

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SEDE DEL ATLÁNTICO
FACULTA DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO CON EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN AGRONOMÍA**

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE SUELO Y SU RELACIÓN CON
LA COMPACTACIÓN EN FINCAS CULTIVADAS DE CAÑA DE AZÚCAR
UBICADAS EN CUATRO LOCALIDADES DE PÉREZ ZELEDÓN, COSTA RICA**

JOSÉ DANIEL MORA RETANA

2022

Estudio de las propiedades físicas de suelo y su relación con la compactación en fincas cultivadas de caña de azúcar ubicadas en cuatro localidades de Pérez Zeledón, Costa Rica

Práctica Dirigida sometida a consideración de la Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias Agroalimentarias como requisito parcial para optar al grado: Título Profesional de Ingeniero con el Grado Académico de Licenciado en Agronomía.

TRIBUNAL EVALUADOR


Dra. Rosibel Orozco Solano

Presidenta del Tribunal


Lic. Kenneth Largaespada Zelaya

**Director del Trabajo
Final de Graduación**


Dr. Carlos Henríquez Henríquez

Miembro del tribunal


MBA. Oldemar Navarro Acuña

Miembro del tribunal


Dr. Manuel Ernesto Camacho

Miembro del tribunal


José Daniel Mora Retana

Sustentante

DEDICATORIA

Este paso al igual que todos en mi vida se los debo a Dios que siempre me acompaña en todas las circunstancias y a mis padres quienes nunca terminan de esforzarse en busca de mi bienestar. También, le dedico este trabajo a mi esposa Ericka Mora Quirós que siempre me apoya para poder cumplir mis deberes y salir adelante en nuestro proyecto.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quiero agradecer la Universidad de Costa Rica que me brindó las herramientas necesarias para desarrollarme como profesional y poder integrarme al mercado laboral, a mi tutor de trabajo final de graduación el Lic. Kenneth Largaespada Zelaya y al Dr. Carlos Henríquez Henríquez, quien fue el responsable de brindarme sus conocimientos en el área de la Edafología y colaborador muy importante en este trabajo. Muy importante, agradecer también al equipo del Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas por el aporte en el análisis de muestras.

Un agradecimiento a la empresa CoopeAgri R.L quien abrió sus puertas y nos dio todo el apoyo requerido para ejecutar el presente estudio y particularmente el MBA Oldemar Navarro Acuña, quien además de apoyar como miembro del tribunal fue la persona que nos apoyó desde la cooperativa en su posición como Gerente del Ingenio. Por último, agradecerle al ICAFE institución que me ha permitido desarrollarme en la experiencia profesional.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Generalidades del cultivo	4
3.1.1. Origen	4
3.1.2. Botánica.....	4
3.1.3. Requerimiento de clima	4
3.1.4. Sistema radicular	5
3.2. Descripción del área de estudio.....	5
3.2.1. Clima.....	5
3.2.2. Suelo	5
3.3. Prácticas de manejo del cultivo: CoopeAgri R.L.	6
3.3.1. Selección de semilla	6
3.3.2. Preparación de suelo.....	6
3.3.3. Aplicación de Abono Orgánico	8
3.3.4. Establecimiento.....	8
3.3.5. Fertilización	8
3.3.6. Subsolado	9
3.4. Definición de compactación y causas que la originan	9
3.5. Medición de la compactación del suelo	11
3.6. Instrumentos de medición resistencia a la penetración	12
4. MATERIALES Y MÉTODOS	13
4.1. Localización del estudio.....	13
4.2. Criterios de selección de las fincas.....	13
4.3. Unidades experimentales.....	14
4.4. Variables de medición.....	14
4.5. Resistencia a la penetración con Penetrologger (RP-P)	14
4.6. Penetrómetro de Chatillón (RP-CH)	15
4.7. Resistencia al corte tangencial (RC)	15

4.8.	Densidad aparente (DP)	15
4.9.	Humedad del suelo	15
4.10.	Densidad de partículas (DP)	16
4.11.	Estabilidad estructural del suelo (EE).....	16
4.12.	Curvas de retención de humedad	17
4.13.	Diseño experimental y análisis estadístico de los datos	17
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
5.1.	Efecto del tipo de cosecha en la resistencia a la penetración y al corte del suelo.	19
5.2.	Efecto del tipo de cosecha de caña sobre las variables físicas del suelo.	23
5.3.	Efecto del tipo de cosecha de caña en variables hidropedológicas del suelo.	26
5.4.	Variación de la resistencia a la penetración con la profundidad del suelo”	29
5.5.	Distribución espacial de la resistencia a la penetración (MPa).....	32
5.6.	Relación entre la compactación y otras variables físicas del suelo.....	36
5.7.	Regresiones múltiples entre variables estudiadas	36
5.8.	Modelizado de la resistencia a la penetración con el penetrómetro “Chatillón”	37
5.9.	Modelizado de la densidad aparente.....	38
6.	CONCLUSIONES	39
7.	RECOMENDACIONES	40
8.	LITERATURA CITADA.....	41
9-	ANEXOS	46

Cuadro 1.	Información climática en fincas de estudio	6
Cuadro 2.	Especificaciones técnicas del tractor e implemento según labor a realizar (CoopeAgri R.L. 2022)	8
Cuadro 3.	Plan de fertilización para el cultivo de caña de azúcar. CoopeAgri R.L. 2022	9
Cuadro 4.	Fincas seleccionadas para la realización del estudio (CoopeAgri R.L. 2021).....	13
Cuadro 5.	Tipos de cosecha y criterios para su definición. (CoopeAgri R.L. 2021).....	13
Cuadro 6.	Análisis de varianza para evaluar el efecto del tipo de cosecha y la profundidad del suelo en tres variables asociadas a la compactación del suelo en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).	19
Cuadro 7.	Valores promedio de tres variables asociadas a la compactación del suelo en función del efecto del tipo de cosecha, la profundidad del suelo, y su interacción en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2021).	21
Cuadro 8.	Análisis de varianza para evaluar el efecto del tipo de cosecha y la profundidad del suelo en cuatro variables físicas del suelo en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2021).	23

Cuadro 9. Valores promedio de cuatro variables físicas del suelo en función del efecto del tipo de cosecha, la profundidad del suelo, y su interacción en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).	24
Cuadro 10. Análisis de varianza para evaluar el efecto del tipo de cosecha y la profundidad del suelo en cuatro variables hidropedológicas en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).	27
Cuadro 11. Valores promedio de cuatro variables hidropedológicas en función del efecto del tipo de cosecha, la profundidad del suelo, y su interacción en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).	28
Cuadro 12. Análisis de varianza para evaluar el efecto del tipo de cosecha y la profundidad del suelo en la resistencia a la penetración (determinada hasta 80 cm) en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).	29
Figura 1 Variación de la resistencia a la penetración evaluada en los tres tipos de cosecha con la profundidad del perfil del suelo, evaluada hasta 80 cm de profundidad. Pérez Zeledón y Buenos Aires. 2012. Barras de error estimadas como error estándar. HSD = diferencia honestamente significativa estimada para la separación de las medias en el factor profundidad, mediante la prueba HSD Tukey. Líneas discontinuas negras y rojas representan de forma respectiva los límites inferiores de suelo moderadamente compactado y suelo compactado de acuerdo con lo descrito por Camacho et al. (2015).	31
Figura 2. Distribución espacial de resistencia a la penetración (MPa) a 30 cm de profundidad en Finca 1. La Ceniza, Pérez Zeledón. Clasificación de resistencia a la penetración propuesta por Soil Survey Staff (1993).	33
Figura 3. Distribución espacial de RP (MPa) a 30 cm de profundidad en Finca 2. La Ceniza, Pérez Zeledón. Clasificación de resistencia a la penetración propuesta por Soil Survey Staff (1993).	34
Figura 4. Distribución espacial de RP (MPa) a 30 cm de profundidad en Finca 3. San Pedro, Pérez Zeledón. Clasificación de resistencia a la penetración propuesta por Soil Survey Staff (1993).	35
Figura 5. Distribución espacial de RP (MPa) a 30 cm de profundidad en Finca 4. Volcán, Buenos Aires. Clasificación de resistencia a la penetración propuesta por Soil Survey Staff (1993).	35
Figura 6. Correlación entre las variables asociadas a la compactación, medidas en 4 fincas cañeras propiedad de CoopeAgri R.L	36
Anexo 1. Medición con el Penetrómetro de Chatillón a 30 cm de profundidad	46
Anexo 2. Medición con Penetrologger	46
Anexo 3. Tabulación de resultados	47
Anexo 4. Resultados Penetrologger	47
Anexo 5. Análisis estadístico	48
Anexo 6. Matriz de correlaciones	48
Anexo 7. Matriz de correlaciones	49

RESUMEN

Se realizó un estudio observacional con el fin de analizar las propiedades físicas del suelo y su relación con el grado de compactación que presentaba el mismo, de acuerdo con el tipo de cosecha en el cultivo de caña de azúcar. El trabajo se llevó a cabo en tres fincas adscritas a CoopeAgri R.L ubicadas en los distritos de San Isidro y San Pedro del Cantón de Pérez Zeledón, San José y en el distrito de Volcán del cantón del cantón de Buenos Aires, Puntarenas. Las modalidades de cosecha en el área de estudio corresponden a: 1) manual (MA), 2) mecanizado (ME) y 3) semi-mecanizado (SM). Las determinaciones se realizaron en doce lotes ubicados en tres fincas que fueron, “La Ceniza” (*Plinthic Kandiuustox*), “El Porvenir” (*Anionic Acrustox*) y “El Guayacán” (*Anionic Acrustox*). En cada una de las fincas se ubicaron lotes correspondientes a los tres tipos de cosecha y se realizaron diversas mediciones de suelo a dos profundidades (0 y 30 cm); Las variables determinadas fueron resistencia a la penetración con penetrómetros “Chatillón” (RP-CH) y “Penetrologger”(RP-P), Resistencia al corte tangencial (RC), humedad gravimétrica (HG) y volumétrica (HV), densidad aparente (DA), densidad de partículas (DP), textura (%arena, limo y arcilla), estabilidad estructural de los agregados (EE) y las curvas de desabsorción de humedad. Para el análisis de los datos se realizó un análisis de varianza “Modelo Lineal” mediante el programa estadístico “R” y posteriormente un análisis de separación de medias con la prueba HSD Tukey con un $p < 0.05$. También se realizó un análisis de correlación entre las variables mediante el método de correlación simple de “Pearson”. Se encontró que en la cosecha mecanizada (ME) se obtuvo el mayor valor promedio de resistencia a la penetración en RP-CH (0,5 MPa contra 0,42 en MA y 0,48 en SM); y que dicha variable también presentó diferencias asociadas a la profundidad, donde los valores de RP-P y RP-CH fueron mayores en la profundidad de 30 cm (1,29 y 0,53 MPa respectivamente). Las variables RP-P y RP-CH presentaron un índice de correlación de 0,69; mientras que DA correlacionó con las variables de %limo ($r=0,73$), porosidad total ($r=-0,95$) y espacio aéreo ($r=-0,65$). A pesar de que el historial de manejo fue similar, se encontraron diferencias significativas entre las fincas, particularmente en las variables de RP-CH y RP-CH (lo mismo). Se determinó que el comportamiento de variable RP-CH se pudo explicar en un 70% mediante un modelo de regresión múltiple que incluya las variables porosidad total, estabilidad estructural, contenido de limo y humedad volumétrica. Pese a que se encontraron diferencias significativas en las variables evaluadas según la modalidad de cosecha, por profundidad y por finca, la magnitud de los valores detectados en el presente trabajo no permite sugerir un estado severo de compactación en las áreas estudiadas.

1. INTRODUCCIÓN

Según la medición cartográfica del 2016 realizada por LAICA (DIECA), en Costa Rica se cultivan 64.250 has de caña de azúcar, distribuidas en seis zonas cañeras que son Región Sur, Región Turrialba, Región Norte, Región Valle Central, Región Pacífico Central y Región Pacífico Norte (Angulo 2013). Su producción requiere un uso relativamente intenso de maquinaria, tanto en labores de preparación de suelos como de atención al cultivo y posteriormente la cosecha. Con respecto a esto último, Bolaños *et al.* (2006), menciona que el incremento en los costos de producción y la escasez de mano de obra han motivado que gran parte del área de caña en la región de Guanacaste y Puntarenas se sustituya sistemáticamente la cosecha manual por la cosecha mecanizada. Con respecto al tipo de cosecha Subirós 2000, menciona que esta puede efectuarse de 3 formas distintas: Completamente Manual, Semi-mecanizada o Totalmente Mecanizada. Lo anterior es importante de analizar, ya que permite deducir que los suelos expuestos a un tipo de labranza tan intenso podrían llegar a presentar serios problemas de compactación.

Martínez (1998), describe que las propiedades físicas de los suelos en las regiones tropicales y subtropicales son a menudo de gran utilidad para la evaluación de la productividad y otros aspectos de interés en el manejo del cultivo; No obstante, el estudio del estado físico del suelo ha demostrado la relación que tiene el mismo con el crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar. Por ejemplo, se ha demostrado la relación negativa existente entre la densidad aparente y el peso de las raíces, mientras que otros autores han determinado una correlación positiva y significativa entre la porosidad y espacio aéreo y el rendimiento de la caña de azúcar (Bolaños *et al.* 2006).

Al respecto Forsythe (1975), sugiere que el estudio de la física del suelo está dividido en el conocimiento de sus propiedades y de sus procesos, en función de los cuatro factores físicos del suelo que determinan el crecimiento vegetal. Estos factores son la succión del agua en el suelo, la aireación, la temperatura y finalmente la resistencia mecánica a la penetración de las raíces.

Una manifestación evidente del aumento de la resistencia a la penetración de las raíces es la compactación del suelo, la cual consiste en el incremento en la masa de sus componentes

sólidos por unidad de volumen, y la consecuente disminución del espacio poroso total, en particular de los macroporos. Este fenómeno va acompañado de la destrucción de la estructura original, así como de un aumento en la densidad aparente, un aumento en la resistencia a la penetración y al corte (Henríquez y Cabalceta 2012).

Un suelo se considera compactado cuando su macroporosidad es tan baja que restringe la aireación en el suelo, de tal forma que impide el adecuado desarrollo y penetración de las raíces, disminuyendo asimismo la infiltración y el drenaje del agua en el suelo (Jaramillo 2002).

El objetivo del presente trabajo se basó en estudiar las variables físicas del suelo, su distribución espacial y su relación con la compactación en fincas productoras de caña de azúcar en el cantón de Pérez Zeledón.

2. OBJETIVOS

2.1.Objetivo general

Evaluar las características físicas del suelo y su relación con la compactación en fincas cultivadas de caña de azúcar con distintos historiales de manejo de cosecha ubicadas en cuatro localidades de Pérez Zeledón, Costa Rica.

