

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización de la compactación ocasionada por un sistema de cosecha mecánica de la caña de azúcar en dos tipos de suelos del valle del cauca

ANTHONY EDUARDO ARANA SILVA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Posgrados
Palmira, Colombia
2023

Caracterización de la compactación ocasionada por un sistema de cosecha mecánica de la caña de azúcar en dos tipos de suelos del valle del cauca

ANTHONY EDUARDO ARANA SILVA

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Agrarias

Director:
(Doctor en Mecanización Agrícola) OSCAR CHAPARRO ANAYA

Línea de Investigación:
Suelos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Posgrados
Palmira, Colombia

2023

A la memoria de mi padre HUMBERTO ARANA CAMPO el gran amor de mi vida, quien me enseñó el amor por la familia “nadie se queda atrás”, la honestidad, responsabilidad, valor de la palabra y me enamoró de la cosecha. Toda mi vida te amaré y continuaré tu legado haciendo honor a tu memoria por hacer de mí un ser integro que formaste a tu imagen y semejanza. Nuestra familia siempre estará protegida Papá.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

ANTHONY EDUARDO ARANA SILVA

Nombre

24/05/2023

Fecha

Agradecimientos

Al apoyo incondicional de mi madre SUSANA SILVA ZULETA quien siempre me dio animo y fortaleza para continuar con mis estudios “no te puedes quedar quieto hijo debes seguir estudiando y tendrás tus recompensas en la vida”, a mi amada esposa y parcera incondicional PAULA ANDREA POSADA que ha sido mi motor y guía en este camino de haber vuelto a estudiar, a su ayuda permanente y su taza de chocolate en la noche para tener energías y poder continuar con la tesis, mi sobrino SANTIAGO ARANA un ser especial que amo mucho dándole el ejemplo para que en su vida forme conocimiento y sea un gran profesional, mi hermano CESAR AUGUSTO ARANA mi compañero de vida y demás familiares que me brindaron todo su apoyo y entusiasmo para cumplir este proyecto de vida.

Agradecimientos especiales al ingeniero OSCAR CHAPARRO ANAYA, director de tesis quien me brindo el apoyo incondicional al desarrollo de este trabajo, fui muy afortunado de contar con su acompañamiento y aporte de conocimiento de uno de los más importantes profesionales de la mecanización en Colombia, al ingeniero SEBASTIAN SAAVEDRA RINCÓN, profesor asociado de la Universidad nacional quien con su disciplina y buena energía me aportó importante conocimiento y nunca me dejo solo en la construcción de mi proyecto, gracias SEBAS. Al apoyo brindado por Manuelita Azúcar y Energía quien a través de sus directivos RODRIGO BELALCAZAR y LUIS GUILLERMO AMU me permitieron llevar a cabo el desarrollo de mi tesis en la Cosecha. A la ayuda de CRISTIAN CUERO funcionario de Manuelita quien siempre estuvo al pie del cañón y en la jugada.

Contenido

Lista de figuras	9
Lista de tablas	11
Resumen	13
Descripción del problema	14
Justificación	16
Objetivos	19
Marco teórico	20
1. Compactación de Suelos	20
1.1 Compactación y Tráfico de Maquinaria	21
1.2 Efectos de la Compactación en los Cultivos de Caña de Azúcar	21
1.3 Impacto del Tráfico de Equipos Durante la Cosecha de Caña de Azúcar	22
2. Resistencia a La Penetración	25
2.1 Tópicos de la Resistencia a la Penetración	25
3. Densidad del Suelo	26
3.1 Densidad Real de Partículas (Dr)	26
3.2 Densidad Aparente (Da)	26
3.3 Densidad Aparente como Indicador de Compactación del Suelo	27
4. Relación Suelo Máquina	28
4.1 Efecto de la Carga Estática del Tractor.	28
4.2 Efecto de la Humedad	29
4.3 Patinaje o Deslizamiento	29
5. Zonificación Agroecológica	30
5.1 Balance Hídrico Regional	30
5.2 Evapotranspiración	30
5.3 Balance Hídrico	31
5.4 Estudio Detallado de Suelos	31
5.5 Grupos de Humedad	33
6. Caracterización del Sistema de Cosecha Mecánica	35

