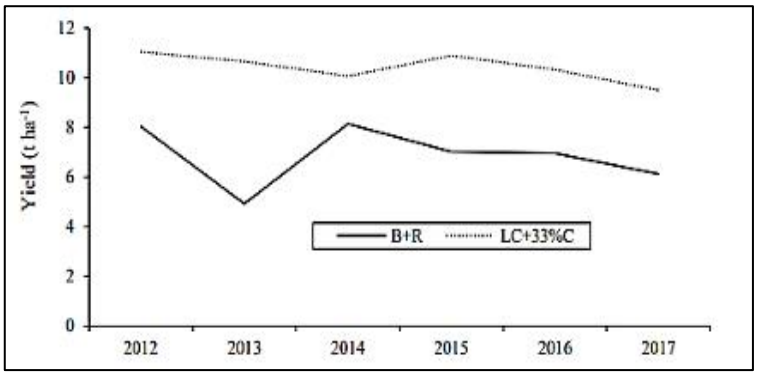
Nota: Adaptado de "Respuesta del cultivo de maíz (zea mays l.) y de las propiedades físicas del suelo agrícola bajo tráfico en tres sistemas de labranza" (p 109), por Domínguez, 2003.

La investigación conducida por Alvarado et al. (2011) demostró que es posible producir maíz de polinización abierta utilizando SD en lotes de pequeños productores y que los rendimientos alcanzados son razonables (5.2 y 7.4 t ha^{-1} de grano en Bolívar y Pichincha, respectivamente), comparados con los resultados obtenidos en el mismo sitio bajo laboreo convencional (4.3 y 7.3 t ha^{-1}, respectivamente).

La (Figura 5) muestra el rendimiento de grano de maíz obtenido en el período de 2012 al 2017, se observa que el rendimiento de grano de maíz en el tratamiento labranza cero + 33% de cobertura (LC+33%C) fue en promedio 51.68% superior al registrado con el tratamiento barbecho + rastra de discos (B + R) en los últimos cinco años. En el tratamiento de LC+33%C, el suelo registró menor compactación, mayor porosidad, mayor aporte de materia orgánica al suelo, mayor estabilidad de agregados y mayor velocidad de infiltración, por lo que el cultivo tuvo mejores condiciones en el suelo para lograr mayores rendimientos, 10 t ha^{-1}. (Martínez-Gamiño, et al., 2019, p.775).

Figura 5.

Rendimiento de grano de maíz con diferentes métodos de labranza en el Campo Experimental San Luis en el período de 2012 a 2017.



Nota: Adaptado de “Impacto acumulado de la agricultura de conservación sobre las propiedades del suelo y rendimiento del maíz” (p 775), por Martínez-Gamiño, Osuna & Ramírez, 2019. *Revista Mexicana Ciencias Agricolas. 10*(4).

El análisis estadístico reportó diferencia entre las medias de los tratamientos (Tukey, $\alpha = 0.05$), favorable al tratamiento LC+33%C. En el tratamiento de LC+33%C, el suelo registró menor compactación, mayor porosidad, mayor aporte de materia orgánica al suelo, mayor estabilidad de agregados y mayor velocidad de infiltración, por lo que el cultivo tuvo mejores condiciones en el suelo para lograr mayores rendimientos (Martínez-Gamiño et al., 2019).

Autores como Asenso et al. (2018) afirmaron que los diferentes métodos de labranza afectaron significativamente el rendimiento de grano de maíz durante dos años de estudio (Tabla 5), los mayores rendimientos en grano se obtuvieron en el tratamiento de subsolado y los menores rendimientos se registraron en la labranza cero, con diferencia significativa en los dos años.

Tabla 5.

Efectos de las prácticas de labranza en el componente de rendimiento del maíz en dos años

Año	Tratamientos	Rendimiento (t/ha)
2016	SS	7.34 a
	ZT	6.70 b
2017	SS	7.40 a
	ZT	6.75 b

Fuente: Adaptado de (Asenso, et al., 2018)

SS: subsolado ZT: labranza cero

4. CONCLUSIONES

Actualmente existen contradicciones en las investigaciones respecto a la respuesta del suelo y el cultivo a los sistemas de labranza y el tráfico vehicular.

El resultado que más se repite o en el que más coinciden las investigaciones revisadas es el que sostiene que en los suelos bajo sistema de labranza cero existe mayor contenido de humedad que en los suelos bajo los sistemas de labranza con remoción del suelo, debido a la mayor cobertura que evita la perdida por evaporación.

Los sistemas de labranza afectan las características del suelo que impulsan el potencial de productividad de las plantas, especialmente el contenido de agua del suelo.

La mayor respuesta del suelo bajo distintos sistemas de labranza se obtiene al analiza la influencia del tráfico vehicular agrícola.

La labranza cero presenta la mejor respuesta al tráfico vehicular debido a su mayor capacidad portante.

El suelo bajo labranzas con remoción del suelo experimenta los mayores niveles de compactibilidad.

La labranza cero a pesar de registrar, en muchas de las investigaciones, valores superiores de compactación, expresadas por los parámetros densidad y resistencia a la penetración, los rendimientos en grano no difieren significativamente de las labranzas con remoción de suelo.

En los trabajos con más años de experimentación los resultados mostraron que la adopción de labranza cero a largo plazo no promueve la compactación severa de la capa superior del suelo.

5. REFERENCIAS

Acevedo Hinojosa, E., & Silva Candia, P. (2003). *Agronomía de la cero labranza*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.

Alapin, H. (2008). *Rastrojos y algo más: Historia de la siembra directa en Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Teseo.

Alvarado, S., Jaramillo, R., Valverde, F., & Parra, R. (2011). *Manejo de nutrientes por sitio específico en el cultivo de maíz bajo labranza de conservación para la provincia de Bolívar.* Quito, Ecuador: INIAP-IPNI.

Arévalo, R. (2011). *Evaluación de prácticas de conservación y sistemas labranza en el cultivo de maíz duro (Zea mays L) en la microcuenca del río Alumbre, cantón Chillanes, Provincia Bolívar*. (Ingeniero Agrónomo Tesis de Ingeniero Agrónomo), Universidad Estatal de Bolívar, Guaranda, Ecuador.

Asenso, E., Li, J., Hu, L., Issaka, F., Tian, K., Zhang, L., Zhang, L., & Chen, H. (2018). Tillage Effects on Soil Biochemical Properties and Maize Grown in Latosolic Red Soil of Southern China. *Applied and Environmental Soil Science, 2018*(8426736), 2-10. Recuperado de https://doi.org/10.1155/2018/8426736.

Báez, A. M. y Aguirre, J. (2011). Efecto de labranza de conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana, 29*(2), 113-121.

Barrera, B., Alwang, J., & Cruz, E. (2008). *Manejo integrado de los recursos naturales para agricultura de pequeña escala en la subcuenca de río Chimbo - Ecuador: aprendizajes y enseñanzas.* Quito, Ecuador: INIAP-SANREM-CRSP-SENASCYT.