2.1.1. Objetivos específicos

- Determinar a través de dos instrumentos de medición directa el grado de compactación del suelo y el potencial efecto de las características físicas del suelo y el manejo del cultivo en la magnitud de dicho fenómeno.
- Estudiar las variables físicas de suelo en tres fincas cañeras de Pérez Zeledón localizadas en cuatro sitios con condiciones climáticas diferentes.
- Identificar la distribución espacial de las variables de resistencia a la penetración y densidad aparente mediante mapas de interpolación.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1.Generalidades del cultivo

3.1.1. Origen

La caña de azúcar es nativa de las regiones subtropicales y tropicales del sudeste asiático. Alejandro Magno la llevó de la India hacia Persia, mientras los árabes la introdujeron en Siria, Palestina, Arabia y Egipto, de donde se extendió por todo el continente africano y a la Europa meridional. A finales del siglo XV Cristóbal Colón la llevó a las islas del Caribe, de allí fue llevada a toda América Tropical y subtropical (Díaz y Portocarrero 2002).

3.1.2. Botánica

La caña de azúcar es una gramínea tropical, un pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz en cuyo tallo se forma y acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en el ingenio se forma el azúcar. La sacarosa es sintetizada por la caña con la energía tomada del sol durante la fotosíntesis, constituye el cultivo de mayor importancia desde el punto de vista de la producción azucarera, además representa una actividad productiva y posee varios subproductos, entre ellos la producción de energía eléctrica derivada de la combustión del bagazo, alcohol de diferentes grados como carburante o farmacéutico (Díaz y Portocarrero 2002).

3.1.3. Requerimiento de clima

El cultivo de caña de azúcar requiere altas temperaturas durante el período de crecimiento y bajas temperaturas durante el período de maduración (MAG 1991). Mientras mayor sea la amplitud entre las temperaturas máximas y mínimas durante la maduración, mayores serán las posibilidades de obtener jugos de alta pureza y un mayor rendimiento de azúcar. Las temperaturas óptimas para diferentes etapas del desarrollo de este cultivo son: para la germinación entre 32-y 38 °C, para el macollamiento 32 °C y para el crecimiento 27 °C .

La precipitación anual adecuada para este cultivo es de 1.500 a 1700 mm anuales, cantidades inferiores o superiores podrían generar disminución en la producción. La caña necesita la mayor disponibilidad de agua en la etapa de crecimiento y desarrollo, durante el período de maduración esta cantidad debe reducirse, para restringir el crecimiento y lograr el

acumulo de sacarosa. La luz es uno de los factores básicos para la producción de azúcares por lo que su intensidad es muy importante (MAG 1991; García 2020).

3.1.4. Sistema radicular

La caña de azúcar concentra alrededor del 60% de las raíces en los primeros 20 cm de profundidad, luego de lo cual se reduce notoriamente su aparición conforme aumenta la profundidad del suelo. En adición, más del 85% del peso total de la raíz se ubica en los primeros 40 cm de profundidad (Subirós 2000). Con base en lo anterior, es de esperar que las condiciones físicas, químicas y microbiológicas imperantes a esta profundidad de suelo, tendrán un efecto directo sobre el crecimiento del cultivo.

3.2.Descripción del área de estudio

3.2.1. Clima

La información meteorológica fue generada por estaciones propiedad de CoopeAgri R.L colocadas en las fincas de estudio. Para efectos del presente estudio se le denomina Finca La Ceniza, Finca El Porvenir (ubicadas en el cantón de Pérez Zeledón, San José); y Finca El Guayacán ubicada en el cantón de Buenos Aires, Puntarenas.

3.2.2. Suelo

La caña de azúcar se adapta a gran variedad de tipos de suelos y tolera un rango de pH de 5.5 a 7.8. Sin embargo, los suelos con condiciones ideales para el desarrollo del cultivo son: francos, profundos y bien drenados, estos deben tener un pH de 7 (García 2020).

De acuerdo con Chaves (2017), del área sembrada de caña de azúcar en el país se podría categorizar por orden de suelo de la siguiente manera: Inceptisol (36,93%), Vertisol (17,64%), Ultisol (17,64%), Mollisol (13,08%), Entisol (7,59%), Andisol (6,91%), Alfisol (0,17%), Histosol (0,04%).

Camacho *et al.* (2021) a través de un estudio de génesis y clasificación de suelos en fincas cañeras de Pérez Zeledón y Buenos Aires encontraron la presencia de Oxisoles. Estos suelos se asocian con antiguos abanicos aluviales del periodo Cuaternario, cuya estabilidad estructural de geoforma en adición a mecanismo de meteorización asociados con cambios en el clima de esta región.

Cuadro 1. Información climática en fincas de estudio

Finca	Años	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)		
			Min.	Med.	Max.
EL Guayacán	2018	2703	21.0	24.7	31.5
	2019	2231	21.2	25.3	32.2
	2020	3372	21.3	25.2	32.2
Porvenir	2018	2858	19.5	23.1	29.3
	2020	3263	19.7	23.2	29.3
La Ceniza*	2014	2476	17.1	22.9	30.7
	2015	1865	17.5	23.3	30.8
	2016	1842	19.0	23.4	29.9

*La Ceniza no registra datos a partir del 2017

3.3. Prácticas de manejo del cultivo: CoopeAgri R.L.

3.3.1. Selección de semilla

La selección del material vegetativo procedente de plantas de cultivo de tejidos (plantas *in vitro*) o semilla con tratamiento hidrotérmico que garantizan pureza varietal, vigor en su germinación y sanidad, con una edad de cosecha de entre 7 y 10 meses, la cual se propaga o siembra en trozos (esquejes) de 3 yemas.

3.3.2. Preparación de suelo

Es una de las labores de mayor importancia en el establecimiento del cultivo de caña de azúcar; el objetivo principal es “descompactar” el suelo y reducir la presencia de malezas anuales y perennes. En un suelo bien preparado el sistema radical tiene las condiciones adecuadas para desarrollarse y explorar la rizosfera dando a la planta mayor capacidad para absorber los nutrientes y lograr un mayor crecimiento que luego se reflejará en mayor producción y más años de buena productividad. En adición, un buen sistema radical propicia una buena estructura de anclaje a la planta.

Se recomienda iniciar las labores de mecanización en época seca procurando realizarlas con al menos un mes de anticipación a la siembra y que sean distribuidas en el tiempo para lograr un adecuado control de malezas y plagas.

De acuerdo con Valverde (2021) las principales labores de preparación de suelo para la siembra de caña de azúcar son:

- a. **Primera rastrea o rastrea rompedora:** Se utiliza principalmente para destruir las cepas viejas en el caso de las renovaciones, además de uniformar el terreno y controlar malezas perennes presentes en el momento de su realización. Cuando se utiliza el arado de discos o vertedera no se utiliza este implemento.
- b. **Arado:** Según la zona donde se establezca el cultivo se puede optar por el arado de cinceles, discos o vertederas, este último es recomendado en los sectores donde históricamente han existido problemas con “jobotos” (*Phyllophaga* sp) o existan condiciones de alta pedregosidad y troncos. En forma general, se recomienda el uso de cinceles los cuales cumplen con el objetivo de “descompactar” el suelo y minimizan la exposición de los horizontes inferiores del suelo a la escorrentía provocada por el desfogue de pluviales. El arado debe profundizarse entre 60-80 cm garantizando así condiciones de suelo adecuadas para el desarrollo del cultivo.
- c. **Segunda Rastrea:** Utilizada para afinar la superficie del terreno al destruir terrones grandes o agregados de suelo, facilitando la posterior labor de siembra y favoreciendo también la germinación de la caña. Esta labor también cumple una importante función en el control de malezas, se recomienda realizarla en un periodo cercano al surcado.
- d. **Surcado:** Esta labor se realiza tratando de formar curvas a nivel en contorno a la topografía del terreno con una pendiente no mayor al 2%, para disminuir la escorrentía, a una profundidad entre 30 y 40 cm y a los pocos días de la siembra. En las zonas más secas o de suelos con menor fertilidad donde por naturaleza la caña presenta menor crecimiento se puede utilizar una distancia de siembra de 1.30 a 1.40 metros entre surco y en los lugares donde se presenta mayor crecimiento o suelos de mayor fertilidad o en suelos de origen aluvial de 1.40 a 1.50 metros entre surco.

El siguiente cuadro brinda la información necesaria de las necesidades de equipos, así como de potencia requerida para llevar a cabo distintas funciones en la preparación del suelo.

Cuadro 2. Especificaciones técnicas del tractor e implemento según labor a realizar (CoopeAgri R.L. 2022)

Labor	Criterios de calidad	Accesorio	Capacidad de Tractor
Rastrear-romper	Pasar en forma uniforme-levantar cepas de caña-malezas-ajustar ángulos de discos para lograr este objeto	Rastra de 18 a 20 discos de 24"	\geq a 130 HP *
Arar-Cincelar	Profundidad entre 50-80 cm	Cinceles de 5 Picos	\geq a 150 HP
Rastrear-Afinar	Pasar en forma uniforme-Mullir suelo-afinar-nivelar ajustar ángulos de discos para lograr este objeto	Rastra de 18 a 20 discos de 24"	\geq a 120 HP
Surcar	Trazado a contorno del suelo. Pase a doble surco	Surcador doble	\leq a 100 HP

*HP: Horsepower

3.3.3. Aplicación de Abono Orgánico

Otra práctica realizada para renovaciones de cañales es la aplicación de materia orgánica, esto debido a que las condiciones de los suelos en Pérez Zeledón y Buenos Aires son limitantes tanto desde el punto de vista de fertilidad como en su contenido de materia orgánica. Por tal razón, se adiciona en el momento del establecimiento al fondo del surco una dosis de 10 Tm ha⁻¹ de un compost (broza-cachaza; relación 1:1).

3.3.4. Establecimiento

El establecimiento o siembra se realiza a chorro de tres cañas con un traslape de 15 cm. Es importante garantizar una cantidad de yemas sanas (16 a 20 yemas por metro lineal), con la finalidad de obtener una germinación uniforme. La segmentación de la semilla o “pica” se realiza en trozos de tres yemas, cortando totalmente las cañas. Una vez aplicado el fertilizante, así como todas las prácticas mencionadas anteriormente se debe tapar la semilla para evitarle daños, con una capa de suelo suelto no mayor a 5 cm de espesor que permita una buena germinación.

3.3.5. Fertilización

La fertilización alta en fósforo se efectúa durante el establecimiento a través de la aplicación de fosfato monoamónico al fondo del surco a una dosis de 6,5 sacos (150 Kg P₂O₅ ha⁻¹). El manejo de la nutrición del cultivo se resume en el cuadro 3.

Cuadro 3. Plan de fertilización para el cultivo de caña de azúcar. CoopeAgri R.L. 2022

	Producto	Dosis (ha⁻¹)	Época de aplicación
Encalado	Carbonato de Calcio Cal dolomita	Según análisis de suelo o en su defecto 1.5-2 ton/ha	Primer pase de rastra para incorporarlo
Abono Orgánico	El Sembrador®	10 ton/ha	En la siembra al fondo del surco
I Fertilización	Fórmula 11-52-0 o 18-46-0	300 kg fórmula completa	A la siembra
II Fertilización	17-2-25-5-6.3 S - 0.35 Zn	250 kg de fórmula completa	35 DDS*
III Fertilización	17-2-25-5-6.3 S - 0.35 Zn	250 kg de fórmula completa	90 DDS

*DDS: días después de la siembra

3.3.6. Subsolado

El subsolado se realiza luego del tercer año y sobre todo en suelos muy compactados. Esto se hace con la finalidad de podar las raíces viejas, estimular el crecimiento de las nuevas y dar oxigenación, “descompactar” el terreno. Para esta labor se utiliza el arado de cinceles a una profundidad de 30 – 40 cm con un tractor de una potencia mayor a 100 HP.

La mejor condición para realizar el subsolado es cuando el suelo se encuentra ligeramente húmedo, y el rebrote tiene menos de 40 cm de altura. Con esta labor se mejora la infiltración del agua de lluvia, reduciendo la erosión y desfogue de agua de lluvia principalmente en suelos arcillosos y con pendientes pronunciadas

3.4. Definición de compactación y causas que la originan

Henríquez *et al.* (2011), define la compactación como un empaquetamiento de las partículas que constituyen la fracción sólida, lo que se traduce en una disminución del espacio poroso total y consecuentemente, en un aumento de la densidad aparente. Que se puede describir como un incremento de la resistencia mecánica o dureza del suelo, la cual es posible medirla con un penetrómetro.

De acuerdo con Becerra *et al.* (2005), la compactación del suelo es un fenómeno natural en el cual se produce un incremento en la masa de las partículas que constituyen la fracción sólida por unidad de volumen del suelo, lo que se traduce en una disminución del espacio poroso total y consecuentemente en un aumento de la densidad aparente; lo anterior se

plantea contrario a la creencia de que la compactación se origina únicamente por el tráfico de maquinaria, a un contenido elevado de humedad edáfica.

Según Lozano *et al.* (2013), el riesgo de compactación en suelos agrícolas depende entre de las tensiones mecánicas impuestas por el tráfico de vehículos durante las épocas de siembra y cosecha en las áreas de producción. Por lo tanto, conocer la magnitud y distribución de esas tensiones se convierten en una herramienta útil en los estudios de compactación de suelo. Por su parte, Bangita y Rajashekhar (2012), enfatizan que el uso de máquinas con cargas por ejes pesados y su tráfico en el campo afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos sembrados con caña de azúcar; dicha afectación se puede dar en menor o mayor grado dependiendo de las condiciones climáticas que prevalezcan en ese momento.

Como causas de compactación pueden citarse las siguientes (Amézquita y Chávez 1999):

- a) Consolidación natural del suelo durante el proceso de formación
- b) Pisoteo por animales y el ser humano
- c) Contracción de los suelos debido a secamiento
- d) Deformaciones causadas por las llantas de tractores y por implementos agrícolas
- e) Impacto de gotas de agua lluvia, riego por aspersión y riego por inundación.

La textura es otra de las propiedades físicas del suelo que están ligadas al proceso de compactación; se ha comprobado que suelos de texturas medias a gruesas, cuando se aplican presiones altas se logra obtener valores más altos de densidad aparente que en suelos de texturas arcillosas, especialmente cuando los contenidos de limo y/o arena fina son abundantes. Otros factores que influyen en la compactación de los suelos son bajos contenidos de materia orgánica, suelos sin cobertura, altas concentraciones de sodio y de otros agentes dispersantes en el suelo, el contenido de humedad del suelo, el manejo de los suelos, los sistemas de cultivo y las condiciones climáticas (Amézquita y Chávez 1999).