6.1	Maquinaria de Cosecha	36
6.1.1	Especificaciones de Llantas y Presiones de inflado en los Tractores de Cosecha	42
6.1.2	Especificaciones de Llantas y Presiones de inflado en Vagones de Autovolteo	45
7.0	Parámetros de Operación en la Cosecha	45
7.1	Conformación de Surcos	46
7.2	Ajuste de Trochas en Equipos de Cosecha	46
7.2.1	Cosechadora	46
7.2.2	Tractor Y Vagón Autovolteo	48
7.3	Parámetros de Operación (Breachado y Secuencia de Operaciones)	51
8.0	Caracterización de la Zona de Estudio	54
8.1	Valle del Cauca	54
8.2	Localización del Área de Estudio	55
8.2.1	Caracterización Clima	55
8.3	Zonificación Agroecológica	55
8.3.1	Zona Agroecológica 11H0	56
8.3.2	Zona Agroecológica 6H1	56
8.4	Tipo de suelos	57
8.4.1	Grupo Homogéneo de Suelos	57
9.0	Materiales y Métodos	57
9.1	Determinación de Muestreo	57
9.2	Variables de Interés	59
9.3	Análisis Estadístico	62
9.4	Análisis Geoestadístico y Modelación Espacial	62
9.5	Caracterización del Área de Estudio	63
10.0	Análisis de Información en SANTA ANITA 26	67
10.1	Caracterización de Suelo SANTA ANITA para la Operación de Cosecha	68
10.2	Determinación de la Densidad Aparente en Húmedo del Suelo	69
10.3	Análisis de Varianza para la Variable Densidad Aparente	70
10.4	Resistencia a la Penetración	73
10.5	Análisis de Varianza para la Variable Resistencia a la Penetración	74

10.6	Interacción de Condiciones Físicas en Función de la Compactación	78
11.0	Análisis de Información en ITALIA VILLEGAS 25A	78
11.1	Caracterización de Suelo ITALIA VILLEGAS 25A para la operación de Cosecha	79
11.2	Análisis de Varianza para la Variable Densidad Aparente	80
11.3	Resistencia a La Penetración	83
11.4	Análisis de Varianza para la Variable Resistencia a la Penetración	84
11.5	Interacción de Condiciones Físicas en Función de la Compactación	88
	Conclusiones	89
	Bibliografía	91

Lista de figuras

Figura 1	Cosechadora de Caña CASE 8810	38
Figura 2	Dimensiones de la Cosechadora de Caña 8810*	38
Figura 3	Cosechadora de Caña CH570	41
Figura 4	Tractor para Labor de Autovolteo CASE PUMA 180	42
Figura 5	Tractor para Labor de Autovolteo JOHN DEERE 6180J	43
Figura 6	Autovolteo en proceso de cargue	44
Figura 7	Autovolteo en proceso de descargue	45
Figura 8	Ancho de surcos para la cosecha mecánica de caña	46
Figura 9	Trocha en cosechadoras para la labor de corte mecánico de caña	47
Figura 10	Operación de cosecha con espaciamento de surcos a 1.65 m	47
Figura 11	Especificaciones ancho de trocha en tractores utilizados para labor de autovolteo	48
Figura 12	Ajuste de trocha en tractores	49
Figura 13	Trocha de tractores y acomodación en entresurcos	49
Figura 14	Adaptación de trochas en conjunto tractor – autovolteo	50
Figura 15	Características del vagón de autovolteo utilizado en la labor de cosecha de caña	51
Figura 16	Parametrización de brechado para cosecha mecánica	52
Figura 17	Apertura de brecha	53
Figura 18	Pisada de caña con tractor y corte de caña en pie	53
Figura 19	Desarrollo de brecha con surcos cosechados y surcos pisados por el tractor	54
Figura 20	Localización del área de estudio	55
Figura 21	Determinación de la resistencia a la penetración con penetrómetro digital	61
Figura 22	Grupo de suelos SANTA ANITA	64
Figura 23	Grupo de humedad SANTA ANITA	64
Figura 24	Zona agroecológica SANTA ANITA 26	65