Bauder, J. W., Randall, G. W., Schuler, R. T. (1985). Effects of tillage with controlled wheel traffic on soil properties and root growth of corn. *Journal of soil and water conservation, 40(*4), 382-385.

Boada, R., y Espinosa, J. (2016). Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra del Ecuador. *Revista Siembra, 3,* 67-82.

Bolaños-Espinoza, A., Bravo-Mojica, I., Quihua-Martinez, A., Trinidad-Santos, A., Ramírez- Valverde, J., Domínguez-Valenzuela, A. (2001). Densidad y daños de plagas del maíz, bajo labranza convencional y de conservación. *Acta Zool, Mex (n.s.),* 83: 127-141.

Bolaños, J. 1989. Suelos en relación con labranza de conservación: Aspectos físicos. Labranza de conservación de maíz. *CIMMYT PROCIANDINO*.19-42.

Bowen, H. D. (1981). Alleviating mechanical impedance [Growth response of some plant part as it is mechanically constrained by a volume of soil]. *Modifying the root environment to reduce crop stress (USA).*

Braunack, M. V., Dexter, A. R. (1989). Soil aggregation in the seedbed: a review II. Effect of aggregate sizes on plant growth. *Soil and Tillage Research, 14*(3), 281-298.

Bravo, A. N., Sandoval, B. F., Ordaz, V. M., & González, F. V. (2000). Effect of Tillage on Soil Structure and on Germination and Development of Corn and Beans. *Terra Latinoamericana. 18*(1), 61-69.

Bravo, C. y Andreu, E. (1995). Propiedades físicas y producción de maíz (Zea mays L.) en un Alfisol del estado Guárico, Venezuela, bajo dos sistemas de labranza. *La Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo y del Instituto de Edafología*: 10-15.

Campos, S. M., Araujo, H. R. (2009) Análisis de rentabilidad productivos de rotación según sistemas mecanizados de labranza convencional y conservación. *Anales científicos UNALAM, 70*(2), 167-176.

Cassel, D.K., Stitt, R. E., Weed, B., Nelson, A. L. (1982). Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. American Society of Agronomy. *Soil Science Society of America.* 45-69. https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600010019x

Cabria, F., Calandroni, M., y Monterubbianesi, G. (2002). Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Ciencia del Suelo 20*(2), 69-80.

Chaudhary, M. R., Prihar, S. S. (1974). Root Development and Growth Response of Corn Following Mulching, Cultivation, or Interrow Compaction 1. *Agronomy Journal, 66*(3), 350-355.

Craswell, E. & Lefroy, R. (2001). The role and function of organic matter in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems, 61,* 7-18.

Cruz, C.S., Pereira, F.R., Santos, J.R., Albuquerque, A.W., y Pereira, R.G. (2008). Fertilización nitrogenada para maíz cultivado bajo sistema de labranza cero en el Estado de Alagoas. *Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental, 12*(1), p.62-68.

Derpsch, R. (1998). Historical review of no-tillage cultivation of crops. Paper presented at the FAO International Workshop, Conservation Tillage for Sustainable Agriculture.

Derpsch, R. O. L. F. (2008). Critical steps to no-till adoption. *No-Till Farming Systems. Special Publication, 3*, 479-495.

Domínguez, J. B. (2003*). Respuesta del cultivo de maíz (zea mays l.) y de las propiedades físicas del suelo agrícola bajo tráfico en tres sistemas de labranza* (Tesis Doctoral), UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA Dpto. de Mecanización y Tecnología Agraria. España-Valencia.

Draghi, L., Jorajuria Collazo, D., Sarena, D., Bailleres, M., Melani, E., Castillo, J. M., & Palancar, T. (2015). Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra. *Agrociencia Uruguay*, *19*(2), 59-67.

Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F., & Böhm, W. (1983). Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil and Tillage Research,* 3(3), 261-275.

Ekboir, J. (2001). Sistemas de innovación y política tecnológica: siembra directa en el MERCOSUR Documentos siembra directa en el Cono Sur (No. IICA-PROCISUR F01 1). IICA, Montevideo (Uruguay). Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur-PROCISUR.

Espinosa, J. (2014). La erosión en Ecuador, un problema sin resolver. *Siembra, 2*, 56-70.

Estrada, S. A., y Calvache, M. U. (2004). Evaluación de sistemas de labranza de suelo y fertilización en la asociación maíz-frejol. *RUMIPAMBA,* 18: 1-12.

FAO, 2015. El Origen de los Alimentos. Recuperado de http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/285854/, el 24/05/2021.

FAO, 2021a. Portal de Suelos de la FAO. Recuperado de http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/, el 24/05/2021.

FAO, 2021b. Portal de Suelos de la FAO. Recuperado de http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/evaluacion-de-los-indicadores-globales-de-la-salud-del-suelo/salud-del-suelo-fisica/es/#c244810, el 24/05/2021.

FAO. (2000a). Labranza de conservación ¿fin del arado?: Los agricultores de todo el mundo labran sus tierras. Recuperado de http://www.fao.org/Noticias/2000/000501-s.htm, el 05/06/2021.

FAO. (2000b). Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos (pp. 243). Italia, Roma: Instituto Internacional de Agricultura Tropical.

Freire, P. L., Tavarez, P. M., Costa, C. A., Maklouf, E. J., Resende, R. A., Pontes, A. N., Raio, J. M., Urbinati, C. Urbinati1., Brito, H. C., & Oliveira, P. H. (2020). Evaluation of nitrogen fertilization for planting corn in a yellow latosol under notillage system. *Australian Journal of Croup Science, 14*(11), 1838-1843.

Gerik, T. J., Morrison Jr, J. E., & Chichester, F. W. (1987). Effects of controlled-traffic on soil physical properties and crop rooting. *Agronomy Journal, 79*(3), 434-438.

Gill, W. R., & Bolt, G. H. (1955). Pfeffer's studies of the root growth pressures exerted by plants. *Agron. J, 47*, 166-168.

Gomes, R.F., Silva, A.G., Assis, R.L., y Pires, F.R. (2007) Effect of doses and nitrogen application timing on agronomic traits of corn under no-tillage. *Journal of Soil Science. 31*: 931-938.

Gutiérrez, M. M., Ordaz, V., Castellanos, J. Z., Santelises, A. A., Gavi, F., y Volke, H. (2001). SISTEMAS DE LABRANZA Y SUS EFECTOS EN ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS EN UN VERTISOL, DESPUES DE CUATRO AÑOS DE MANEJO. *Terra Lationoamericana. 19*(1), 67-74.

Hansen, Z. K., Libecap, G. D. (2004). Small farms, externalities, and the Dust Bowl of the 1930s. *Journal of Political Economy, 112*(3), 665-694.