3.5. Medición de la compactación del suelo

Lozano *et al.* (2013), mencionan que la compactación del suelo en plantaciones de caña de azúcar en Brasil, generalmente se monitorea mediante el análisis de la densidad aparente y la prueba del penetrómetro de cono, sin embargo, estos autores indican que estos métodos no son económicamente viables para grandes áreas de cultivo.

Por su parte Morejón *et al.* (2016), estudiaron el efecto de la cosecha mecanizada en el grado de compactación del suelo a través del análisis de las características físico-mecánicas antes y después del ingreso tanto de la cosechadora como del transporte de la caña. Estas características se basaron principalmente en densidad aparente, porosidad total y espacio aéreo. Por otro lado, Lozano *et al.* (2013), realizaron un estudio con el objetivo de simular los esfuerzos transmitidos al suelo por la mayoría de los vehículos que normalmente transportan la caña de azúcar en el periodo de cosecha, utilizando el modelo SoilFlex con diferentes densidades y condiciones de humedad del suelo de manera que mediante soluciones analíticas. Los resultados obtenidos en dicho estudio permiten distinguir cuál vehículo es el mejor para evitar la compactación del suelo.

Otro estudio del efecto de la compactación del suelo sobre el rendimiento de la caña de azúcar se realizó en Nueva Guinea. En este trabajo Bangita y Rajashekhar (2012), evaluaron los cambios en la densidad aparente, la resistencia a la penetración del suelo y las tasas de almacenamiento e infiltración de agua, en función de un tratamiento para la disminución de la compactación del suelo mediante operaciones de labranza realizadas en las zonas compactas donde se da el tráfico de las ruedas; En adición se evaluó el efecto de tales prácticas de labranza sobre el rendimiento de la caña de azúcar.

Forsythe *et al.* (2005), estudiaron el efecto de la compactación en el rendimiento del maíz, para lo cual realizaron curvas de rendimiento del cultivo en función de diferentes grados de compactación. En este estudio se realizó una caracterización completa de las variables químicas y físicas del suelo; entre las variables físicas se estudiaron la resistencia a la penetración (RP) a 10 y 30 cm de profundidad, la densidad aparente (DA) por el método de volúmenes cilíndricos conocidos, curvas de desabsorción y conductividad hidráulica, encontrando una relación directa de estas variables con el rendimiento de maíz.

En Argentina Elissondo *et al.* (2001), evaluaron algunas propiedades físicas del suelo luego de la introducción de sistemas de labranza verticales en un suelo bajo siembra directa (maíz y trigo). Para ello, se trabajó con la prueba de Proctor, RP con el penetrómetro Soil Test y curvas de humedad. A diferencia de los estudios citados en los párrafos anteriores, en este trabajo se obtuvieron los valores de estabilidad estructural y también se consideró la temperatura del suelo.

3.6. Instrumentos de medición resistencia a la penetración

El penetrómetro modelo “Chatillón” es clasificado como un penetrómetro estático, según Forsythe (1975), este instrumento ha sido usado en muchos estudios y brinda valores de referencia para representar las variaciones en la RP en el suelo. Las lecturas del penetrómetro “Chatillón” son dadas en unidades de Kg cm^{-2} y esta lectura está en función de la relación que existe entre el diámetro del pistón (5 mm) y la resistencia del resorte que tiene en el interior (Henríquez *et al.* 2012).

Otro instrumento utilizado es el penetrómetro Penetrologger marca “Eijkelkamp” que permite realizar estudios de resistencia en el perfil del suelo, de esta manera se puede conocer la RP en los primeros 80 cm del perfil con la ventaja de que la lectura de RP en MPa se da en cada cm a lo profundo del perfil del suelo.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización del estudio

El presente estudio se realizó en 4 fincas dedicadas al cultivo de caña de azúcar cultivadas con las variedades RB 98-710, Laica 07-801 y Laica 04-809. Dichas fincas son propiedad de CoopeAgri R.L y se ubican en los cantones de Pérez Zeledón, San José y Buenos Aires de Puntarenas. La identificación de las fincas y otros atributos de estas se detalla en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Fincas seleccionadas para la realización del estudio (CoopeAgri R.L. 2021).

Nombre de Finca	Área (Ha)	Denominación	Ubicación			Altitud
			Distrito	Cantón	Provincia	m.s.n.m
La Ceniza*	60	F1 y F2	San Isidro	Pérez Zeledón	San José	700
El Porvenir	130, 24	F3	San Pedro	Pérez Zeledón	San José	600
Guayacán	166, 22	F4	Volcán	Buenos Aires	Puntarenas	370

* En la finca La Ceniza se establecieron dos sub-fincas: F1 y F2.

4.2. Criterios de selección de las fincas

Se tomó como criterio de selección las condiciones homogéneas del suelo, la topografía dentro de cada lote y entre fincas, así como la etapa fenológica de la caña de azúcar. En cada una de las fincas se identificaron tres modalidades de cosecha de la caña: manual (MA), mecanizado (ME) y semi-mecanizado (SM). La descripción de dichas modalidades se detalla en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Tipos de cosecha y criterios para su definición. (CoopeAgri R.L. 2021).

Tipo de cosecha	Denominación	Descripción	Condiciones de pendiente del terrero
Manual	MA	Corta y carga manual	Mayor a 15%
Mecanizado	ME	Cosechadora + cargadora	Menor 5%
Semi-Mecanizado	SM	Corta manual + cargadora	Entre 5 - 15%

4.3.Unidades experimentales

La unidad de muestreo consistió en un lote sembrado con caña, con área efectiva que varió entre 1 y 3.5 Ha dependiendo de la finca. Dicho lote correspondió a un tipo de cosecha (MA, ME, SM) dentro de una misma finca, por lo que se obtuvo tres lotes por finca, para un total de doce lotes o unidades experimentales.

4.4.VARIABLES DE MEDICIÓN

Una vez seleccionadas las unidades experimentales, en ellas se establecieron los sitios de medición para las diferentes mediciones o determinaciones de variables de compactación del suelo, variables físicas del suelo, e hidropedológicas, las cuales se indican a continuación:

4.5.Resistencia a la penetración con Penetrologger (RP-P)

En cada uno de los lotes se realizaron 20 determinaciones con el penetrómetro de sonda marca “Eijkelkamp (Penetrologger Eijkelkamp, EN Giesbeek, The Netherlands). Estas determinaciones se realizaron en el área entreplantas midiendo la resistencia a la penetración a una profundidad de 0 a 80 cm y con una velocidad de penetración de 3 cm s^{-1} . Esta velocidad de penetración se logró mediante la previa calibración del usuario. En este estudio se utilizó el cono de 2 cm^2 para introducir la sonda en el suelo. La unidad de medición de este penetrómetro fue el Mega Pascal (MPa). En forma adicional, en todos los puntos donde se introdujo el penetrómetro, se midió humedad volumétrica con *in situ* mediante un sensor de humedad (MP306, ICT, Armidale, Australia) del tipo Time-Domain Reflectometry (TDR) a lo largo de la profundidad evaluada, y se tomó las coordenadas en el punto de muestreo.

La distribución de los puntos de medición dentro de cada unidad de muestreo fue sistemática. Para ello se dividió el lote por número de surcos en cuatro partes iguales y se ingresó en cada una de esas divisiones en línea recta con el instrumento realizando cinco determinaciones por línea. En cada punto de medición se tomó las coordenadas geográficas mediante un GPS.

4.6. Penetrómetro de Chatillón (RP-CH)

También se midió la resistencia a la penetración del suelo con el penetrómetro “Chatillón” (Type 719, Chatillón, New York, USA), siguiendo los lineamientos de Lowery y Morrison (2002). Se ubicaron tres puntos dentro de cada sitio de determinación escogidos de forma aleatoria dentro del área entreplantas, en los cuales se realizaron tres mediciones (tres repeticiones) y a dos profundidades (0 y 30 cm). Las lecturas de que brinda este penetrómetro tienen unidades de Kg cm^{-2} , las cuales se multiplicaron por el factor 0.0981 para transformarlas a MPa y de esta manera poder compararlas con las obtenidas con el penetrolgger. Adicionalmente, en cada punto de estos se recolectó una muestra para la determinación de humedad gravimétrica.

4.7. Resistencia al corte tangencial (RC)

En los mismos tres puntos seleccionados para las mediciones con el RP-CH, se tomaron mediciones de resistencia del suelo al corte (RC) con el uso de las cuchillas de torsión (Torvane CL-600, Soiltest Inc, IL, USA), siguiendo los lineamientos descritos por Forsythe (1975). Para las mediciones, se utilizó la cuchilla estándar (2.5 cm de diámetro). En la medición superficial (0 cm) y a los 30 cm de profundidad se introdujo la cuchilla y se realizaron 3 mediciones en cada punto para obtener un valor promedio de cada punto.

4.8. Densidad aparente (DP)

También, se determinó la densidad aparente del suelo siguiendo los lineamientos descritos por Forsythe (1975) y Grossman y Reinsch (2002). En cada uno de los puntos de muestreo, se tomaron muestras indisturbadas a dos profundidades (superficial y a 30 cm) con cilindros de acero inoxidable de 5,4 cm de diámetro y 6,4 cm de altura.

4.9. Humedad del suelo

La determinación de humedad gravimétrica (HG) se llevó a cabo en el laboratorio con la misma muestra usada para la densidad aparente, siguiendo las pautas descritas por Forsythe (1975) y Topp y Ferré (2002). Con el valor de HG y su respectiva densidad aparente, se calculó el contenido volumétrico de humedad del suelo (HV) de acuerdo con y Topp y Ferré (2002).

4.10. Densidad de partículas (DP)

Para cada una de las muestras de densidad aparente, se homogenizó la masa del suelo mediante un molino de suelos y se tamizó a un diámetro máximo de partícula de 2 mm (fracción tierra fina). Con esta masa de sólidos, se determinó el correspondiente valor de densidad de partículas, siguiendo los lineamientos descritos en Forsythe (1975) para el método de volumen desplazado en un frasco volumétrico calibrado.

Con los valores de densidad aparente y de partículas, se calculó el valor de porosidad total (PT) para cada muestra procesada de acuerdo con lo descrito por Forsythe (1975). En adición, con los valores de humedad volumétrica (HV) y porosidad total (PT) se calculó el espacio aéreo sustrayendo a PT el valor de HV (Forsythe 1975).

4.11. Estabilidad estructural del suelo (EE)

La cuantificación de la estabilidad estructural se realizó mediante una variante de la metodología de cribado en húmedo descrita por Nimmo y Perkins (2002) mediante el equipo **Wet Sieving Apparatus**, (Eijkelkamp, Giesbeek, The Netherlands). Para esta determinación se siguieron los pasos descritos por el manual de este equipo, partiendo de muestras secadas al aire y homogenizadas mediante un tamiz de 2 mm. Se tomaron 4 g y se colocaron en un tamiz de un diámetro de apertura de 60 mesh (0.25 mm) que viene con el equipo. Los tamices con su respectiva muestra de suelo se introdujeron en los orificios del equipo y en su parte inferior se colocaron los cilindros metálicos colectores de sedimento (previamente pesados). Posteriormente se les agregó agua desionizada para saturar los bordes del tamiz que contenía la muestra de suelo.

Una vez listas las muestras en el equipo, se procedió a activarlo durante 3 minutos, en los cuales el aparato realizó un movimiento oscilatorio de arriba hacia abajo, enjuagando la muestra de suelo en el agua del colector a una frecuencia de 34 veces por minuto. La distancia del movimiento desde la base (el fondo del cilindro colector) hasta el punto más alto de la oscilación es de 1,3 cm. Concluidos los 3 minutos, los tamices se dejaron escurrir y se colocaron los cilindros metálicos (los cuales contenían agua más lo materiales desprendidos por el tamiz) en una bandeja. Estos cilindros se llevaron a la estufa durante 24 horas a 110°C para determinar la masa del suelo seco en el colector, la cual se determinó por diferencia.

El procedimiento anteriormente descrito se realizó una vez más, pero se reemplazó el agua desionizada con una solución dispersante a base de sodio (Hexametáfosfato de Sodio e Hidróxido de sodio). Al determinar la masa de suelo en el colector, se sustrajo 0,2 gramos al resultado de dicha masa, para corregir por el remanente de sodio en la muestra según lo recomendado por el fabricante.

La fracción estable del suelo se calculó luego de dividir la masa obtenida en los cilindros metálicos con la solución dispersante entre la suma de las masas obtenidas en la solución dispersante y la masa obtenida con el método del agua.

4.12. Curvas de retención de humedad

También en cada uno de los puntos de muestreo dentro de la unidad experimental, se colectaron muestras no disturbadas de suelo con anillos de acero inoxidable (5 cm de diámetro y 1 cm de altura) a las dos profundidades evaluadas. Dichas muestras se llevaron al laboratorio para el posterior análisis de retención de humedad a dos puntos (33 y 1500 kPa), siguiendo los lineamientos descritos por Forsythe (1975) y Dane y Hopmans (2002).

4.13. Diseño experimental y análisis estadístico de los datos

El experimento se estableció a nivel de campo, en un arreglo factorial con diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, donde cada finca representó un bloque. Los factores incluidos fueron los tres tipos de cosecha de caña (T), la profundidad del suelo evaluada (P) y la interacción de ambos factores (T x P).

En dicho diseño, se evaluó la respuesta de las variables de compactación del suelo (resistencia a la penetración medida con penetrológico y Chatillón y al corte) las variables físicas (densidad aparente, porosidad, espacio aéreo, y estabilidad de agregados) e hidropedológicas (capacidad de campo, marchitez permanente, agua útil y humedad volumétrica medida con TDR) asociadas a los dos factores que fueron el tipo de cosecha y la profundidad, así como la interacción entre ellos. Para ello se realizó un ANOVA Factorial del tipo "Modelo Lineal" (LM), el cual incluyó los factores T, P y su interacción T x P. Cuando algún factor presentó significancia estadística ($p\text{-value} < 0.05$), se separaron las medias por el método de HSD Tukey. Dichos análisis se realizaron mediante los programas estadísticos R Studio "Prairie Trillium" R versión 3.3.2 (2016-10-31) "Sincere Pumpkin Patch" (R Studio Team, 2015) e Infostat versión 2020 (Di Rienzo et al. 2020).

Para las variables de resistencia a la penetración medida con el penetrómetro de Chatillón (RP-CH) y la densidad aparente del suelo (DA), se desarrollaron modelos de regresión lineal múltiple a partir de variables de compactación del suelo, variables físicas del suelo, e hidropedológicas, anteriormente descritas. Para ello, se evaluaron modelos del tipo nulo ($y=0$) como una base para luego, utilizar los algoritmos de selección de variables paso a paso (Stepwise method) e introducción y eliminación progresiva de variables para generar modelos más parsimoniosos. Para todo lo anterior, se utilizó el programa estadístico “JMP”, (JMP®, SAS Institute Inc., Cary, NC, 1989–2021).