Caracterización de la compactación de la cosecha en dos tipos de suelo	10
Figura 25 Consociación de suelo SANTA ANITA 26	65
Figura 26 Grupo de suelos ITALIA VILLEGAS	66
Figura 27 Grupo de humedad ITALIA VILLEGAS	66
Figura 28 Zona agroecológica ITALIA VILLEGAS 25A	67
Figura 29 Modelo Kriging de Densidad aparente para la experimentación en SANTA ANITA	73
Figura 30 Resistencia a la penetración por tratamiento y profundidad de muestreo	76
Figura 31 Modelo Kriging Resistencia a la penetración SANTA ANITA 26	77
Figura 32 Modelo Kriging Densidad aparente	83
Figura 33 Resistencia a la penetración por tratamiento y profundidad de muestreo	87
Figura 34 Modelo Kriging de la resistencia a la penetración ITALIA VILLEGAS	88

Lista de tablas

Tabla 1 Balance hídrico (Distribución de áreas en Manuelita)	31
Tabla 2 Régimen de Humedad (Distribución de áreas en Manuelita)	32
Tabla 3 Orden de suelo (Distribución de áreas en Manuelita)	32
Tabla 4 Clasificación de suelos por grupo de humedad	34
Tabla 5 Clasificación del grupo de humedad en Manuelita	35
Tabla 6 Composición de frentes de cosecha	35
Tabla 7 Caracterización de la maquinaria en cosecha	36
Tabla 8 Caracterización de la cosechadora de caña CASE 8810	37
Tabla 9 Caracterización de la cosechadora de caña CASE 9900	39
Tabla 10 Caracterización de la cosechadora de caña CH570	40
Tabla 11 Caracterización del tractor para labor de autovolteo CASE PUMA 180	41
Tabla 12 Caracterización del tractor para labor de autovolteo JOHN DEERE 6170-6180J	43
Tabla 13 Caracterización de los vagones para la labor de autovolteo	44
Tabla 14 Distribución de zonas agroecológicas en Manuelita	56
Tabla 15 Distribución órdenes de suelo en Manuelita	57
Tabla 16 Distribución de suertes 6H1 y 11H0 Manuelita	58
Tabla 17 Población de interés y tratamientos definidos para la experimentación	59
Tabla 18 Variables de interés para la experimentación	60
Tabla 19 Caracterización zona de estudio	63
Tabla 20 Tratamientos comparativos de evaluación	68
Tabla 21 Resultados estadística descriptiva SANTA ANITA 26	70
Tabla 22 Análisis de varianza en Densidad Aparente	70
Tabla 23 Promedio Densidad aparente de los tratamientos evaluados	72
Tabla 24 Resistencia a la penetración promedio de Santa Anita 26	74

Caracterización de la compactación de la cosecha en dos tipos de suelo	12
Tabla 25 Análisis de varianza en Resistencia a la penetración	74
Tabla 26 Resistencia a la penetración promedio por tratamientos	75
Tabla 27 Resultados estadística descriptiva ITALIA VILLEGAS 25A	80
Tabla 28 Análisis de varianza en Densidad Aparente	80
Tabla 29 Promedio Densidad aparente de los tratamientos evaluados	82
Tabla 30 Resistencia a la penetración promedio de Italia Villegas 25A	84
Tabla 31 Análisis de varianza en Resistencia a la penetración	84
Tabla 32 Resistencia a la penetración promedio por tratamientos	86