Haro Prado, R. X. (2020). *Estimación de la erosión actual de la sierra norte del Ecuador, utilizando Geo-información* (Tesis en Gestión territorial del Riego, Quito: UCE).

Hayes, W. (1982). Minimum tillage farming. Brookfield, Wisconsin. No-Till Farmer, 167 p.

Herrera, O. (1993). Algunos temas sobre mecanización agrícola. Palmira: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias.

Hilfiker, R. E., & Lowery, B. (1988). Effect of conservation tillage systems on corn root growth. *Soil and Tillage Research, 12*(3), 269-283.

Hornbeck, R. (2012). The enduring impact of the American Dust Bowl: Short-and long-run adjustments to environmental catastrophe. *American Economic Review, 102*(4), 1477-1507.

INTA. (2011). Siembra directa. *In Actualización Técnica N° 58*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Jaramillo, V. J. (2017). Evaluación de cuatro sistemas de labranza en maíz (Zea maíz) en el valle del río Portoviejo. *Sathiri, 12*(1), 158-170.

Johansen, C., Haque, M. E., Bell, R.W., Thierfelder, C. & Esdaile, R.J. (2012). Conservation agriculture for small holder rainfed farming: Opportunities and constraints of new mechanized seeding systems. *Field Crops Research*, 132: 18-32.

Jones, C., Basch, G., Baylis, A., Bazzoni, D., Biggs, J., Bradbury, R., ... & Thomas, F. (2006). Conservation agriculture in Europe: an approach to sustainable crop production by protecting soil and water?.

Kanal, A. & Kolli, R. (1996). Influence of cropping on the content, composition and dynamics of organic residue in the soil of the plough layer. *Biology and Fertility of Soils, 23*, 153-160.

Kaspar, T. C., Brown, H., & Kassmeyer, E. M. (1991). Corn root distribution as affected by tillage, wheel traffic, and fertilizer placement. *Soil Science Society of America Journal, 55*(5), 1390-1394.

Laffite, H.R. (1989). Efecto de la labranza mínima en el crecimiento y rendimiento de maíz. Labranza de conservación en maíz. *CIMMY TPROCIANDINO*. 71-90

Lal, R. (2006). Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development, 17*(2), 197- 209.

Lal, R., Reicosky, D., & Hanson, J. (2007). Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research*, *93*(1), 1-12.

Landers, J. N. (2004). *Desarrollo de la Siembra Directa en El Brasil Tropical: La Historia de Las Actividades Exitosas de Una Ong* (Vol. 147). Food & Agriculture Org.

Logsdon, S. D., & Allmaras, R. R. (1991). Maize and soybean root clustering as indicated by root mapping. *Plant and soil*, *131*(2), 169-176.

Martínez, A., González, E., Holgado, A. (2001). Situación Actual de la Agricultura de Conservación. Revista Agropecuaria. Madrid-España. Ed. Agrícola Española. N° 831: 660.

Martínez-Gamiño, A. M., Osuna, S. E., & Ramírez, M. E. (2019). Accumulated impact of conservation agriculture on soil properties and corn yield. *Revista Mexicana Ciencias Agricolas. 10*(4), 765-778.

Moreno, J., Alvarado, S., Avila, M., & Montesdeoca, F. (2017). Clasificación taxonómica de los lotes de SD del CADET. In. Quito, Ecuador: FCA-UCE.

Morris, N. L., Miller, P. C. H., Orson, J. H., Froud-Williams, R. J. (2010). The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil and Tillage Research*, *108*(1-2), 1-15.

Muñoz, A. A., Lopez, P., Albarran A & Ramirez, M. (2000). Influencia de la agricultura de conservación en la temperatura del suelo y su relación con las poblaciones microbianas. (S/N) 124-129.

Nicolodi, M., Gianello, C., Anghinoni, I., Marré, J., y Mielniczuk, L. (2008). Insuficiencia del concepto mineralista para expresar la fertilidad del suelo percibida por las plantas cultivadas en el sistema de labranza cero. *Revista Brasileña de Ciencias del Suelo*, *32*, p.2735-2744.

Ohu, J. O., Raghavan, G. S. V., & McKyes, E. (1985). Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. *Transactions of the ASAE*, *28*(2), 420-424.

Plaster, E. (2000). La Ciencia del Suelo y su Manejo. Madrid, España. 116 117, 125, 126, 127, 318-320, 269-273.

Raghavan, G. S. V., McKyes, E., Baxter, R., & Gendron, G. (1979). Traffic-soil-plant (maize) relations. *Journal of terramechanics*, *16*(4), 181-189.

Rasche, J. W., Gomes, J. E., fatecha, D. A., y Leguizamón, C, A. (2020). Compactación del suelo y su efecto en el crecimiento vegetativo de soja, maíz y guandú. *Investigación agraria*, *22*(1), 13-21.

Reicosky, D., & Archer, D. (2005). *Cuantificación agronómica del aumento de material orgánica del suelo en siembra directa. Paper presented at the XIII Congreso AAPRESID*, Rosario, Argentina.

Reicosky, D.C., 2015. Conservation tillage is not conservation agriculture. J. *Soil Water Conserv. 70*, 103A-108A. doi:10.2489/jswc.70.5.103A.

Schalamuk, S., Velázquez, S., Chidichimo, H., & Cabello, M. (2003). Efecto de la siembra directa y labranza convencional sobre la colonización micorrízica y esporulación en trigo. *Boletín Micológico, 18*, 15-19

Secco, D., Ros, C.O., Fiorin, J.E., Pautz C.V., & Pasa. L. (1997). Effect of soil management on soil physical properties of an oxisol. *Ciencia Rural* (27): 57–60

Sharrat, B.S. (1996). Tillage and straw management for modifying physical properties of a subartic soil. *Soil Tillage Res.* (38): 239-250.

Silva, H. S., Adailson, P, S., Carvalho, A. B., Silva, V. B., Barbosa, E. S., & dos Santos, F. M. (2020). Yield and nitrogen balance in corn grown under no-tillage system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 24*(11), 728-734.

Six, J., & Paustian, K. (2014). Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry, 68,* A4-A9.

Smart, J. R. & J. M. Bradford. 1999. Conservation tillage corn production for a semiarid, subtropical environment. *Agron, J. 91*(1) 116-121.

Souza, E.J., Cunha, F.F., Magalhães, F.F., Silva, T.R., y Santos, O. F. (2015). Efecto del riego y la fertilización con nitrógeno sobre las características agronómicas del maíz dulce. *Investigación agrícola tropical, 45*(3), p.282-290.

Taparello, G. (2011). Siembra directa, un sistema nuevo para el viejo mundo. *Revista agropecuaria,* 944, 628-630.

Taylor, H. M., & Gardner, H. R. (1963). Penetration of cotton seedlingn taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Science, 96*(3), 153-156.

Taylor, H. M., Mathers, A. C., & Lotspeich, F. B. (1964). Pans in the Southern Great Plains Soils. I. Why Root-Restricting Pans Occur 1. *Agronomy Journal, 56*(3), 328-332.