También se realizaron mapas de distribución espacial para la variable resistencia a la penetración medida a 30 cm de profundidad en las parcelas de evaluación. Para ello se utilizaron los datos de resistencia a la penetración obtenidos con el penetrológico y sus correspondientes coordenadas geográficas obtenidas con el GPS.

Estos datos fueron sometidos a un análisis geoestadístico mediante el uso del software GS+ V9 (GeoStatistics for the Environmental Sciences), en el cual se elaboraron los semivariogramas para determinar el mejor modelo de interpolación del tipo IDW. Posteriormente a la selección del modelo de regresión más idóneo (modelo de mejor ajuste) con base en sus parámetros geoestadísticos (Nugget, Sill y Ranges) y el valor de R^2 , se elaboraron los mapas correspondientes de variación espacial en las áreas de estudio, mediante el programa ArcGIS 10.1 de ESRI

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1.Efecto del tipo de cosecha en la resistencia a la penetración y al corte del suelo.

Al evaluar el comportamiento mecánico del suelo como la resistencia al corte y a la penetración (Chatillón, penetrolgger) en función de los factores Tipo de cosecha (T), profundidad del suelo (P) y su interacción (T x P), se encontró que ni el tipo de cosecha de la caña ni su interacción con la profundidad presentaron un efecto sobre las variables evaluadas (Cuadro 6). Por otro lado, el factor P presentó significancia estadística (p-value < 0.05) para la resistencia a la penetración (medida con ambos implementos) y la resistencia al corte.

Cuadro 6. Análisis de varianza para evaluar el efecto del tipo de cosecha y la profundidad del suelo en tres variables asociadas a la compactación del suelo en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).

Factor	Parámetro estadístico	Penetrologger	Chatillón	Cuchilla de Torsión
Tipo de cosecha (T)	F	0.4700	0.6800	3.0100
	p-value	0.6318	0.519	0.0730
Profundidad (P)	F	36.730	6.9100	35.090
	p-value	<0,0001	0.017	<0,0001
T x P	F	0.7300	0.3800	0.6000
	p-value	0.4959	0.6875	0.5610

Uno de los factores que pudo haber contribuido a que el tipo de cosecha no manifestara diferencias estadísticas en relación a la compactación medida con los tres instrumentos (Chatillón, penetrolgger, cuchillas de torsión) es el hecho de que las evaluaciones se realizaron cuando el cultivo de caña se le había realizado solamente un ciclo de corta (la primera “caña soca”) lo que pudo generar que el suelo aún tenga efecto de la preparación del suelo que se realiza antes de la siembra, en adición a que un tráfico de maquinaria en un solo ciclo de corta tiene menos riesgo de generar compactación. Esto concuerda con Subirós (2000), quien describe que el cultivo de la caña tiende a reducir el rendimiento a partir del tercer ciclo de corta.

En adición a lo anterior, la labor de cosecha en los sitios de estudio se llevó a cabo en los meses más secos de la zona sur de Costa Rica. Esto pudo generar que las máquinas cosechadoras y cargadoras ingresaran a los terrenos cuando la humedad del suelo es baja, lo que ayuda a disminuir el efecto de la compactación. Algunos autores como Rojas (2012) y

Madero *et al.* (2011), argumentan que las labores de labranza en el suelo o el tráfico de maquinaria generan la máxima intensidad en la compactación del suelo cuando este se encuentra en entre los límites de consistencia plástica. En la región huetar norte de Costa Rica la cosecha de caña de azúcar se realiza en el mes de diciembre, por lo que Bolaños *et al.* (2006), indican que los daños generados por esta maquinaria son muy altos tanto por el adensamiento del suelo como por el daño directo a planta.

Por otro lado, el factor profundidad presentó diferencia estadística para las tres variables de compactación. Este fenómeno coincide con lo estudiado por Agüero y Alvarado (1983), quienes argumentan que la maquinaria agrícola compacta el suelo a mayor profundidad que la lluvia y la carga animal, debido a que el arado deja una capa superficial suelta y un subsuelo denso por una presión aplicada que oscila entre 0.76 y 0.95 MPa. Este efecto se acentúa cuando la labranza de tierras se hace a la misma profundidad durante varios años. Otro factor para considerarse en la variación de la resistencia a la penetración del suelo con la profundidad del perfil es la variación en el contenido de arcilla con el incremento de la profundidad del suelo.

Con base a lo anterior, Camacho *et al.* (2021), menciona la realización de estudio morfológicos y de caracterización de Oxisoles en diferentes regiones de Costa Rica, donde se estudiaron tres sitios dentro de las fincas del presente trabajo. En dicho estudio, se describe de forma detallada la variación del componente textural a con la profundidad del perfil de suelo, donde el contenido de arcilla muestra un incremento promedio de 16% entre el horizonte superficial Ap (0-10 cm) y los horizontes argílicos Bt₁ y Bt₂, mientras que los contenidos de arena y limo muestran un descenso de hasta un 50%.

Amézquita y Chávez (1999), mencionan que la textura del suelo está ligadas al proceso de compactación, donde suelos de texturas medias a gruesas obtienen valores más altos de resistencia a la penetración que en suelos de texturas arcillosas cuando se aplican presiones altas (Maquinarias pesadas con baja área de rodaje). También Agüero y Alvarado (1983), mencionan que la determinación de la RP en suelos arcillosos se complica porque el penetrómetro al introducirse genera que la masa de suelo expanda. Sin embargo, estos mismos autores encontraron valores más elevados en suelos arcillosos (3.18 MPa) al compararlos con suelos de textura arenosa (2.48 MPa).

De forma general, los valores de la resistencia a la penetración (RP) y resistencia al corte (RC) fueron más altos a una profundidad de 30 cm (Cuadro 7) con diferencias significativas con respecto a los obtenidos a una profundidad de 0 cm ($p\text{-value} < 0.05$). Este comportamiento es más evidente en la resistencia a la penetración medida con el penetrológico, la cual reporta un valor tres veces superior al obtenido en la superficie del suelo.

Con base en la información reportada por Soil Survey Staff (1993), es posible categorizar los valores de resistencia a la penetración obtenidos a 0 cm de profundidad con el Chatillón y la resistencia al corte tangencial como un valor intermedio bajo, el cual se ubica entre 0.1 - 1 MPa. Por su parte, el valor promedio de resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad se cataloga como intermedio moderado con un valor de 1.83 MPa. A pesar de que los valores a 30 cm de profundidad son mayores que a nivel superficial no son considerados como limitantes con base en esta categorización.

Pese a lo anterior, para determinar si un valor de la resistencia a la penetración se considera bajo, medio o alto deberá considerarse el cultivo y el tipo de suelo. No obstante, Forsythe *et al.* (2005), mencionan que el rango máximo de tolerancia para la mayoría de los suelos y cultivos varía entre 2.5 - 3 MPa por su parte, el valor crítico para esta variable propuesto por Forsythe (1975), ha sido de 2.96 MPa a capacidad de campo.

De forma más reciente, Camacho *et al.* (2015), al estudiar el efecto de la mecanización de suelos dedicados a la ganadería sobre la compactación del suelo clasificaron sus valores de resistencia a la penetración (obtenidos con un penetrómetro Eijkelkamp), dentro de tres categorías o rangos de compactación: aceptable (menor a 0.9 MPa), moderadamente compactado (0.9 – 2.09 MPa) y compactado (mayor a 2.09 MPa). Por lo que los valores obtenidos en el presente estudio para la superficie del suelo se podrían clasificar como aceptables, mientras que a 30 cm de profundidad estarían dentro del rango de moderadamente compactados, si se consideran solamente los valores obtenidos con el penetrológico.

Cuadro 7. Valores promedio de tres variables asociadas a la compactación del suelo en función del efecto del tipo de cosecha, la profundidad del suelo, y su interacción en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2021).

Factor	Categorías	Penetrologger	Chatillón	Cuchilla de Torsión
		MPa		
Tipo de cosecha (T)	MA	1.15*	0.43*	0.27*
	SM	1.25*	0.50*	0.33*
	ME	1.37*	0.50*	0.37*
Profundidad (P)	0 cm	0.68 a	0.40 a	0.23 a
	30 cm	1.83 b	0.54 b	0.42 b
T x P	MA - 0 cm	0.77*	0.39*	0.20*
	MA - 30 cm	1.98*	0.47*	0.34*
	SM - 0 cm	0.83*	0.41*	0.23*
	SM - 30 cm	1.68*	0.58*	0.44*
	ME - 0 cm	0.45*	0.41*	0.26*
	ME - 30 cm	1.84*	0.58*	0.48*

* No se encontró diferencias significativas entre las medias de una misma variable dentro de un mismo factor. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre las medias de una misma variable para un mismo factor (p-value < 0.05)

Las diferencias en los promedios de resistencia a la penetración obtenidos con el penetrómetro de Chatillón y el penetrológico se deben al tipo de instrumento, donde conviene discutir que el Chatillón es un penetrómetro estático que mide la combinación entre compactación, falla tangencial y flujo plástico (Forsythe 1975), el cual está limitado a una profundidad por medición realizada, mientras que el penetrológico permite extender la cantidad de lecturas. En adición, el diámetro del pistón que se introduce en el suelo es de apenas 5 mm, mientras que el penetrológico utiliza una punta cónica de la sonda de 2 cm² y sumado a ello en este último se aplica una fuerza constante para introducir la sonda hasta los 80 cm de profundidad. Esta fuerza aplicada y en las diferentes capas que traspasa la sonda y con diámetro mayor de contacto puede explicarse que estas lecturas en MPa sean mayores.

Los resultados obtenidos con las cuchillas de torsión (Cuadro 7) evidencian que a 30 cm de profundidad el valor promedio de RC (0.42 MPa) prácticamente duplicó el dato obtenido a nivel superficial (0.23 MPa). Este valor se aproxima a lo encontrado por Rojas (2012), quien determinó valores máximos de resistencia al corte entre 0.40-0.50 MPa en un suelo Vertisol dedicado al cultivo de la caña y con alto tránsito de maquinaria agrícola. Esto es un indicador de que el efecto de la maquinaria en capas más profundas del suelo puede estar generando mayor compactación y un mayor impedimento al corte de los implementos. Al respecto, Henríquez *et al.* (2011), reportaron valores de resistencia al corte 0.028 MPa y 0.025 MPa (a 0 y 15 cm de profundidad, respectivamente) en un Andisol dedicado al cultivo

de café, los cuales son casi veinte veces más bajos que los obtenidos en el presente estudio. Pese a las diferencias en la génesis y el manejo de ambos suelos, el cultivo del café implica el tránsito constante de personal durante las labores de cosecha, control de malezas y plagas, lo cual podría generar cierto adensamiento en la superficie.

5.2.Efecto del tipo de cosecha de caña sobre las variables físicas del suelo.

En adición a la resistencia mecánica del suelo, cuatro variables físicas asociadas a la compactación del suelo fueron evaluadas: densidad aparente, porosidad total, espacio aéreo y la estabilidad de agregados del suelo. Sin embargo, no se encontró un efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$) del tipo de cosecha (T), la profundidad del suelo (P) o su interacción (T x P) sobre el comportamiento de estas cuatro variables (Cuadro 8).

Cuadro 8. Análisis de varianza para evaluar el efecto del tipo de cosecha y la profundidad del suelo en cuatro variables físicas del suelo en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2021).

Factor	Parámetro estadístico	Densidad aparente	Porosidad total	Espacio aéreo	Estabilidad de agregados
Tipo de cosecha (T)	F	0.0500	0.2000	1.9500	0.1300
	p-value	0.6318	0.821	0.1709	0.8798
Profundidad (P)	F	1.500	0.3900	1.340	0.390
	p-value	0.2368	0.5402	0.262	0.5405
T x P	F	0,2500	0.4300	0.5400	0.0600
	p-value	0,7791	0.6569	0.5916	0.9438

En la producción vegetal, se podrían considerar como valores críticos de densidad aparente 1.70 Mg.m^{-3} para suelos francos o franco arcillo arenosos y 1.4 Mg.m^{-3} para suelos arcillosos, en los cuales podría ocurrir la restricción en el desarrollo radicular (Rojas 2012). Con respecto a los valores obtenidos en el presente estudio, se determinó que los valores obtenidos en las fincas y en las dos profundidades estudiadas fueron más bajos que estos niveles críticos. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Camacho *et al.* (2021), quienes determinaron la densidad aparente en los distintos horizontes en el perfil de suelo desde la superficie hasta los 2 m de profundidad y obtuvieron valores que variaban entre 0.87 y 1.12 Mg.m^{-3} . También, Alvarado y Forsythe (2005), proponen que en Oxisoles los valores de densidad aparente generalmente son bajos ya que varían entre 1.0 y 1.3 Mg.m^{-3} .

Cuadro 9. Valores promedio de cuatro variables físicas del suelo en función del efecto del tipo de cosecha, la profundidad del suelo, y su interacción en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).

Factor	Categorías	Densidad aparente	Porosidad total	Espacio aéreo	Estabilidad de agregados
Tipo de cosecha (T)	MA	1.03*	0.57*	0.20*	81.18*
	SM	1.01*	0.57*	0.13*	79.19*
	ME	1.02*	0.56*	0.16*	82.60*
Profundidad (P)	0 cm	0.99*	0.57*	0.18*	79.27*
	30 cm	1.04*	0.56*	0.15*	82.70*
T x P	MA - 0 cm	1.00*	0.58*	0.22*	75.65*
	MA - 30 cm	1.05*	0.56*	0.17*	82.70*
	SM - 0 cm	1.00*	0.56*	0.13*	78.52*
	SM - 30 cm	1.02*	0.57*	0.14*	79.87*
	ME - 0 cm	0.98*	0.57*	0.19*	79.65*
	ME - 30 cm	1.07*	0.54*	0.14*	85.54*

* No se encontró diferencias significativas entre las medias de una misma variable dentro de un mismo factor.

La densidad aparente puede variar con las prácticas de labranza que afectan la profundidad del suelo, el contenido de humedad del suelo, el contenido de materia orgánica, y la estructura del suelo (Rojas 2012). Destaca el manejo del suelo que realizan en las fincas evaluadas en el presente estudio, en el cual durante la preparación de los suelos antes de cada siembra se incorpora al suelo 10 Ton.ha⁻¹ de abono orgánico producido por CoopeAgri R.L., lo cual podría explicar los bajos valores de densidad aparente del suelo, independientemente de la finca, el manejo de la cosecha y la profundidad. Según Elissondo *et al.* (2001), el aumento en la densidad aparente del suelo en sistemas de siembra directa sin realizar labranza vertical se estabiliza a partir del cuarto año. Este aspecto refuerza la importancia de realizar labores de labranza vertical para reducir el adensamiento del suelo y su potencial descompactación.