Resumen

Se llevó a cabo un proceso de caracterización de la variabilidad espacial en la compactación ocasionada durante la cosecha mecánica de caña en dos suelos representativos del ingenio Manuelita, correspondientes a las zonas agroecológicas 11H0, 6H1, se identificaron efectos significativos de la intensidad de tráfico sobre la compactación, siendo el mayor valor en los sitios donde se llevó a cabo con dos pases de cosechadora y conjunto tractor – vagón de autovolteo (478.79 Mg*km/ha) superior en un 39% a los sitios donde transitó una vez el tractor – vagón de autovolteo, la densidad aparente determinada en el suelo 11H0 (textura franca) no presentó diferencias significativas en los distintos niveles de intensidad de tráfico presentados en la cosecha mecánica de caña aunque se presentó un incremento en la magnitud de la densidad aparente en húmedo luego del tránsito de la maquinaria de cosecha, observándose un valor máximo de 1.64 g/cm³. La resistencia a la penetración para los dos tipos de suelos de texturas francas y arcillosas presentó diferencias significativas resultantes del número de pasadas de los equipos, alcanzando para la textura franca valores de 2.33 MPa en 30 cm de profundidad y en el suelo arcilloso alcanzó 1.68 MPa a profundidades de 50 cm. El conocimiento de la distribución espacial de la compactación es de vital importancia para planificar y determinar la mejor secuencia de las operaciones con los equipos de corte y cadeneo que realizan la labor de cosecha mecánica de caña, así como la determinación de los patrones adecuados en la operación que garanticen el menor impacto en el suelo.

Palabras clave: *Compactación, resistencia a la penetración, densidad aparente, cosecha mecánica de caña de azúcar*

Descripción del problema

Los sistemas agrícolas de producción de caña de azúcar establecidos en el Valle del río Cauca se caracterizan por tener cosecha todos los días del año, debido a que el tipo de suelos y el clima de la región ofrecen condiciones favorables para el desarrollo de las operaciones de cosecha mecánica. Condiciones de alto tráfico de la maquinaria ocasiona significativos cambios en la física del suelo, (Torres & Villegas, 1993) reportaron efectos en la producción del 10% cuando el tráfico se confina en el entresurco y hasta un 42% cuando se genera tráfico directo sobre la cepa.

Mediante la evaluación de propiedades físicas en el suelo (Letey, 1985) determinó la relación de la productividad de los cultivos en función la densidad aparente y estabilidad de los agregados como factores limitantes en el crecimiento de las raíces que son afectadas por intensidades de tráfico y laboreo que le ofrecen alta resistencia mecánica para su exploración y limitada disponibilidad de agua, oxígeno y energía para su desarrollo. El crecimiento de las raíces se desarrolla a través de la estructura del suelo haciéndola vencer la resistencia mecánica que el mismo medio le impone. (Barley & Greacen, 1963), definieron el comportamiento de las raíces en el suelo como agentes que lo deforman, principalmente a través de procesos de fractura y compresión, factores que determinan la resistencia a la penetración y se encuentran en función de la cohesividad y compresibilidad. De acuerdo con (Taylor & Ratliff, 1969) la resistencia a la penetración del suelo se presenta por menores contenidos de humedad y una mayor densidad aparente que resulta de una agregación de partículas con una reducida compresibilidad y alta fricción.

El efecto de compactación en el suelo generado por tráfico de maquinaria agrícola conlleva a una degradación estructural del suelo que varía espacialmente y cuya principal causa se deriva del uso de maquinaria de gran tamaño y peso ocasionando grandes problemas en el suelo, (Arvidsson & Hakansson, 1996) caracterizaron el tráfico de la maquinaria como uno de los causantes en el incremento de la densidad en el suelo a través del contacto superficial entre el conjunto rueda – superficie, lo que podría extenderse a distancias considerables de la superficie.

(Touchton *et al.* 1989) reportó compactación inducida por maquinaria ocasionando efecto a 25 cm de profundidad, igualmente (Wood *et al.* 1991) determinó que el tráfico de vagones por cosecha de granos con presión de inflado en sus llantas de 210 KPa, generaron cambios significativos en las propiedades físicas del suelo a profundidad de 40 cm.