Taylor, J. H. (1983). Benefits of permanent traffic lanes in a controlled traffic crop production system. *Soil and Tillage Research, 3*(4), 385-395.

Triplett Jr, G. B., & Dick, W. A. (2008). No-tillage crop production: A revolution in agriculture. *Agronomy journal, 100,* S-153.

Unger, P. W., & Kaspar, T. C. (1994). Soil compaction and root growth: a review. *Agronomy Journal, 86*(5), 759-766.

Vaca, V. M., Martínez, J. J., Huerta, A. G., Morales, J. E., González, Z. B., y Rodríguez, F. G. (2014). Compactación de un vertisol bajo tres sistemas de labranza en maíz (Zea mays L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5*(8), 1495-1507.

Vasco, E. (2019). *Efecto de la labranza convencional y siembra directa en las propiedades físicas de un suelo volcánico sembrado con maíz y fréjol*. (Ing. Agrónomo). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.

Voorhees, W. B. (1992). *Wheel-induced soil physical limitations to root growth. In Limitations to Plant Root Growth* (pp. 73-95). Springer, New York, NY.

Voorhees, W. B., Nelson, W. W., & Randall, G. W. (1986). Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. *Soil Science Society of America Journal, 50*(2), 428-433.

Weil, R. & Magdoff, F. (2004). *Significance of soil organic matter to soil quality and health.* En: F. Magdoff and R. Weil, (eds), Organic Matter in Sustainable Agriculture. CRC Press, Boca Ratón, USA.

Willatt, S. T. (1986). Root growth of winter barley in a soil compacted by the passage of tractors. *Soil and Tillage Research, 7*(1-2), 41-50.

Wingeyer, A., Amado, T., Pérez-Bidegain, M., Studdert, G., Perdomo, C., Garcia, F. & Karlen, D. (2015). *Soil quality impacts of current South American agricultural practices. Sustainability, 7*, 2213-2242.

Winters, P., Espinosa, P. & Crissman, C. (1988). *Manejo de los recursos en los andes ecuatorianos.* Ediciones Abya-Yala, Quito, Ecuador.

ANEXOS

Marco teórico

El suelo

Como otras palabras comunes la palabra suelo tiene varios significados. Su significado tradicional se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas. También se ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas. (FAO, 2021a)

Erosión y degradación del suelo

Según FAO (2000a), el arado moderno es uno de las principales causantes de la degradación de los suelos. El laboreo del suelo con arado de discos o de vertederas contribuye significativamente a la erosión, compactación, pérdida de humedad del suelo y aumenta los costos de producción cuando se usa con exceso. La constante remoción destruye la estructura y oxida el carbono orgánico (CO) degradando las características químicas, físicas y biológicas del suelo. (Ekboir, 2001; Lal et al., 2007)

Compactación del suelo, efectos

Cuando la estructura del suelo es alterada, se produce la compactación del mismo, este fenómeno es provocado por la compresión debido al peso del ganado o de la maquinaria pesada tal como prácticas de laboreo inadecuadas que se implementan con frecuencia en la agricultura industrial, haciendo que disminuya el espacio poroso. Los suelos afectados

pierden capacidad de absorber el agua de lluvia, aumentando, por tanto, la escorrentía y la erosión. Las plantas no crecen bien en suelos compactados porque los granos de minerales están comprimidos, dejando poco espacio para el aire y el agua, esenciales para el crecimiento de las raíces. El entorno también resulta hostil para los animales excavadores, porque cuanto más denso es el suelo, más difícil es excavarlo. (FAO, 2021b)

Densidad aparente y contenido de agua

Desde muchos años antes de que Taylor y sus colaboradores iniciaran un detallado estudio sobre la compactación del suelo a fines de la década de 1950, ya se conocía de la presencia de capas compactadas que restringían el enrizamiento de las plantas. Para obtener información sobre por qué aparecen capas compactas que restringen las raíces, Taylor et al. (1964), citados por Unger & Kaspar (1994), estudiaron los estratos compactados en 17 suelos del sur de las Grandes Llanuras en Estados Unidos. Llegaron a la conclusión de que los estratos que restringen las raíces en menos de la mitad de los casos podrían atribuirse a la naturaleza genética del suelo o al efecto de la manipulación del suelo. En los casos restantes, la restricción de las raíces fue causada por una resistencia excesiva del suelo que ocurrió en gran parte como resultado del secado del suelo. Unger & Kaspar (1994), refiriéndose a Taylor et al. (1964), exponen que los suelos minerales ganan resistencia cuando se compactan, y que los suelos compactados ganan resistencia adicional cuando pierden agua (se vuelven más secos). Esto confirmó los resultados de Taylor y Gardner (1963), que mostraron que la resistencia del suelo lo suficientemente grande como para limitar críticamente la penetración de las raíces del algodón podría lograrse aumentando la densidad aparente del suelo o disminuyendo el potencial de matriz hídrica del suelo. La penetración de la raíz del algodón se detuvo cuando la resistencia de la arcilla-arenosa fina Amarilla (arcilla fina, mezcla, Arídico Paleustalf térmico), determinada con un penetrómetro estático, alcanzó 296 N cm^{-2}.

Compactación subsuperficial

También puede provocarse la compactación subsuperficial, esta es la compactación por debajo de la profundidad de las operaciones normales de labranza se denomina generalmente compactación del subsuelo. Voorhees et al. (1986), examinaron los efectos de la compactación uniforme del subsuelo sobre el crecimiento de las raíces de forma indirecta mediante el examen de los patrones de absorción de agua del maíz. Se aplicó una carga por eje de 18 Mg a toda la superficie de la parcela. Este tráfico provocó cambios

significativos en la densidad aparente a una profundidad mayor a 60 cm. Antes de la siembra, los 25 cm superiores se cultivaron intensivamente, lo que dejó una capa compactada entre los 25 y 60 cm de profundidad. En los primeros 2 años después de la compactación, el tratamiento de 18 Mg por eje redujo la absorción de agua de la planta y redujo la cantidad de agua extraída por debajo de los 45 cm de profundidad en comparación con el control (menos de 4.5 Mg de carga por eje). Estas diferencias de extracción de agua reflejan diferencias en la distribución de raíces, profundidad de enraizamiento y densidad de raíces causadas por la compactación del subsuelo.

Manejo de la compactación del suelo

Uno de los métodos más directos para evitar la compactación es el concepto de tráfico controlado (Taylor, 1983; Gerik et al., 1987). Un sistema de tráfico controlado restringe el tráfico de ruedas a carriles específicos o entrecruzados. Como resultado, una mayor parte del área del suelo permanece sin compactar que cuando se usa un patrón de tráfico aleatorio o incontrolado. Gerik et al. (1987), encontraron que la resistencia del suelo y la densidad aparente eran más altas y que las densidades de las raíces del algodón, el sorgo en grano [Sorghum hicolor (L.) Moench] y el trigo (Triticum aestivum L.) eran más bajas en los carriles de tráfico que en los carriles sin tráfico. Kaspar et al. (1991), encontraron resultados similares para un sistema de tráfico controlado en Iowa.