El efecto de la materia orgánica (MO) en el suelo ha sido ampliamente estudiado, donde destacan sus beneficios a nivel microbiológico y estructural. Debido al poco peso que ocupa por unidad de volumen, condiciona las relaciones masa / volumen del suelo y disminuye la densidad aparente del suelo. Otros beneficios de la adición de MO al suelo son: 1) el incremento de la cohesión de las partículas minerales a través de polímeros orgánicos (raíces

finas, microfauna) lo que favorece la formación de agregados, y 2) una disminución de la humectabilidad de los agregados (un incremento de la hidrofobicidad del agregado) lo que reduce el riesgo de deterioro de la estructura del suelo (Chenu 2000). En adición, Amézquita y Chávez (1999), mencionan que una baja estabilidad estructural de los agregados del suelo frente al agua podría causar el colapso de la estructura del suelo y un potencial incremento en la densidad.

Lo anterior, en adición al manejo del suelo y la adición de materia orgánica en las fincas evaluadas podría explicar los resultados de estabilidad de agregados del suelo obtenidos en el presente estudio, los cuales fueron mayores a 75% indiferentemente de la profundidad o el tipo de cosecha evaluados (Cuadro 9). Al respecto, Le Bissonnais (1996) establece que valores de estabilidad del agregado superiores a 80% representan una estabilidad moderada.

Por otro lado, Camacho *et al.* (2021), al estudiar los oxisoles ubicados en las fincas evaluadas en el presente estudio encontraron estructuras en bloques subangulares (sbk) medios, finos y muy finos con un grado de desarrollo de moderado a fuerte. Estos autores explican que el mecanismo de formación de los bloques subangulares se debe a la alternancia de los ciclos de secado y humedecimiento en el horizonte, lo que hace que el volumen del prisma disminuya, incrementando la densidad y estabilidad del agregado. Esto coincide con las condiciones climáticas de los cantones de Pérez Zeledón y Buenos Aires, donde los regímenes de precipitación son sumamente altos al igual que los cambios de temperatura entre el día y la noche (Solano y Villalobos 2001).

En relación con los valores de porosidad total y espacio aéreo obtenidos en el presente estudio, no se encontró diferencias significativas con respecto a los diferentes factores evaluados en el modelo estadístico (Cuadro 9). En cuanto al espacio aéreo del suelo los valores obtenidos fueron superiores al $0.1 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, el cual ha sido ampliamente aceptado como umbral o nivel crítico para el adecuado desarrollo del sistema radicular de los cultivos (Letey 1985; Henríquez y Cabalceta 2012; Camacho *et al.* 2015). En específico, los valores de espacio aéreo obtenidos en el presente estudio fueron muy similares a los reportados para Oxisoles, los cuales oscilan entre 12-20% (Camacho *et al.* 2021), mientras que los valores de porosidad total obtenidos en el presente estudio coinciden con los reportados por Camacho *et al.* (2015) en un suelo Ultisol, y también con los reportados por Camacho *et al.* (2021) en Oxisoles.

5.3.Efecto del tipo de cosecha de caña en variables hidropedológicas del suelo.

También se evaluó el posible efecto del tipo de cosecha sobre el comportamiento de las variables denominadas hidropedológicas (Lin *et al.* 2005), contenido de humedad a capacidad de campo, a punto de marchitez permanente, agua disponible del suelo, y el contenido de humedad volumétrica medida con un sensor TDR. De forma similar a lo obtenido en las variables físicas del suelo, la humedad a capacidad de campo no presentó diferencias significativas ($p\text{-value} < 0.05$) asociadas a los factores T, P, o T x P (Cuadro 12). Por otro lado, el comportamiento del contenido de humedad a punto de marchitez permanente y la humedad volumétrica determinada con el TDR parece estar bajo el efecto del factor T ($p\text{-value} < 0.05$), mientras que el factor P presentó significancia estadística para la variable agua disponible (Cuadro 10).

Los valores promedio del contenido de humedad a capacidad de campo fueron muy consistentes dentro de cada factor evaluado en el modelo (Cuadro 11). Mientras que los valores promedio de humedad a punto de marchitez permanente y el contenido volumétrico de agua presentaron la misma tendencia, donde se observan diferencias significativas entre las medias obtenidas en la cosecha manual (MA) y la semi mecanizada (SM) ($p\text{-value} < 0.05$). Este comportamiento es más evidente en el contenido de humedad volumétrica medida con el TDR, la cual reporta una diferencia de $0.07 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ entre MA y SM (Cuadro 11).

Cuadro 10. Análisis de varianza para evaluar el efecto del tipo de cosecha y la profundidad del suelo en cuatro variables hidropedológicas en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).

Factor	Parámetro estadístico	Capacidad de campo	Marchitez permanente	Agua disponible	Humedad volumétrica (TDR)
Tipo de cosecha (T)	F	0.6600	4.8200	3.3200	4.4700
	p-value	0.5309	0.0211	0.0593	0.0266
Profundidad (P)	F	4.170	0.1400	5.000	0.850
	p-value	0.0562	0.7164	0.038	0.3682
T x P	F	0.2000	1.4600	1.5800	0.5200
	p-value	0.8224	0.2575	0.2338	0.6039

El contenido de humedad en el punto de marchitez permanente (15 bares de succión) bajo el factor de cosecha manual MA fue significativamente menor al obtenido bajo el tipo de cosecha semi-mecanizada SM a esta misma succión (Cuadro 11). Dicho resultado podría explicarse por el efecto del peso de la maquinaria en la distribución del tamaño de los poros del suelo, y pese a que no hubo diferencias significativas en la porosidad total (Cuadro 9), la presión ejercida pudo haber modificado los poros medios a poro finos. Subirós (2000), menciona que el tipo de cosecha SM es el que involucra la corta de caña en forma manual, pero de igual forma ingresan las cargadoras a realizar su función (alza y carga). Este tipo de maquinaria por tiene la capacidad de cargar hasta 40 ton al igual que una cosechadora puede tener un efecto negativo al compactar el suelo debido a sus dimensiones y al recorrido que realiza en todo el terreno (Bolaños *et al.* 2006).

Cuadro 11. Valores promedio de cuatro variables hidropedológicas en función del efecto del tipo de cosecha, la profundidad del suelo, y su interacción en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).

Factor	Categorías	Capacidad de campo	Marchitez permanente	Agua disponible	Humedad volumétrica (TDR)
Tipo de cosecha (T)	MA	0.35*	0.26 a	0.09*	0.37 a
	SM	0.36*	0.30 b	0.06*	0.44 b
	ME	0.35*	0.29 ab	0.06*	0.39 ab
Profundidad (P)	0 cm	0.37*	0.28*	0.08 a	0.39*
	30 cm	0.34*	0.28*	0.06 b	0.41*
T x P	MA - 0 cm	0.36*	0.25*	0.11*	0.36*
	MA - 30 cm	0.34*	0.27*	0.07*	0.39*
	SM - 0 cm	0.38*	0.30*	0.08*	0.44*
	SM - 30 cm	0.35*	0.29*	0.06*	0.43*
	ME - 0 cm	0.36*	0.30*	0.06*	0.38*
	ME - 30 cm	0.34*	0.28*	0.06*	0.41*

* No se encontró diferencias significativas entre las medias para un mismo factor

Letras diferentes denotan diferencias significativas entre las medias de una misma variable para un mismo factor (p-value < 0.05)

Ninguno de los factores afectó el contenido de humedad gravimétrica a capacidad de campo, estos valores se mantuvieron en un rango de 0.34 – 0.37 cm³ cm⁻³. Anteriormente se discutió sobre la variación del contenido de arcilla y la clase textural que predomina en estos suelos, lo cual podría explicar estos resultados. Al respecto, Largaespada y Henríquez (2015), mencionan que existe relación entre el contenido de arcilla y humedad del suelo, de manera que las partículas de arcilla tienen una mayor capacidad de retención y almacenamiento de agua en comparación con los limos y las arenas esto debido principalmente a su menor tamaño, la mayor superficie específica de reacción y a la mayor cantidad de microporos por centímetro cúbico que forma dentro del suelo.

Pese a que se esperaba que el contenido de humedad a 30 cm de profundidad fuese mayor al determinado a nivel superficial (debido a un mayor contenido de arcilla), el agua disponible determinada a 0 cm fue mayor (Cuadro 11). Estos resultados difieren con lo mencionado por Henríquez y Cabalceta (2012), donde el porcentaje de agua que existe entre los puntos CC y PMP (agua disponible) varía de acuerdo con el tipo de suelo, para el caso de suelos arcillosos presentan mayor capacidad de retención y por lo tanto la variable de agua disponible debería ser mayor. Sin embargo, estos valores de humedad podrían explicarse por la adición de

materia orgánica en la superficie del suelo (10 Ton.ha⁻¹) que se realiza en estas fincas. La materia orgánica no solamente mejora la estructuración del suelo, también incrementa la capacidad de retención de humedad en el suelo.

5.4.Variación de la resistencia a la penetración con la profundidad del suelo”

Una ventaja del uso del penetrolgger es la medición de la resistencia a la penetración de forma más precisa a través de la profundidad del suelo. Al evaluar este comportamiento de la resistencia a la penetración (hasta 80 cm de profundidad) se encontró diferencias altamente significativas para el factor profundidad P (p-value < 0.0001), mientras que los factores tipo de cosecha T y la interacción T x P no presentaron diferencias significativas (Cuadro 12). Este comportamiento se muestra en la figura 1, donde se observa un incremento en la resistencia a la penetración conforme al incremento de la profundidad. Dichos valores superaron el límite inferior de compactación moderada a los 10 cm de profundidad, y alcanzaron a los 40 cm valores superiores a 2.09 MPa el cual se estableció como el valor mínimo para que el suelo se considere compactado (Camacho *et al.* 2015).

Los valores de resistencia a la penetración obtenidos con el penetrolgger desde la superficie del suelo hasta los 80 cm de profundidad en el perfil del suelo (Figura 1) representan un recurso muy importante para comprender la dinámica de la resistencia mecánica del suelo, así como detectar la profundidad a la cual el suelo podría presentar indicios de compactación, y de esa manera, seleccionar el implemento más adecuado para la preparación del suelo. Además de ello, se podría identificar limitantes para el desarrollo de un cultivo, donde la profundidad de raíz se vea restringida por valores muy elevados de resistencia a la penetración.

Cuadro 12. Análisis de varianza para evaluar el efecto del tipo de cosecha y la profundidad del suelo en la resistencia a la penetración (determinada hasta 80 cm) en fincas cultivadas con caña. (CoopeAgri R.L. 2022).

Factor	Parámetro estadístico	Resistencia a la penetración
Tipo de cosecha (T)	F	0.589
	p-value	0.556
Profundidad (P)	F	40.8200
	p-value	<0.0001
T x P	F	0.5740
	p-value	0.9670

Conviene discutir que las fincas evaluadas en el presente estudio han sido dedicadas al cultivo de caña de azúcar por más de dos décadas. Su historial de manejo que incluye la preparación de suelos con maquinaria agrícola los cuales han generado la compactación de suelo a capas más profundas donde los implementos no tienen alcance. En adición, el laboreo del suelo en condiciones inadecuadas de humedad y realizado a la misma profundidad durante períodos largos, va generando una zona de compactación en el fondo del surco por donde pasa el implemento de labranza. Al cabo de cierto tiempo se expresa una capa de suelo compactado que se conoce como piso de arado o pie de arado (Aldana 2005).

El efecto de la profundidad en la resistencia a la penetración varía en función del cultivo. En un suelo dedicado a la ganadería, Camacho *et al.* (2015) encontraron valores de resistencia a la penetración superiores a 2 MPa en los primeros 23 cm de profundidad, los cuales decrecen de forma paulatina con el incremento de la profundidad. Esto contrasta con los resultados del presente estudio, cuya razón principal es la preparación del suelo que se realiza en caña hasta los 40 cm que es la profundidad que llega el implemento más profundo (subsolador), mientras que el suelo dedicado a la ganadería la preparación de suelos no es una práctica común y el pisoteo de los animales genera compactación en los primeros 20 cm.

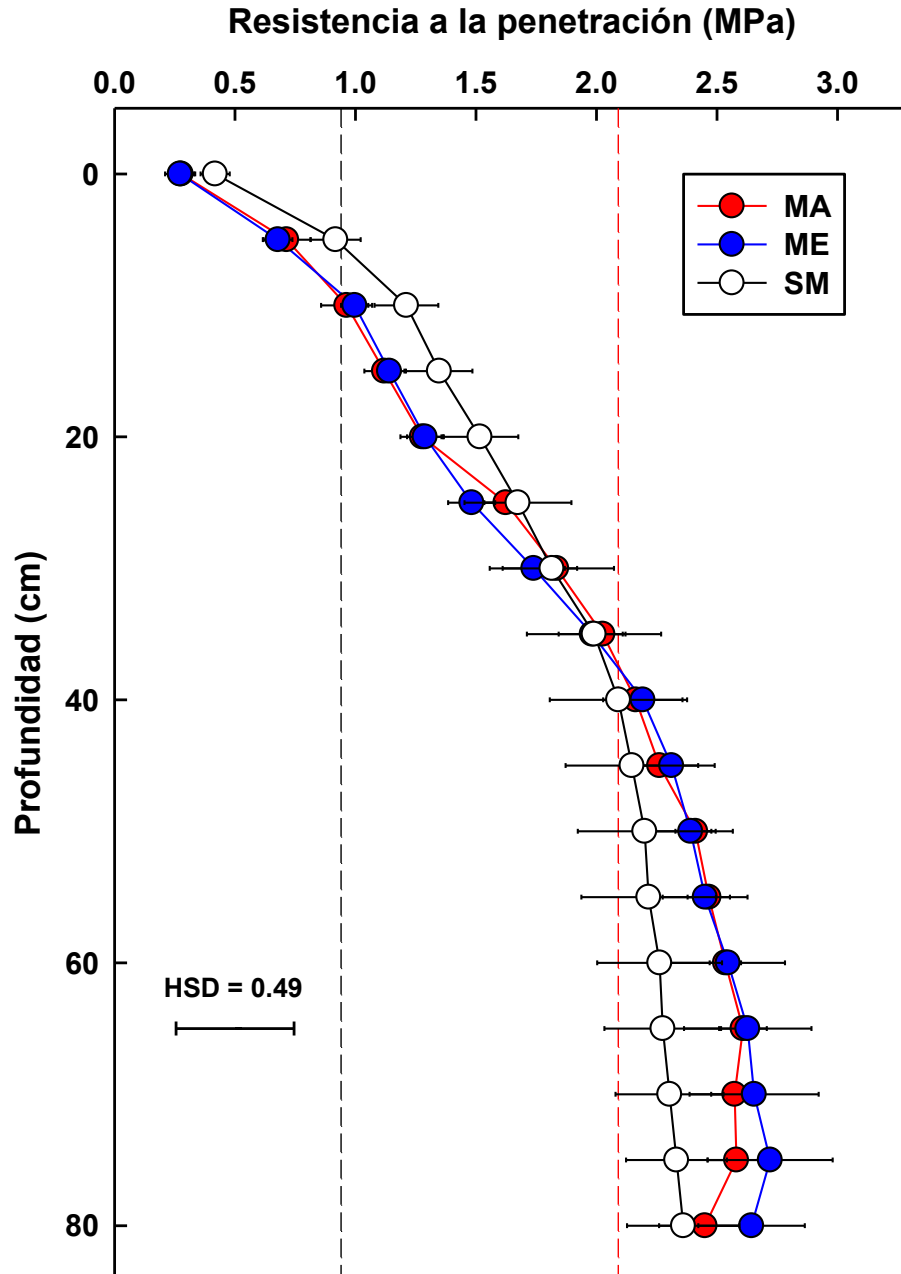


Figura 1 Variación de la resistencia a la penetración evaluada en los tres tipos de cosecha con la profundidad del perfil del suelo, evaluada hasta 80 cm de profundidad. Pérez Zeledón y Buenos Aires. 2012. Barras de error estimadas como error estándar. HSD = diferencia honestamente significativa estimada para la separación de las medias en el factor profundidad, mediante la prueba HSD Tukey. Líneas discontinuas negras y rojas representan de forma respectiva los límites inferiores de suelo moderadamente compactado y suelo compactado de acuerdo con lo descrito por Camacho et al. (2015).