(Atwell, 1990) encontró que las raíces de las plantas al someterse a elevada resistencia mecánica bajan su elongación e incrementan el diámetro presentando contorsión y estimulación a crecimiento horizontal. Estudios realizados por (Veen, 1982) determinaron que las raíces laterales de maíz se generan en respuesta al proceso de compactación en el suelo, siendo más ramificadas que las generadas en el eje principal. (Goss & Russel, 1980) concluyeron que plantas de cebada sometidas altos niveles de resistencia a la penetración produjeron más macollo y raíces que el testigo, sin embargo, (Atwell, 1990) reportó que plantas de trigo sometidas a alto nivel de compactación del suelo retrasan la formación de macollos en comparación con plantas establecidas en mejores condiciones de disgregación de suelos, igualmente (Goss & Russel, 1980) en experimentos con remolacha notaron una reducción en el crecimiento de las plantas debido a altos niveles de resistencia a la penetración. (Terminiello *et al.* 2000) reporta reducción en producción de cultivos entre 20% y 76% debido a problemas de compactación, (Jorajuria, 1997) encontró que valores altos de densidad aparente pueden reducir hasta un 76% la producción de gramíneas, no obstante, en sus experimentos

(Richmond & Rillo , 2006) evidenciaron un incremento sobre la producción de trigo del 21.9% en condiciones de cero tráfico de maquinaria sobre el suelo.

De acuerdo con (Gomez, 2011), el tránsito de maquinaria genera un impacto en la compactación del suelo en función al número de pases resultando daños en la estructura y baja productividad en los cultivos. (Terminiello *et al.* 2000) reporta un mayor número de pasadas sobre los surcos ocasiona incrementos en la resistencia a la penetración en la superficie del suelo, de igual manera (Pagliai *et al.* 2003) determinó que intensidades de tráfico mayores a cuatro pasadas del tractor (oruga o neumático) impacta la macroporosidad del suelo a profundidad de 0 a10 cm en suelos de textura arcillosa.

Justificación

En la producción de caña de azúcar en el Valle del río Cauca, las operaciones de cosecha mecanizada ocasionan un tránsito intensivo de maquinaria pesada sobre el suelo, afectando sus propiedades físicas y por ende su productividad. En las instalaciones agroindustriales productoras de azúcar (Ingenios), el abastecimiento de materia prima a la planta de extracción requiere un flujo permanente de caña durante todo el año el cual no puede ser interrumpido, obligando en ocasiones a realizar la cosecha en condiciones de humedad del suelo que no son las óptimas para el tráfico de la maquinaria; como resultado de esta operación el suelo presenta alteraciones en sus propiedades físicas, compactándose debido al tráfico durante la operación de cosecha.

De acuerdo con (Taylor & Gill, 1984) un factor de compactación en el suelo se genera por el tráfico de la maquinaria generando limitación de la porosidad, menor capacidad de retención de humedad y limitaciones en el desarrollo radicular. (Smith D & Dickson J, 1990) reportaron que la compactación en perfiles superficiales se genera por la presión ejercida de las

ruedas del tractor al suelo, no obstante, la compactación en los horizontes más profundos está directamente influenciada por el peso de la maquinaria.

En la planeación de las operaciones agrícolas de cosecha en el cultivo de caña de azúcar, se hace necesario caracterizar el impacto de la labor y el efecto en la física del suelo para mitigar procesos de compactación, más aún, garantizando la sostenibilidad del cultivo aumentando niveles de productividad y disminuyendo costos en las labores de levante y renovación.

Debido a la variabilidad en la física del suelo y del tipo de tráfico de las cosechadoras, tractores y vagones, se ocasiona una variabilidad de la compactación del suelo, factor que debe estudiarse y ser considerado en la planificación y ejecución de las secuencias de las operaciones con los equipos de corte y transporte que realizan la labor de cosecha mecánica, así como la determinación de los patrones adecuados en la operación que garanticen el menor impacto en el suelo, de igual manera la caracterización de la compactación y sus distribución espacial permitirá desarrollar herramientas para la toma de decisiones en campo que garanticen el momento óptimo y tiempos para definir operaciones agrícolas, profundidad de labor y patrones de operación en labores de encalle, subsuelo, fertilización mecánica y riego.

A nivel de cosecha es determinante el conocimiento del tráfico de las operaciones y el impacto en las propiedades físicas del suelo, de forma que se permita validar el impacto de los sistemas y patrones actuales de operación que permita la definición de nuevos equipos, patrones de operación, tecnologías o diseños de vagones más livianos para el cargue de caña.