La resistencia de la zona compactada está fuertemente influenciada por la densidad aparente del suelo y el contenido de agua (Taylor y Gardner, 1963). Por lo tanto, a través del manejo puede ser posible evitar los efectos adversos de la compactación al cultivar cultivos cuando el suelo está lo suficientemente húmedo debido a la precipitación oportuna o al agua de riego aplicada, de modo que la resistencia del suelo no obstaculiza seriamente la penetración de la raíz. Irrigar el área cultivada aumenta el suministro de agua para los cultivos directa e indirectamente al permitir que las raíces penetren en la zona compactada, lo que resulta en la extracción de agua de un mayor volumen de suelo (Bowen, 1981). Otra forma de gestionar la resistencia del suelo es mediante la adición de materia orgánica al suelo. Esto se puede lograr mediante el uso de labranza cero, rotaciones de cultivos o adiciones de estiércol u otros materiales orgánicos. Ohu et al. (1985), demostraron que la adición de materia orgánica disminuye la resistencia a la penetración de un suelo cuando se compacta.

Si las raíces de las plantas pueden penetrar una zona compactada, los canales y macroporos formados por estas raíces pueden proporcionar vías suficientes a través de la zona compactada, de modo que el enraizamiento posterior de la planta no se vea afectado en gran medida (Unger & Kaspar, 1994).

Otra técnica para estimular la formación de macroporos en un suelo compactado es manejar el sistema de producción de cultivos de una manera que promueva la actividad de las lombrices de tierra. Cuando hay suficiente materia orgánica en el suelo o hay materiales orgánicos en la superficie, las lombrices de tierra excavarán hasta 2 m de profundidad. Las madrigueras de las lombrices de tierra aumentan la infiltración de agua y facilitan el crecimiento de las raíces a través de las zonas del suelo que de otro modo podrían reducir o prevenir la penetración de las raíces (Bowen, 1981; Ehlers et al., 1983; Logsdon y Allmaras, 1991).

Manejo de labranza

Mientras que evitar la compactación del suelo por plantas o animales del suelo es relativamente lento, con la labranza se puede lograr un alivio rápido y, a menudo, completo de la compactación del suelo. Según Gill y McCreery (1960), citados por Unger & Kaspar (1994), el arado de vertedera es la herramienta más eficaz para aflojar un suelo a una profundidad de 0.30 m. Por lo tanto, si la zona compactada está dentro de los 0.30 m de la superficie, debería ser posible una ruptura satisfactoria utilizando un arado de vertedera. Aunque los arados de vertedera son eficientes para aflojar el suelo, su uso requiere grandes cantidades de energía. Además, el arado con vertedera entierra la mayoría de los residuos de cultivos, que pueden dejar el suelo en una condición que lo hace altamente susceptible a la erosión (Unger & Kaspar, 1994).

Varios tipos de implementos de disco pueden aflojar el suelo. Los arados de disco estándar pueden operar a profundidades similares a las de un arado de vertedera, pero los arados de disco son menos eficientes. Además, los arados de disco se introducen en el suelo por su peso y, por lo tanto, pueden contribuir a la compactación del suelo, dan como resultado una capa compactada inmediatamente debajo de la profundidad de labranza (Bowen, 1981). Al igual que con los arados de vertedera, la mayoría de los residuos de cultivos se cubren con el uso de arados de disco, lo que podría provocar una mayor erosión del suelo. Las gradas de discos tienen poco valor para aflojar las capas compactadas del

subsuelo en el suelo. De hecho, su uso suele ser la causa de la zona compactada (Unger & Kaspar, 1994).

Hay una variedad de implementos de púas disponibles para romper las capas de suelo compactado. Estos incluyen varios tipos de cinceles, rippers y subsoladores. El grado en que los implementos de púas aflojan el suelo se ve afectado por el espaciado y la profundidad de trabajo, el tipo y ancho de la reja y la condición del suelo (Bowen, 1981). En general, la separación entre púas no debe ser mayor 1.5 veces la profundidad de trabajo. Los implementos de púas provocan una acción de rotura en el suelo, y las condiciones del suelo tienen un efecto considerable en la cantidad de rotura que se produce. Generalmente, la rotura es mayor en un suelo arenoso de baja plasticidad que en un suelo arcilloso de alta plasticidad. Además, la trituración generalmente es mayor para un suelo seco que para un suelo húmedo, pero la condición áspera y aterciopelada creada en el suelo seco puede requerir varias operaciones secundarias para romper los terrones y lograr un lecho de siembra satisfactorio (Unger & Kaspar, 1994).

Labranza convencional o labranza con inversión del suelo

Este tipo de labranza se realiza con el uso del arado y la rastra como implementos acoplados a un tractor, o por medio de la yunta o fuerza humana a nivel de agricultura de pequeña escala (Acevedo & Silva, 2003; Boada & Espinosa, 2016; Taparello, 2011). Como labranza primaria se utiliza un arado de vertedera o de discos y una rastra de púas o discos en operaciones secundarias. La LC invierte el suelo con el objetivo de interrumpir mecánicamente el ciclo de vida de las malezas, seguido por varias operaciones para la preparación de la cama de siembra. Con el arado se logra la inversión de la capa superior del suelo, habitualmente hasta una profundidad de 30 cm. Luego se hacen varias pasadas con rastra, cuyo número dependerá de la textura y contenido de humedad del suelo, hasta formar agregados de un tamaño pequeño que se considera son apropiados para la cama de siembra (FAO, 2000b).

Difusión de la cultura de labranza del suelo

Como indica Derpsch (1998), las antiguas potencias coloniales proporcionaron el arado a los países colonizados de América, África y Asia como herramienta que promueva la producción de las tierras de cultivo, calificando como inservibles a las tecnologías autóctonas, como la de usar un palo de madera para perforar el suelo y colocar las semillas a mano. De esta manera, las incipientes tecnologías de poca o ninguna

remoción del suelo, perdieron gradualmente su aplicación a través del tiempo en varios lugares alrededor del mundo. Se generalizó la idea de que no era posible cultivar sin primero practicar operaciones de labranza (remoción) para plantar las semillas en el suelo. El posterior desarrollo de implementos mecánicos de tracción animal y de tracción motorizada incrementó notablemente el protagonismo de la labranza del suelo en los sistemas de producción del mundo (Triplett & Dick, 2008). Este es el sistema de manejo del suelo comúnmente conocido como LC (Derpsch, 1998).