También, Henríquez *et al.* (2011) en su estudio sobre propiedades físicas en un suelo cultivado con café, encontraron que los valores más altos de resistencia al corte tangencial como de la resistencia a la penetración se obtuvieron en los primeros 30 cm de profundidad, mientras que en capas más profundas este valor fue menor. Por otra parte, Forsythe *et al.* (2005), determinaron diferencias importantes de resistencia a la penetración asociada a la profundidad del suelo, donde se encontró valores de resistencia a la penetración de 1.12 MPa a 10 cm de profundidad y de 1.44 a 30 cm de profundidad.

En la Figura 1 se puede observar que a partir de los 40 cm de profundidad la resistencia a la penetración determinada en los tres tipos de cosecha sobrepasan el umbral de los 2.09 MPa (suelo compactado). La variación de la textura reportada por Camacho *et al.* (2021) para estos suelos, evidencia que a 40 cm de profundidad (horizonte Bt₂) el porcentaje de arcilla promedio de tres fincas de la zona sur fue de 73%. Este comportamiento en la distribución del tamaño de partículas también puede relacionarse con el aumento de la densidad aparente determinada por el mismo autor ya que a esta profundidad el valor fue aproximadamente 0.15 Mg m⁻³ mayor a nivel superficial, todo ello en concordancia con el incremento en la resistencia mecánica a lo largo del perfil del suelo (Figura 1).

La anisotropía textural del suelo reportada por Camacho *et al.* (2021) en Oxisoles de la zona sur del país, representa un fenómeno importante que puede generar variaciones en la resistencia mecánica del suelo en los diferentes horizontes del perfil de suelo, en este sentido (Rojas 2012), explica que el adensamiento de las partículas del suelo es dependiente de la textura del suelo, así como el contenido de materia orgánica y la densidad de los sólidos del suelo.

5.5.Distribución espacial de la resistencia a la penetración (MPa)

En las figuras 3, 4, 5 y 6 se muestra el comportamiento de la resistencia a la penetración dentro de cada uno de los lotes y en las 4 fincas estudiadas. Uno de los aspectos de mayor utilidad ha sido el estudio de la variabilidad espacial de suelos y la predicción de valores en puntos no muestreados a través del uso de las interpolaciones, herramienta SIG muy utilizada en conjunto con las metodologías de muestreo (Henríquez *et al.* 2013).

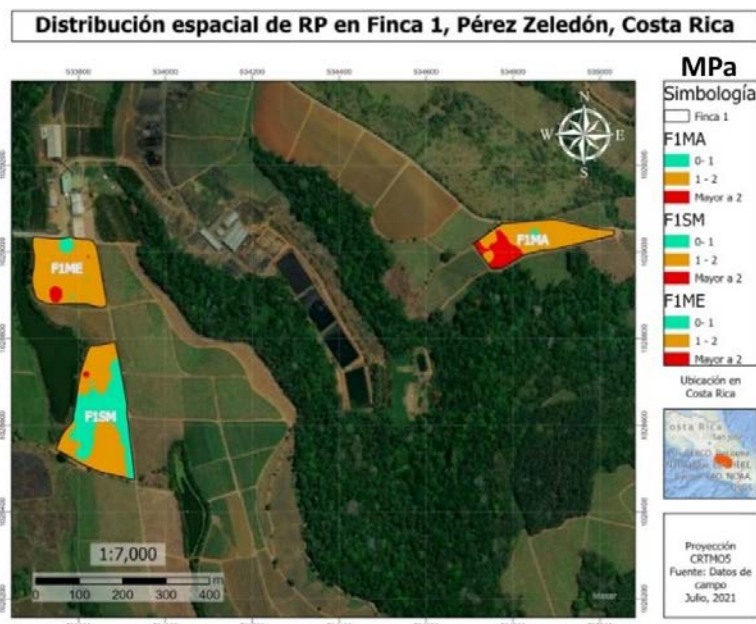


Figura 2. Distribución espacial de resistencia a la penetración (MPa) a 30 cm de profundidad en Finca 1. La Ceniza, Pérez Zeledón. Clasificación de resistencia a la penetración propuesta por Soil Survey Staff (1993).

Los resultados de la resistencia a la penetración obtenidos para la Finca 1 (Figura 2), refuerzan los resultados obtenidos en el ANOVA (Cuadro 6), donde no se encontró efecto del tipo de cosecha sobre la resistencia a la penetración. En el caso de la Finca 1, se observa una distribución de los valores de resistencia a la penetración mayores a 2 MPa en la parcela con un tipo de cosecha MA, un resultado poco esperado en este tratamiento. Una posible explicación a este comportamiento es la dificultad de mecanización debido a la topografía del terreno, de tal forma que la labor de subsolado no se realiza de forma idónea. No obstante, es posible observar que en esta finca los lotes se encuentran en una condición de compactación considerada media.

Para el caso de la Finca 2 (Figura 3), se observa el posible efecto del tráfico de la cargadora en el manejo SM sobre la resistencia a la penetración, y cómo en esta finca no se determinaron valores menores a 1 MPa. En las fincas 2, 3 y 4 (Figura 3, 4 y 5) se observa un comportamiento similar en relación con la distribución de la resistencia a la penetración, en estas 3 fincas a diferencia de la Finca 1 no se obtuvieron valores menores a 1 MPa a 30 cm de profundidad. También se logra observar como en las fincas 3 y 4, la distribución de áreas con valores mayores a 2 MPa es mayor que en las otras dos fincas.

El interpolador utilizado para la elaboración de los mapas de distribución en el presente estudio fue el IDW (Ponderación del Inverso de la Distancia), de acuerdo con Largaespada (2013), esta herramienta utiliza un algoritmo basado en las distancias de los puntos, y los geoestadísticos, que cuantifican la estructura espacial de los datos y su autocorrelación, mediante semivariogramas para realizar la predicción espacial que se fundamenta en la minimización del error cuadrático medio de la predicción usando estadística.

Este método de interpolación ha sido implementado exitosamente para el estudio de la distribución espacial de otras propiedades del suelo como la acidez intercambiable, el pH y los contenidos de Ca, Mg, y K en suelos cultivado con caña de otras regiones de Costa Rica (Villatoro *et al.* 2008; Henríquez *et al.* 2013).

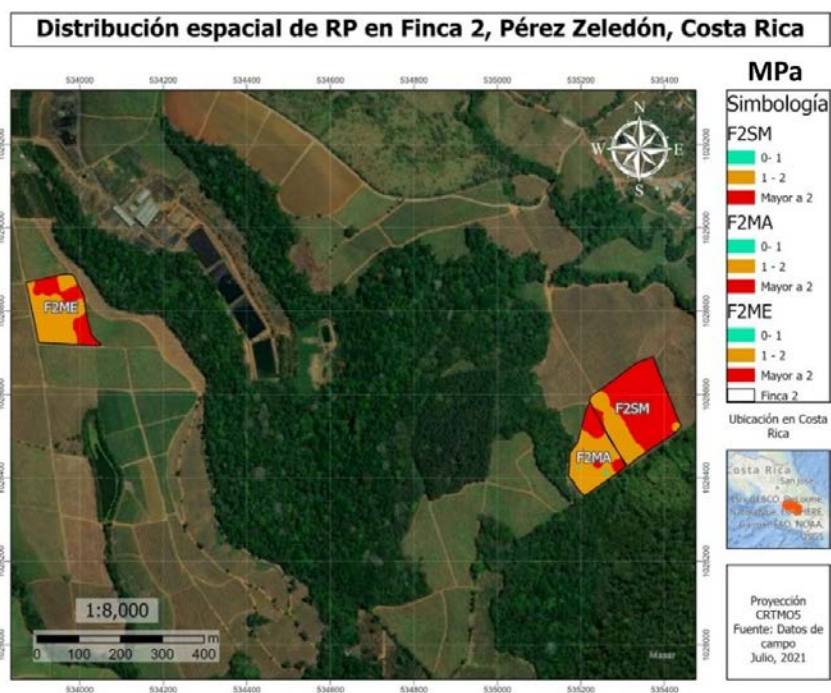


Figura 3. Distribución espacial de RP (MPa) a 30 cm de profundidad en Finca 2. La Ceniza, Pérez Zeledón. Clasificación de resistencia a la penetración propuesta por Soil Survey Staff (1993).

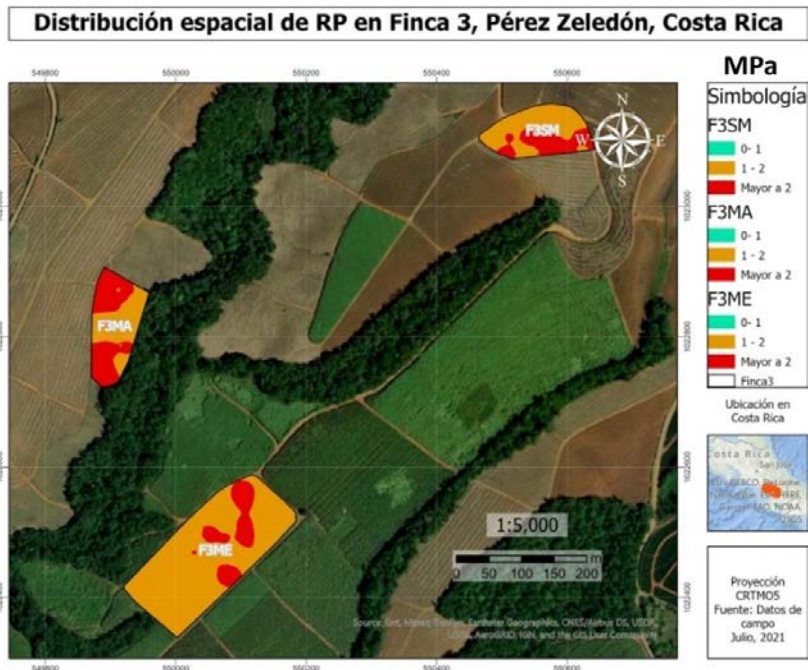


Figura 4. Distribución espacial de RP (MPa) a 30 cm de profundidad en Finca 3. San Pedro, Pérez Zeledón. Clasificación de resistencia a la penetración propuesta por Soil Survey Staff (1993).

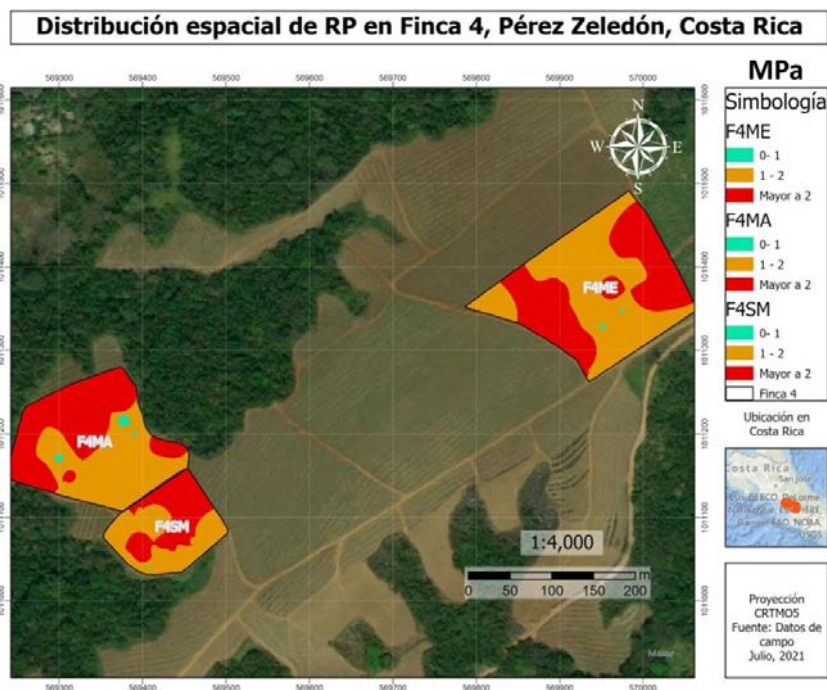


Figura 5. Distribución espacial de RP (MPa) a 30 cm de profundidad en Finca 4. Volcán, Buenos Aires. Clasificación de resistencia a la penetración propuesta por Soil Survey Staff (1993).

5.6. Relación entre la compactación y otras variables físicas del suelo

La compactación del suelo está relacionada a diversas variables físicas. El entendimiento de las relaciones entre estas variables resulta fundamental para comprender mejor el proceso de compactación del suelo.