Con el transcurso del tiempo, la LC del suelo se trasformó en una de las operaciones más importantes para preparar la cama de siembra (capa de suelo que se ha removido para promover la germinación y emergencia de las semillas y el crecimiento de las plántulas) (Braunack & Dexter, 1989) y para controlar malezas que compiten con los cultivos. Todavía muchos agricultores consideran que el suelo arado y limpio es un suelo bien manejado y consideran que otros sistemas menos intensivos que dejan los residuos de cosecha en la superficie son sistemas desordenados y mal manejados (Jones et al., 2006).

Externalidades ambientales

Los efectos ambientales negativos causados por el uso intensivo de la LC se registraron en diversas partes del mundo desde principios del siglo XX. Uno de los impactos más negativos se presentó durante la década de 1930 en las planicies del interior de los Estados Unidos y Canadá, áreas donde la producción agrícola se había expandido sustancialmente. Las llanuras de estas zonas experimentaron sequías severas en 1934 y 1936, condición que, conjuntamente con la labranza intensiva del suelo, generó tormentas de polvo que barrieron la capa superior del suelo, considerándose que hacia finales de la década de 1940 muchas áreas habían perdido acumulativamente más del 75% de su suelo original (Hansen & Libecap, 2004; Hornbeck, 2012).

Este fenómeno, conocido como “Dust Bowl” (tazón de polvo), arrojó enormes cantidades de suelo fuera de las tierras de cultivo. Las áreas agrícolas quedaron severamente erosionadas por el viento y las partículas de suelo transportadas se acumularon en sitios cercanos, pero también afectaron áreas localizadas a considerables distancias del sitio de generación con graves consecuencias económicas, ambientales y sociales en amplias zonas de América del Norte. De igual manera, se encontraron casos de los efectos adversos por el uso de la LC en la novel y pujante agricultura de Brasil y Argentina durante la década de 1960 (Alapin, 2008; Derpsch, 1998; Landers, 2004).

Objetivos de la labranza

El objetivo general de la labranza es modificar por medios mecánicos las condiciones físicas originales del suelo para mejorarlos de acuerdo a los fines perseguidos. En otras palabras, el objetivo de la labranza es el "mejoramiento" de las condiciones físicas del suelo como ambiente para las plantas. Después de la arada, la tierra parece más seca, a pesar de que su contenido de agua no ha cambiado. En estas condiciones el suelo tiene más aire y más condiciones para absorber el agua (Herrera, 1993).

El propósito de la labranza consiste en lograr que las semillas germinen y las plántulas tengan condiciones satisfactorias para desarrollar su sistema radicular rápidamente. La finalidad de la labranza es proporcionar un medio favorable para el crecimiento y la producción de cultivos, pero que conserve los recursos de tierra y agua (Hayes, 1982).

Labranza de conservación

Labranza sin inversión del suelo

Este sistema de labranza se basa en el uso de aperos con cuchillas y discos que no invierten el suelo. Los discos cortan el suelo, malezas y raíces a medida que avanzan en el campo, mientras que las cuchillas levantan y roturan el suelo en forma vertical removiendo cualquier capa compactada a la profundidad de trabajo establecida. Aquí también se altera toda la capa superficial del campo (alrededor de 20 cm) para la preparación de la cama de siembra, pero implica menos pases por el campo comparado con la LC. (Morris et al., 2010)

El mismo autor anterior indica que la labranza sin inversión requiere menos energía cuando se opera de manera más superficial que la LC, lo que permite sembrar un área relativamente grande dentro del espacio de tiempo óptimo para el establecimiento de un cultivo. Sin embargo, la labranza sin inversión más profunda, particularmente cuando se utiliza un subsolador que opera a mayor profundidad en el suelo para eliminar capas compactadas, utiliza combustible de manera similar o superior usado en la LC.

Labranza en franjas

En este sistema se perturba únicamente una franja estrecha del suelo que contendrá la hilera de semillas, es decir, cerca de la tercera parte del área total del campo. Las hileras de siembra usualmente se preparan con un ancho de 5 a 20 cm y una profundidad de 5 a

10 cm. El suelo entre las hileras no se disturba, solamente se controlan malezas y se mantiene con una cobertura de rastrojos (FAO, 2000b; Morris et al., 2010).

Siembra Directa

Cualquier tipo de actividad que se enfoque en reducir el exceso de labranza para generar una mejor cobertura sobre el campo contribuye significativamente a evitar la degradación del suelo, una de estas actividades es la siembra directa (SD).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2000b), la SD o labranza cero es la práctica de "sembrar entre los rastrojos del cultivo anterior sin ninguna remoción del suelo, salvo lo mínimo necesario para colocar la semilla a la profundidad deseada". En este sistema el perfil del suelo permanece inalterado año tras año, dejando los residuos de cosecha y en la superficie del suelo.

Esta forma de manejo busca reducir al mínimo la degradación promovida por la remoción del suelo al momento de la siembra, el suelo se mantiene intacto todo el tiempo desde la siembra a la cosecha y el control de malezas depende de la aplicación de herbicidas. Esta alternativa de manejo deja los residuos del cultivo anterior como cobertura permanente, condición que contribuye al cambio y mejora de las características físicas, químicas y biológicas del suelo y ayuda a controlar las malezas (Balesdent, et al., 2000; Dabalá, 2009; Derpsch, et al., 2010; Lal, R. 2015; Scoponi, et al., 2012, citados por Serrano, 2020).

La cobertura del suelo lograda por la acumulación de residuos de la siembra anterior reduce las pérdidas de agua por evaporación y protegen al suelo contra la erosión hídrica (INTA, 2011; Johansen, et al., 2012; Lal, R. et al., 2007). La ausencia de remoción del suelo reduce la oxidación de la materia orgánica (MO), mantiene la estabilidad de los agregados e incentiva la porosidad logrando así un mejor movimiento del agua al interior del suelo (Lal, R. 2011; Six and Paustian, 2014).

La SD ha sido adoptada de manera exitosa en extensas áreas en América del Norte y en Argentina y Brasil en América del Sur utilizando maquinaria agrícola moderna y alta tecnología en la búsqueda de producir rendimientos altos y sostenibles sin remover el suelo (Derpsch, et al., 2010; Wingeyer, et al., 2015, citados por Serrano, 2020). En Argentina, por ejemplo, la SD ha llegado a ocupar el 81% del área de cultivo

(aproximadamente 27 millones de hectáreas), logrando un incremento de la producción del 135% (INTA, 2011).

Por otro lado, la SD no ha sido adoptada por pequeños productores en América tropical y tampoco ha sido mirada como una alternativa a la LC por los productores de las tierras altas de Ecuador. Los campesinos consideran que es una práctica muy complicada para la agricultura familiar, y que la estrecha relación de la mujer y hombre de campo con la tierra harían obligatorio el movimiento del suelo para utilizarlo en la producción de alimentos (Boada y Espinosa, 2016). Sin embargo, estudios conducidos por varias instituciones han demostrado que es posible producir sin mover el suelo en lotes de pequeños productores de en diversas zonas del país (Acosta & Galárraga, 2011; Alvarado, et al., 2011; Ávila, 2019; Gudiño, 2010; Juna, 2009; Quichimbo, et al., 2012; Vasco, 2019, citados por Serrano, 2020).