P.logger	0.69 ^{***}	0.67 ^{***}	0.65 ^{***}	-0.52 ^{**}	-0.43 [*]
Chatillón	0.71 ^{***}	0.65 ^{***}	-0.62 ^{**}	-0.45 [*]	
Cuchi.Torc		0.33	-0.30	-0.40 [*]	
Dens.Apa			-0.95 ^{***}	-0.65 ^{***}	
Poros.Total				0.72 ^{***}	
Esp.Aéreo					

Figura 6. Correlación entre las variables asociadas a la compactación, medidas en 4 fincas cañeras propiedad de CoopeAgri R.L

En la Figura 6 se muestra la matriz de correlación simple con la prueba de Pearson para diferentes variables físicas del suelo relacionadas con la compactación. Se encontró que las determinaciones de la resistencia a la penetración con el penetrologger obtuvieron valores de coeficientes de correlación de 0.69, 0.67 y 0.65 respectivamente para la resistencia a la penetración determinado con el Chatillón, la resistencia al corte y la densidad aparente.

Destaca que la correlación entre los valores de resistencia a la penetración entre los dos penetrómetros utilizados (Chatillón y penetrologger) fue de apenas un 0.69. Al respecto, Gonzales (2013) analizó el estado de la compactación del suelo en campos de Golf de Costa Rica con el uso del Penetrologger y el Chatillón. En dicho estudio se obtuvo que la correlación entre las lecturas de estos dos instrumentos fue proporcional, con valores elevados de correlación ($R=0.91$) en mediciones realizadas a 0 cm de profundidad.

5.7. Regresiones múltiples entre variables estudiadas

Con el fin de establecer una posible causalidad entre el comportamiento de las variables relacionadas con la compactación y otras propiedades físicas del suelo, se realizaron regresiones múltiples con el fin de probar diferentes modelos de interacción y elegir el más

adecuado con base en el coeficiente de determinación y su significancia. Como resultado, solamente se logró identificar algunas relaciones de causalidad entre el efecto que tienen diferentes variables sobre la resistencia a la penetración “Chatillón” y densidad aparente.

La variable estabilidad estructural (EE), la cual no presentó ninguna correlación importante en la matriz de correlación simple (Figura 6), si obtuvo significancia estadística como parámetro de regresión, cuando se incluyó en la regresión múltiple de las variables de resistencia a la penetración obtenida con el penetrómetro de Chatillón (RP-CH) y densidad aparente (DA).

5.8. Modelizado de la resistencia a la penetración con el penetrómetro “Chatillón”

El modelo de regresión obtenido para estimar la resistencia a la penetración determinada con el penetrómetro de Chatillón (RP-CH) mediante la porosidad total (PT), la estabilidad estructural del agregado (EE), el contenido de Limo y la humedad volumétrica medida con TDR (HV-TDR) presentó significancia estadística global ($p < 0.001$), significancia estadística para cada variable involucrada ($p < 0.05$) y un $R^2 = 0.70$. Dicho modelo se estableció de la siguiente forma:

$$\mathbf{RP-CH = 1,02 - 0,016 (PT) + 0,0042(EE) - 0,022(Limo) + 0,0069(HV-TDR)}$$

Según dicho modelo, altos valores de RP-CH estarían relacionados a bajos valores de PT y contenidos de limo, así como altos valores EE y HV-TDR. Esto concuerda con lo mencionado por Agüero y Alvarado (1983), quienes describen que entre los principales factores asociados a la compactación se encuentran: desintegración de los agregados del suelo, bajo contenido de materia orgánica y altos contenidos de limo.

La densidad aparente no presentó significancia estadística en la matriz de regresión múltiple con esta variable. De hecho, al incluirla dentro de la estructura algebraica, se debilitaba el modelo, disminuyendo asimismo el coeficiente de regresión.

Por lo anterior, la densidad aparente no fue tomada en cuenta para la predicción de la RP-CH. Esto a pesar de que como se observó anteriormente en la matriz de correlación simple de Pearson, el coeficiente de correlación simple entre ambas variables fue de 0.65 ($p < 0.001$).

5.9. Modelizado de la densidad aparente

También para la densidad aparente del suelo, se generó un modelo de regresión múltiple. Dicho modelo permite calcular el valor de la densidad aparente (DA) con mediante la resistencia a la penetración medida con el penetrómetro de Chatillón (RP-CH), la estabilidad estructural del agregado (EE) y la humedad volumétrica medida con TDR (HV-TDR). Este modelo presentó significancia estadística global ($p < 0,001$), significancia estadística para cada variable involucrada ($p < 0,05$) y un $R^2 = 0,71$. Dicho modelo se estableció de la siguiente forma:

$$\mathbf{DA = 1,41 + 0,30 (RP-CH) + 0,0030(EE) - 0,0046(HV-TDR)}$$

De esta manera, la densidad aparente estaría relacionada en forma positiva con la resistencia a la penetración determinada con el Chatillón y la estabilidad estructural del agregado, y de forma negativa con el contenido de humedad volumétrica medido con un TDR.

6. CONCLUSIONES

- Bajo las condiciones del presente estudio el efecto de la profundidad tuvo mayor influencia en las variables de RP-CH, RP-P Y DA que el tipo de cosecha realizado.
- Se encontró que el grado de sensibilidad del RP-P no fue suficiente para detectar diferencias por el tipo de manejo; igualmente ocurrió con las otras variables evaluadas y relacionadas como fueron la DA, PT y EA.
- Los valores absolutos de RP-CH y RP-P, aunque fueron diferentes entre sí, guardaron una correlación de 0.69 y altamente significativa, lo cual podría servir para establecer valores de referencia entre uno y otro método y para este tipo de suelos.
- El uso del “Penetrologger” permite la evaluación de la compactación en el perfil del suelo. Dichos resultados permiten la elaboración de mapas de distribución de la compactación de suelo. Por lo anterior, este equipo demostró ser una herramienta de mucha utilidad para visualizar esta característica en capas más profundas lo cual no es posible hacer con otros equipos en una forma rápida y visual.
- Todos los parámetros evaluados mostraron mayores valores a los 30 cm de profundidad con respecto a los encontrados en la superficie, pese a lo cual no se consideran valores limitantes para las plantas.
- Las variables DA y PT, correlacionaron con la variable RP-CH en un 65% y -62% respectivamente y con la variable RP-P en un 65% y -52% respectivamente, todas en forma significativa, lo que demuestra la clara y estrecha relación que existe entre las mediciones de resistencia a la penetración y otras variables que miden el grado de empaquetamiento del suelo.
- El valor de RP-CH se pudo explicar en un 70% por los valores de porosidad total, estabilidad estructural, contenido de Limo y humedad volumétrica.
- El valor de la DA se pudo explicar en un 71% por los valores de resistencia a la penetración, estabilidad estructural y humedad volumétrica.
- En este estudio y con este tipo de suelo, el contenido de limo correlacionó con la DA, PT y HG en -0.73, 0.60 y 0.74 en forma significativa, este último aspecto, reportado por otros autores.

7. RECOMENDACIONES

- Monitorear el estado de la compactación del suelo en cada uno de los lotes seleccionados en este estudio luego de varios ciclos de corta y registrar datos de rendimiento por lote (ton/ha) en estas áreas, de tal forma que pueda asociarse el grado de empaquetamiento del suelo con la productividad.
- En posteriores estudios de compactación de suelos debe considerarse la medición de variables como Infiltración de agua y conductividad hidráulica, ya que el movimiento de agua en el suelo es otra variable indicadora del grado de compactación.

8. LITERATURA CITADA

- ALDANA, A. 2005. Edafología y Fertilidad. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. 1 ed. Bogotá D.C. Colombia. 200p.
- ALVARADO, A; FORSYTHE, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelo de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29 (1): 85-94. San José, Costa Rica. 10 p.
- AGÜERO, J;ALVARADO, A. 1983. Compactación y compactibilidad de suelos agrícolas y ganaderos de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía costarricense*. 7 (1/2):27-33 pp
- AMÉZQUITA, E., HERNÁNDEZ, E. y MORENO, O. 1997. Influencia de la profundidad de la compactación en la productividad de hortalizas en un suelo Andico de la Sabana de Bogotá. *Suelos Ecuatoriales* 27:157-162.
- AMÉZQUITA, E; CHÁVEZ, L.F. 1999. La Compactación del suelo y sus efectos en la Productividad de los Suelos. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 25 p.
- ANGULO, A. 2013. Caracterización del riego en el cultivo de Caña de Azúcar, de Costa Rica. LAICA. San José, Costa Rica.
- ARVIDSSON, J; WESTLIN, H; KELLER, T; GILBERTSSON, M. 2011. Rubber track systems for conventional tractors – effects on soil compaction and traction. *Soil & Tillage Research* 117, 103–109.
- BANGITA, B; RAJASHEKHAR, B.K. 2012. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum* spp.) under zonal tillage system. *Geoderma* 189 – 190 (2012) 351-356 pp. Contents lists available at SciVerse ScienceDirect.
- BECERRA, C; MADERO, E; HERRERA, O; AMÉZQUITA, E. 2005. Caracterización espacial de la compactación en terrenos Agrícolas de CIAT, Colombia. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*. Vol. 8, N° 16, 33-37. Colombia. 5 p.
- BOLAÑOS, J; OVIEDO, M; CHAVEZ, M. 2006. Efecto de la cosecha mecanizada sobre los rendimientos industriales de la caña de azúcar (*Saccharum* spp) en el ingenio Quebrada Azul, San Carlos, Costa Rica. DIECA. Grecia, Costa Rica.
- BOWEN, H.D. 1981. Alleviating mechanical impedance. In: *Modifying the root environment to reduce crop stress* (Arkin G.F. y Taylor, H.M., eds.). American Society of Agricultural Engineers-ASAE, USA. Monograph No.4.

- BRADFORD, J.M; GUPTA, S.C. 1986. Soil compressibility. *In*: Methods of soil Analysis. ASA, Medison. 479-492 pp.
- CAMACHO, ME. 2016. Génesis y clasificación de algunos Ultisoles y Oxisoles de Costa Rica. Tesis de Maestría. San Pedro de Montes de Oca. Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 184 p.
- CAMACHO, ME; MATA, R; BARRANTES, M; ALVARADO, A. 2021. Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. Catena. San José, Costa Rica. 15 pp
- CHANCELOR, W.J. 1977. Compaction of soil by agricultural equipment. Division of Agriculture, University of California, Berkeley. Bulletin No. 1881.
- CHAVES, M. 1993. Antecedentes, situación actual y perspectivas de la agroindustria azucarera y alcoholera costarricense. IX Congreso Nacional Agronómico y de Recursos.
- CHAVES, M. 2017. Taxonomía de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica: Ordenes y Subordenes presentes. DIECA-LAICA. San José, Costa Rica. 14p
- DADDOW, R., WARRINGTON, G. 1983. Growth Limiting Soil Bulk Densities as Influenced by Soil Texture. Colorado: USDA.
- DANE, J.H., HOPMANS, J.W. 2002. Laboratory. In Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis Part 4, Physical Methods, Soil Sci. Soc. of Am. Book Series, vol. 5. Madison, WI. pp. 675-720
- DÍAZ, L; PORTOCARRERO, E. 2002. Manual de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L). UNIVERSIDAD DE ZAMORANO. Honduras. 148p
- DI RIENZO J.A., CASANOVES F., BALZARINI M.G., GONZALEZ L., TABLADA M., ROBLEDO C.W. 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- ELISSONDO, E; COSTA, J; SUERO, E; FABRIZZI, KP; GARCIA, F. 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas de suelos luego de la introducción de labranzas verticales en un suelo bajo siembra directa. Ciencia del suelo 19 (1). Argentina. 9p.
- FAO. 1990. FAO Yearbook 1989. FAO Statistical Series No.94, Volumen 43. Roma, Italia.
- FORSYTHE W. 1975. Manual de laboratorio de física de suelos. IICA. San José, Costa Rica. 39, 84, 157, 158, 212 p.

- FORSYTHE, W; SANCHO, F; VILLATORO, M. 2005. Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del Maíz en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 175-185 pp.
- GARCÍA, M.2020. Efecto de dosis y fuentes de Magnesio (MgO) sobre el rendimiento agroindustrial (Ton Azúcar/Ha) en caña de azúcar (*Saccharum officinarum*, Variedad RB 99-381) en el cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica. Tesis para el grado de Licenciatura. Universidad de Costa Rica.
- GONZÁLEZ, M. 2013. Estimación de la compactación del suelo en la zona “Green” de un campo de Golf ubicado en la región del Pacífico Central de Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Turrialba, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 64 p.
- GROSSMAN, R.B., REINSCH, T.G. 2002. Bulk density and linear extensibility. In Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 4, Physical Methods, Soil Sci. Soc. of Am. Book Series*, vol. 5. Madison, WI. pp. 201-228
- HENRÍQUEZ C., CABALCETA G. 2012. Guía Práctica para el Estudio Introductorio de los Suelos con un Enfoque Agrícola. 2da Edición. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica 112 p.
- HENRÍQUEZ C., ORTÍZ O., LARGAESPADA K., PORTUGUEZ P., VARGAS M., VILLALOBOS P., GÓMEZ D. 2011. Determinación de la resistencia a la penetración, al corte tangencial, densidad aparente y temperatura en suelo cafetalero, Juan Viñas Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 35(1):175-184
- HENRÍQUEZ, C; MÉNDEZ, J.C; MASÍS, R. 2013. Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis Kriging y su validación. *Agronomía Costarricense*, vol. 37, nú. 2, pp 71-82. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- HERRERA, O.; MADERO, E. «Notas de clase». Universidad Nacional de Colombia. 2000.
- JARAMILLO, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 619p.
- KELLER, T; ARVIDSSON, J; DAWIDOWSKI, J.B; KOOLEN, A.J. 2004. Soil precompression stress: II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil & Tillage Research* 77, 97–108.
- LARGAESPADA, K. 2013. Distribución espacial de la humedad y su relación con algunas propiedades físicas en el suelo sembrado con Banano en Limón, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. 82 pp.