La cobertura es un factor fundamental dentro del sistema de SD. La cobertura protege el suelo de la radiación solar y las gotas de lluvia, de esta forma se reduce la evaporación ya que los residuos vegetales aumentan el albedo, lo que reduce la capacidad para transportar el calor, protege la superficie de la energía de la gota de lluvia evitando la formación de costras que es requisito previo para la compactación y la erosión. La cobertura de residuos de las cosechas anteriores acumulada en la superficie del suelo cuando se utiliza SD incrementa el contenido de carbono orgánico (CO) en las capas superficiales del perfil del suelo lo que induce cambios benéficos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Abdollahi & Munkholm, 2014; Bronick & Lal, 2005; Dabalá, 2009; Dai, et al., 2015, citados por Serrano, 2020).

Nitrógeno

Sin embargo, el lograr una adecuada cobertura con SD en áreas tropicales es difícil por la alta dinámica del suelo que puede ser cultivado todo el año si existe disponibilidad de agua (Derpsch, 2008). Esta situación fue reportada por Toapanta (2016) y Ávila (2019), quienes no observaron una abundante acumulación de residuos sobre la superficie, luego de dos y cuatro años de haber sembrado cultivos dejan residuos de una alta relación carbono – nitrógeno (C/N) como triticale, maíz y cebada en parcelas de SD. Posiblemente la acción de la macro y microfauna es la responsable de esta situación en suelos volcánicos de la Sierra norte de Ecuador. Por otro lado, es conocido el efecto del contenido de nitrógeno (N) en los residuos [baja relación (C/N)] en la velocidad de

descomposición de los residuos orgánicos (Videla, et al., 2005), lo que lleva a la consideración de diferentes rotaciones que prueben alternativas con cultivos que den una diferente relación C/N en los residuos dejados en la superficie.

La SD genera cambios notorios en la funcionalidad y dinámica del N con respecto a LC afectando la disponibilidad del nutriente para los cultivos posteriores. Varios autores indican que existe el potencial de que se presenten mayores pérdidas de N cuando se utiliza SD, así, Fuentes, J., et al. (2006) y Wilton, et al. (2012),citados por Serrano (2020), indican que consta una mayor posibilidad lixiviación de NO_3^- que no puede quedar retenido en las arcillas o el humus del suelo lo que facilita la pérdida por lixiviación promovida por el movimiento del agua que se mueve con mayor facilidad por los abundantes macro poros prevalentes en los suelos manejados con SD. Por otro lado, Halvorson, et al. (2008), Cheng, et al. (2015) y Krauss, et al. (2017), citados por Serrano (2020), indican que la SD promueve una mayor acumulación de agua en el suelo lo que fomenta la formación de micrositios anaeróbicos donde se desarrollan bien las bacterias anaerobias responsables de las denitrificación que forma gases que se pierden por volatilización y que tienen efecto invernadero. En SD, las pérdidas por volatilización de amoniaco (NH3) de los fertilizantes aplicados son también potencialmente altas por la presencia de cantidades apreciables de ureasa en los residuos en descomposición (Regina & Wanderley, 2005; Romano & Bono, 2012; Salvagiotti, et al., 2012, citados por Serrano, 2020).

Las dificultades que se pueden presentar alrededor de la dinámica del N con la adopción de SD (menores tasas de mineralización y mayores pérdidas potenciales por lixiviación, desnitrificación y volatilización) sugieren que en el corto plazo se deben aplicar mayores cantidades de fertilizante nitrogenado a los cultivos para lograr iguales o mayores rendimientos que la LC. Sin embargo, la inmovilización del N es quizá el proceso que más afecta la disponibilidad del nutriente en las primeras etapas de adopción de SD. Al pasar de LC a SD es normal encontrar que la mineralización de los residuos orgánicos sea más lenta y que esto incentive el proceso de inmovilización durante los primeros años esta conversión (Álvarez & Steinbach, 2010; Andriulo, et al., 2008; Cassman, et al., 2002; Quincke, et al., 2010; Serri, et al., 2012, citados por Serrano, 2020). La asimilación microbiana del N (inmovilización) está relacionada con la alta relación C/N de los residuos acumulados sobre el campo cuando se utiliza SD.

Los microrganismos encargados de descomponer los residuos orgánicos no encuentran suficiente N en los residuos durante el proceso y por esta razón utilizan el N disponible en la solución del suelo para satisfacer sus necesidades promoviendo de esta forma un déficit de N disponible para las plantas y éstas presentan los síntomas clásicos de deficiencia de este nutriente (Broadbent, 1984; Mandrini, et al., 2012; Quincke, et al., 2010). Por todas estas razones, la dosis de fertilización con N en SD debe ser más alta en comparación con la LC durante los primeros años después de eliminar el movimiento del suelo con SD (Crovetto, 2006; Divito, et al., 2011; García, & Picone, 2004). Sin embargo, después de varios ciclos de incremento inicial en los niveles MOS se logra un equilibrio y finalmente se puede disminuir esta necesidad de fertilización adicional en SD (INTA, 2011; Wall, 2007).

Fósforo

La ausencia de movimiento del suelo y la consecuente acumulación de residuos en la superficie de sistemas de cultivo manejados con SD promueve la estratificación de los nutrientes disponibles, particularmente la del P. La abundancia de residuos y la baja movilidad del P en el suelo resulta en la acumulación de este nutriente en la capa de 0-5 cm del perfil, contenido que gradualmente se reduce con la profundidad (Grove, et al., 2007; Lupwayi, et al., 2006, citados por Serrano, 2020). La mayor disponibilidad de agua, N y CO en la capa superior del suelo incrementa la población microbiana que es también la responsable de la inmovilización de P dentro del ciclo biogeoquímico de este nutriente en el suelo, reduciendo de esta forma la disponibilidad del P para las plantas, sin embargo, el proceso no es tan marcado como el producido por la inmovilización de N (Mallarino, A., et al., 2009; Mallarino, Antonio & Borges, 2006; Margenot, et al., 2017; Spargo, et al., 2008, citados por Serrano, 2020).

Escenario de la siembra directa en Ecuador

En la agricultura de la Sierra del Ecuador, practicada por grandes y pequeños agricultores, el sistema tradicional de labores de preparación del suelo para la siembra de diversos cultivos remueve el suelo con el objetivo de eliminar malezas y preparar los surcos de siembra. Esto también ha provocado cambios profundos en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, con efectos negativos en el rendimiento de los cultivos y en el ambiente. Son varios los argumentos para mantener la práctica de remoción del suelo, se arguye que la remoción del suelo es necesaria para controlar las

malezas, permitir una mejor aireación del suelo, evitar la compactación y desarrollar un medio adecuado para el desarrollo de las raíces (Boada & Espinosa, 2016).