- LARGAESPADA K., HENRIQUEZ C. 2015. Distribución de la humedad y su relación con la textura de un suelo. *Agronomía Costarricense*. 39(3):137-147.
- LE BISSONNAIS, Y. L. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of soil science* 47(4): 425-437.
- LETEY, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1: 227-294.
- LIN, H., BOUMA, J., WILDING, L. P., RICHARDSON, J. L., KUTILEK, M., NIELSEN, D. R. (2005). Advances in hydropedology. *Advances in agronomy*, 1-89.
- LOZANO, N; ROLIM, M.M; OLIVEIRA, V.S; TAVARES, U.E; PEDROSA, E.M.R. 2013. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. P.E, Brasil. *Soil & Tillage Research* 129 (2013) 61–68 pp. Contents lists available at SciVerse ScienceDirect.
- LOWERY, B., MORRISON J.E. 2002. Soil penetrometers and penetrability. In Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 4, Physical Methods*, Soil Sci. Soc. of Am. Book Series, vol. 5. Madison, WI. pp. 363-388
- MADERO, E; RAMIREZ, J; ALBÁN, A; ESCOBAR, B; GARCIA, L; PEÑA, M. 2011. Compactación de suelos cultivados con caña de azúcar en la zona sur del Valle del Cauca. 8 p.
- MAG.1991 Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica.
- MARTÍNEZ, R. 1998. Estudio de la descompactación mecánica y la cobertura de residuos de cosecha como elementos del manejo agrícola en cepas de retoños de caña de azúcar (*Saccharum spp. Híbrido*) en un Vertisol pélico gleyzoso. Tesis de maestría, Universidad de Granma. Cuba. 69 pp
- MOREJÓN, Y; GONZÁLES, R; GARCÍA, A. 2016. Influencia de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar en la compactación del suelo. *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN-2306-1545. Vol.6. 33-33 pp
- NIMMO, J.R., PERKINS, K.S. 2002. Aggregate stability and size distribution. In Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 4, Physical Methods*, Soil Sci. Soc. of Am. Book Series, vol. 5. Madison, WI. pp. 317-328
- PEÑA, W. 2012. Edafología del Trópico. EUNED. San José, Costa Rica. 256 p.

- R Studio Team. 2015. R Studio: integrated development for R. R Studio, Inc., Boston
Available in <http://www.rstudio.com/>. Accessed 30 August 2021.
- ROJAS, M. 2012. Análisis de los niveles de compactación del suelo asociado a tres labores para cultivo de la caña de azúcar en el Ingenio Taboga. Costa Rica. 243 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1993. Soil Survey Manual. Washington: USDA.
- SOLANO, J., VILLALOBOS, R. 2001. Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de la regionalización geográfico-climático de Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanog.*, 8 (1): 26-39.
- SUBIROS, F. 2000. El Cultivo de la caña de azúcar. EUNED. 1 ed. San José, Costa Rica. 448 p.
- TOPP, G.C., FERRE, P.A. 2002. Water content. In Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 4, Physical Methods*, Soil Sci. Soc. of Am. Book Series, vol. 5. Madison, WI. pp. 417-545.
- VILLATORO M., HENRÍQUEZ C., SANCHO F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32(1):95-105.

9- ANEXOS

Anexo 1. Medición con el Penetrómetro de Chatillón a 30 cm de profundidad



Anexo 2. Medición con Penetrologger



Anexo 3. Tabulación de resultados

Lote	Penetrologger	GPS	LECTURAS SUPERFICIALES					LECTURAS A 30 CM											
			TDR	Chatillón	Cuchillas de Torsión			TDR	Chatillón	Cuchillas de Torsión									
F1ME	1	28	38	39.6	41.8														
F1ME	2	29	41	39.1	39.1														
F1ME	3	30	43.1	39.8	39.8														
F1ME	4	31	37.2	48.6	36.5														
F1ME	5	32	34.6	37.7	39.4														
F1ME	6	33	35	39.3	39.5														
F1ME	7	34	38.3	40	41.3														
F1ME	8	35	43.4	41.9	37.1														
F1ME	9	36	35.1	34.6	34.9														
F1ME	10	37	30.5	34	36.7														
F1ME	11	38	33.6	31.8	34.2	5	3	5	1.5	1.5	3	40.4	37.4	39.6	8	7	7	3.5	3.5
F1ME	12	40	39.3	33.6	39.6														
F1ME	13	41	35.4	34.7	34.9	3	4.5	4	2	3	3.5	33.4	39.1	39	6	6	6	3	3
F1ME	14	42	34.6	34.3	34														
F1ME	15	43	33	32.6	31.1														
F1ME	16	44	27.3	26.7	30.6	2.5	5	6	4.5	6.5	3	43.6	40.2	42.9	4	7	6	5	4
F1ME	17	45	36.6	41	41.3														
F1ME	18	46	35	36.4	36.5														

Anexo 4. Resultados Penetrologger

Número penetr./parcela: 20
 Número penetr. realizadas: 60
 Tipo de cono : 2.0cm2 60deg
 Velocidad de penetración: 3 cm/s
 Unidades profundidad : cm
 Unidades penetración: MPascal

Profu	Pen01	Pen02	Pen03	Pen04	Pen05	Pen06	Pen07	Pen08	Pen09	Pen10	Pen11	Pen12	Pen13	Pen14	Pen15	Pen16	Pen17	Pen18	Pen19
00	0.04	0.12	0.05	0.17	0.85	0.06	0.24	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.26	0.05	0.09	0.04
01	0.04	0.04	0.05	0.17	0.85	0.06	0.06	0.05	0.23	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	2.40	0.05	0.09	0.04
02	0.04	0.04	0.23	0.23	0.85	0.06	0.06	0.05	0.23	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	2.40	0.05	0.09	0.04
03	0.04	0.05	0.31	0.23	0.85	0.05	0.06	0.07	0.26	0.07	0.04	0.05	0.37	0.05	0.04	2.40	0.10	0.09	0.07
04	0.04	0.05	1.14	0.23	1.35	0.05	0.93	0.07	0.26	0.07	0.04	0.05	0.39	0.07	0.05	2.40	0.29	0.29	0.17
05	0.04	0.32	1.14	0.30	1.75	0.05	2.07	0.73	0.26	0.06	0.04	0.07	0.39	0.17	0.15	2.40	0.29	0.29	0.47
06	0.05	1.13	1.27	0.36	1.75	0.09	2.07	1.08	0.28	0.06	0.04	0.18	0.39	0.28	0.23	2.40	0.29	0.38	0.72
07	0.31	1.13	1.27	1.47	1.75	0.23	2.07	1.08	0.28	0.40	0.20	0.26	1.19	1.16	0.87	2.40	0.35	0.38	0.97
08	1.09	1.34	1.27	1.47	1.75	0.29	2.07	1.08	0.28	0.40	0.20	0.43	1.19	1.16	0.87	2.40	0.35	0.60	0.97
09	1.44	1.48	1.27	1.47	1.72	1.08	2.07	1.08	0.65	0.58	0.86	0.43	1.19	1.16	0.87	2.40	0.35	0.60	1.18
10	1.48	1.48	1.39	1.47	1.72	1.39	2.07	1.08	0.65	0.58	0.86	0.56	1.19	1.16	1.01	2.40	0.57	0.60	1.18
11	1.48	1.48	1.39	1.47	1.72	1.39	2.07	1.08	0.94	0.58	0.86	0.56	1.19	1.16	1.01	2.40	0.91	0.88	1.18
12	1.48	1.50	1.39	1.47	1.72	1.39	2.07	1.08	0.94	1.28	0.86	0.69	1.19	1.16	1.01	2.40	0.91	0.88	1.23
13	1.40	1.50	1.39	1.47	1.72	1.39	2.07	1.08	0.94	1.28	1.09	0.69	1.19	1.16	1.01	2.40	0.91	0.88	1.23
14	1.40	1.50	1.43	1.47	1.72	1.52	2.07	1.08	1.23	1.28	1.09	0.69	1.19	1.16	1.01	2.40	1.21	0.88	1.23
15	1.40	1.48	1.43	1.47	1.72	1.52	2.07	1.08	1.23	1.49	1.09	0.79	1.19	1.16	1.01	2.40	1.55	0.88	1.32
16	1.32	1.48	1.60	1.47	1.72	1.52	2.07	1.22	1.23	1.49	1.09	0.79	1.19	1.16	1.01	2.40	1.55	0.99	1.32
17	1.32	1.48	1.60	1.47	1.72	1.52	2.07	1.22	1.40	1.49	1.13	0.86	1.19	1.16	1.01	2.40	1.88	0.99	1.32
18	1.32	1.48	1.75	1.47	2.12	1.52	2.07	3.15	1.40	1.49	1.13	0.86	1.19	1.16	1.01	2.40	1.88	0.99	1.43

Anexo 5. Análisis estadístico

```

RESUMEN ESTADÍSTICA R: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
> View(ARCHIVOS.DE.DATOS.PARA.R3)
> COSECHA<-ARCHIVOS.DE.DATOS.PARA.R3
> ls(COSECHA)
[1] "AGUADISP"      "ARCILLA"      "ARENA"      "DA"
[5] "DP"           "ESPAER"      "ESTABILIDAD" "FINCA"
[9] "HUMGRA"      "HUMTDR"      "HUMVOL"     "LIMO"
[13] "POR.TOT"     "PROFUNDIDAD" "RC.CT"      "REP"
[17] "RET1500"     "RET33"       "RP.CH"      "RP.PL"
[21] "TIPO.DE.COSECHA"
> summary(COSECHA)
FINCA REP TIPO.DE.COSECHA PROFUNDIDAD RP.PL RP.CH
A:18 A:12 MA:24 SUB:36 Min. :0.07298 Min. :0.1628
B:18 B:12 ME:24 SUP:36 1st Qu.:0.67662 1st Qu.:0.3510
C:18 C:12 SM:24 Median :1.02325 Median :0.4571
D:18 D:12 Mean :0.97753 Mean :0.4638
E:12 3rd Qu.:1.29059 3rd Qu.:0.5636
F:12 Max. :1.50379 Max. :0.8172

RC.CT DA POR.TOT ESPAER ESTABILIDAD
Min. :0.1305 Min. :0.7950 Min. :6.402 Min. :2.180 Min. :38.77
1st Qu.:0.1962 1st Qu.:0.9464 1st Qu.:7.378 1st Qu.:3.465 1st Qu.:72.18
Median :0.2943 Median :1.0124 Median :7.549 Median :3.941 Median :85.25
Mean :0.3260 Mean :1.0173 Mean :7.539 Mean :4.030 Mean :80.99
3rd Qu.:0.4248 3rd Qu.:1.0921 3rd Qu.:7.781 3rd Qu.:4.403 3rd Qu.:90.33
Max. :0.6867 Max. :1.3036 Max. :8.086 Max. :6.129 Max. :99.74

HUMGRA HUMVOL HUMTDR DP ARENA
Min. :41.81 Min. :42.60 Min. :23.47 Min. :2.090 Min. :10.0
1st Qu.:54.06 1st Qu.:56.86 1st Qu.:37.34 1st Qu.:2.308 1st Qu.:15.0
Median :57.98 Median :60.50 Median :41.08 Median :2.380 Median :20.0
Mean :59.34 Mean :59.77 Mean :40.18 Mean :2.364 Mean :23.5
3rd Qu.:63.88 3rd Qu.:63.15 3rd Qu.:43.65 3rd Qu.:2.420 3rd Qu.:30.0
Max. :88.73 Max. :74.05 Max. :54.50 Max. :2.580 Max. :52.0

LIMO ARCILLA RET33 RET1500 AGUADISP
Min. : 3.00 Min. :2.362 Min. :2.437 Min. :16.78 Min. :1.161
1st Qu.:10.00 1st Qu.:2.756 1st Qu.:2.522 1st Qu.:25.73 1st Qu.:1.666
Max. :22.50 Max. :3.000 Max. :3.255 Max. :30.44 Max. :1.000
  
```

Anexo 6. Matriz de correlaciones

VARIABLES	VALORES	CHATILL	CUCHILL	DEN AP	POR TOTAL	ES AER	ESTABIL	HG	HV LAB	HV TDR	DEN P	ARENA	LIMO	ARCILL	CC	PMP	AGUA DIS
P LOGGER	r	0.692	0.6668	0.6474	-0.5186	-0.4336	-0.1079	-0.4854	-0.0496	0.1432	0.5066	-0.1016	-0.71	0.3641	-0.6606	-0.254	-0.445
CHATILL	P(f)	0.0002	0.0004	0.0006	0.0094	0.0343	0.6159	0.0162	0.8179	0.5044	0.0115	0.6366	0.0001	0.0803	0.0004	0.73	0.0293
CHATILL	r	0.7052	0.6516	-0.6215	-0.4531	0.0089	-0.5301	-0.1017	0.1393	0.2004	-0.1139	-0.7293	0.3834	-0.4888	-0.0293	-0.5126	0.0104
CUCHILL	P(f)	0.0001	0.0006	0.0012	0.0262	0.967	0.0077	0.6364	0.5162	0.5977	0.5962	5.27E-05	0.0644	0.0154	0.8918	0.0104	
CUCHILL	r	0.3291	-0.3027	-0.4047	0.1383	-0.1017	0.1516	0.2961	0.1281	-0.3353	-0.4267	0.4652	-0.3062	0.1511	-0.5171	0.1511	
DEN AP	P(f)	0.1163	0.1505	0.0498	0.5193	0.6363	0.4795	0.8901	0.551	0.1092	0.0376	0.022	0.1455	0.4809	0.0097		
DEN AP	r	-0.9498	-0.6531	-0.4754	-0.8569	0.086	0.1532	0.2986	0.1915	-0.7328	0.1159	-0.5371	-0.16	-0.4157			
POR TOTAL	P(f)	1.40E-12	0.0005	0.0189	0.0005	0.6894	0.4748	0.1564	0.3701	4.66E-05	0.5897	0.0068	0.4553	0.0434			
POR TOTAL	r	0.7227	0.5194	0.5439	-0.1789	-0.2107	0.0122	-0.2765	0.5972	0.0116	0.4215	0.0165	0.4521	0.0165	0.4521		
ES AER	P(f)	6.64E-05	0.0093	0.006	0.4029	0.7373	0.9549	0.5588	0.0021	0.9571	0.0402	0.9389	0.0265				
ES AER	r	0.4935	-0.0678	-0.7175	-0.8176	0.1397	-0.1097	0.2373	0.001	-0.0063	-0.4729	0.5396	0.0065				
ESTABIL	P(f)	0.0143	0.7529	7.92E-05	1.07E-06	0.5151	0.61	0.5988	0.9964	0.9766	0.0196	0.0065					
ESTABIL	r	0.1026	-0.3377	-0.257	0.0592	-0.3938	0.1394	0.2919	0.0805	-0.0917	0.196						
HG	P(f)	0.6332	0.1066	0.2254	0.7833	0.0569	0.510	0.7086	0.6698	0.3586	0.0479						
HG	r	0.6867	0.5214	-0.4843	-0.0376	-0.2501	0.6903	0.6282	0.0479								
HV LAB	P(f)	0.0002	0.009	0.0165	0.8616	4.03E-05	0.1348	0.0002	0.0011	0.824							
HV LAB	r	0.8526	0.3281	0.0535	0.2918	-0.1549	0.4081	0.6893	-0.3405								
HV TDR	P(f)	1.23E-07	0.4334	0.8038	0.1688	0.4699	0.0477	0.0003	0.1338								
HV TDR	r	-0.1871	-0.0906	0.1665	0.0206	0.4017	0.7387	-0.4048									
	P(f)	0.3814	0.6738	0.4368	0.9239	0.0517	3.75E-05	0.0497									

Anexo 7. Matriz de correlaciones