El crecimiento de la población rural ecuatoriana ha obligado a los agricultores a usar tierras marginales, especialmente en lugares de pendientes muy inclinadas en las laderas de la Sierra. Adicionalmente, debido a la presión sobre la tierra, las parcelas se han ido dividiendo hasta crear una complicada red de minifundios donde la agricultura está limitada por la escasez de recursos y la mala ubicación de los lotes de producción. La división de la tierra deja en el campo lotes alargados ubicados a favor de la pendiente, condición que promueve la erosión. La poca disponibilidad de tierra para la agricultura promueve, además, el uso intensivo y la utilización de prácticas agrícolas como preparar el suelo en el sentido de la pendiente ya sea con bueyes o con tractor que favorecen la pérdida del suelo. De esta forma se han degradado importantes áreas de producción en la Sierra ecuatoriana (Moreno et al., 2017, citado por Serrano, 2020).

La SD en Ecuador ha sido adoptada en muy pocos sitios ya sea como herramienta para mejorar la producción o para controlar la erosión (Espinosa, 2014). Los pocos datos de investigación logrados en el país no son suficientes para demostrar el efecto de la SD en las propiedades del suelo porque han permanecido en el campo solamente uno o dos años (Arévalo, 2011; Barrera et al., 2008).

Rendimiento del cultivo

Estudios realizados por Freire et al., (2020), mostraron en base a la aplicación de nitrógeno que tuvo un efecto significativo ($p < 0.05$) en el rendimiento de grano de maíz, usando la labranza cero. El rendimiento se incrementó linealmente en relación con las dosis de Nitrógeno (N), con una mayor productividad (6795,3 Kg ha-1), obtenido con la dosis más alta de N (180 Kg ha-1). Estudios similares de Gomes y col. (2007) citados por Freire, et al., (2020), utilizaron dosis de 0 a 150 Kg ha^{-1} en maíz bajo el sistema de labranza cero en el estado de Goiás, y obtuvieron un rendimiento máximo de 7.012 Kg ha^{-1} de granos de maíz.

Otras investigaciones realizadas por Silva, et al., (2020) afirman que, en el rendimiento de grano, hubo un incremento lineal con el aumento de la dosis de N, con un rendimiento máximo de grano de 5.684,79 Kg ha1, bajo un sistema de labranza cero. Este rendimiento está cerca del rendimiento promedio de grano brasileño en 2017, que fue de 5.618 Kg ha^{-1}, y superior al rendimiento promedio de la región Nordeste y el Estado de Paraíba. Por

otra parte, (Nicolodi et al., 2008; Cruz et al., 2008; Souza et al., 2015, citados por Silva et al. 2020) mencionan que la fertilización con nitrógeno en dosis y tiempos adecuados es fundamental para lograr un alto rendimiento de grano en maíz, el cual está influenciado por el sistema de cultivo, variedad y disponibilidad de agua. Campos y Araujo (2009) expresan que los métodos de asociatividad y los monocultivos representativos suelen tener efectos diferentes en el rendimiento de maíz, de acuerdo al tipo de labranza existe una significancia alta con un mayor rendimiento, con labranza convencional aproximadamente de 2,028.9 Kg/ha y con labranza minina de 1,386.9 Kg/ha.

Sin embargo, Báez y Aguirre, (2011) evidenciaron que los sistemas de labranza sobre el rendimiento de maíz, determinaron que ninguno de los sistemas de labranza interviene significativamente sobre la variable rendimiento, aunque se observó que el rendimiento absoluto es ligeramente superior en el sistema de labranza de conservación que en el convencional. En estudios semejantes hechos por Smart y Bradford, (1999) citados por Báez y Aguirre, (2011), reportaron que existe un mayor rendimiento en labranza de conservación por el hecho de dos condiciones básicas a conocer: el rendimiento durante los años de sequía y cuando existe menores costo de producción. Estudios similares de Bolaños-Espinoza, et al., (2001), encontraron que para el rendimiento del maíz no se mostró diferencias altamente significativas para los sistemas de labranza, se pudo visualizar que el rendimiento promedio fue mayor en labranza de conservación con 6814 Kg/ha contrario a la labranza convencional donde obtuvieron 5700 Kg/ha

Efecto de la compactación sobre el rendimiento

La labor que se realiza al suelo es con el objetivo de crear una camada favorable para el cultivo, y esta pueda facilitar el crecimiento en la fase de emergencia y el desarrollo de su raíz, los canjes que produce el laboreo, son el aumento de temperatura en el suelo y la disminución de compactación superficial, mientras que es una labranza de conservación no existe la variable de compactación ya que la siembra del cultivo es directa. (Muñoz, Lopez, Albarran & Ramirez, 2000). Estudios realizados por Arévalo (2011), indican que al evaluar la compactación con diferentes niveles de profundidad mediante un tiempo estimado, se pudo observar que entre mayor profundidad del suelo haya, mayor será el grado de compactación del mismo, a profundidades mayores de 40 cm la actividad biológica y la zona de raíces serán relativamente bajas, la compactación se encuentra

relacionada con la precipitación y distribución de la misma al tiempo del ciclo del cultivo, en los suelos arcillosos se podrá notar una mayor compactación del suelo.

Otras investigaciones realizadas sobre la variable compactación indicaron que fue muy variable en los dos sitios experimentales desde el inicio de los ensayos, la evaluación fue exploratoria y no constaba las condiciones iniciales en los lotes, debido a los sistemas de labranza y las fertilizaciones que aún no estaban aplicadas. Se encontraron diferencias al instante de finalizar los ensayos para la compactación entre planta en Chimborazo viendo que la labranza convencional obtuvo una menor compactación con 97.4 Kgf/cm², para poder explicar este hecho se realizó una evaluación en el lomo del surco. Las diferencias fueron casi nulas ya que la evaluación en la labranza convencional se hizo en el fondo del surco y así los resultados fueron iguales a los obtenidos en la labranza de conservación donde el suelo no fue removido (Estrada y Calvache, 2004).

Estudios realizados por Vaca et al., (2014), concluyeron que el análisis es un conjunto de los parámetros comunes que caracterizan a la compactación del suelo (densidad aparente, dureza del suelo o resistencia a la penetración y velocidad de infiltración), el cual permitió determinar, con mayor certeza, los factores que la originan, así como describir con precisión su desarrollo en el tiempo. En este sentido, el análisis individual de la densidad aparente, no permitió determinar cambios en la compactación del suelo por el efecto de los sistemas de labranza en el periodo de estudio. Otras investigaciones realizadas por Rasche et al., (2020), indicaron que en áreas compactadas del suelo ocurre disminución de la materia seca de raíces de los cultivos, comparado con la zona no compactada, concluyeron que el cultivo de maíz es más sensible a la compactación del suelo y presenta mayor limitación al desarrollo radicular en camadas compactadas que la soja y el guandú.