El presente trabajo de investigación aportó nuevos conocimientos sobre el comportamiento espacial de la compactación en las operaciones de cosecha mecanizada de caña y su interacción con el componente suelo, ofreciendo mediante el análisis geoestadístico del comportamiento de la compactación en dos tipos de suelo representativos del área cultivada

en el Ingenio Manuelita, información útil para decisiones en función del manejo y conservación del suelo, en el marco de la agricultura de precisión.

Objetivos

General

Caracterizar la compactación ocasionada por un sistema de cosecha mecánica en dos suelos representativos del ingenio Manuelita.

Específicos

1. Determinar la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en dos tipos de suelos, correspondientes a las zonas agroecológicas 11H0, 6H1, antes y después de la operación de cosecha mecánica.
2. Determinar la variabilidad espacial de la densidad aparente en húmedo en dos tipos de suelos, correspondientes a las zonas agroecológicas 11H0, 6H1, antes y después de la operación de cosecha mecánica.
3. Determinar la intensidad de tráfico en operaciones de cosecha mecánica en dos tipos de suelos, correspondientes a las zonas agroecológicas 11H0, 6H1.

Marco teórico

1. Compactación de Suelos

La compactación se define como la pérdida en el espacio poroso del suelo ocasionado por presiones externas que generan compresión e incremento de densidad en el perfil de suelo lo que restringe el normal crecimiento de los cultivos. De acuerdo con (Adebiyi *et al.* 1991) la compactación es la resultante de tensiones ocasionadas por el tránsito de vehículos agrícolas y patinamiento de sus ruedas motrices. (Smith D & Dickson J, 1990) determinaron que la presión de las ruedas influye en la compactación. (Van den Akker, 1998), encontró que el área del perfil de suelo mostrando deformaciones plásticas llegaba casi hasta los 60 cm en el caso de la rueda de menor tamaño y solo hasta los 35 cm cuando se usaba la rueda de mayor tamaño. Concluyó que las deformaciones y compactaciones debajo de una rueda con baja presión son del orden del 30 a 50% de aquellas ocasionadas por una rueda convencional inflada a un 33% más de presión. (Jorajuría *et al.* 1995) divide la compactación en dos problemas diferentes el peso sobre los ejes y las presiones de contacto.

La compactación inducida se define como:

- Superficial: disminución de macroporos asociada a labores posteriores a la labranza primaria que requieren mayor tracción.
 - Subsuperficial: disminución del espacio poroso debido a la transmisión de presiones de rodaje ejercidas sobre el suelo.

Estudios realizados por (Letey, 1985) definieron que la densidad aparente, tamaño de poros y estabilidad de agregados influyen en el crecimiento de las raíces.

1.1 Compactación y Tráfico de Maquinaria

Con el incremento de la mecanización y el desarrollo de maquinaria de mayor eficiencia en las operaciones se evidencian tendencias en máquinas cosechadoras con masas superiores

a 16 Mg en eje frontal y tractores con pesos equivalentes a 200 kN (Gutierrez *et al.* 2015) lo que traduce en funciones agrícolas más económicas al reducir costos operativos con el incremento de superficie laborada. (Taylor & Gill, 1984) sugieren que la compactación se define como la resultante de tensiones ocasionadas por la masa y peso de la maquinaria en determinados pases sobre el suelo. Estas condiciones sugieren que la compactación impacta el espacio poroso y afecta la capacidad de retención de humedad en el suelo (Jorajuria & Draghi, 2000). Según (Botta *et al.* 2002) el tráfico de la maquinaria es el principal factor de compactación en los suelos, siendo la textura y el contenido de humedad los aspectos más relevantes con relación al espacio poroso, siendo los suelos arcillosos los de mayor riesgo de vulnerabilidad a la compactación. (Jorajuria *et al.* 1997) define como un factor determinante en la compactación el número de pasadas de la maquinaria lo que genera un incremento en la densidad aparente.

1.2 Efectos de La Compactación en Cultivos de Caña de Azúcar

Las tecnologías de producción de caña presentan una evolución referente a maquinaria e implementos que provoca compactación en los suelos (Laia *et al.* 2006), autores como (Souza *et al.* 2005) definen la mecanización de la cosecha como un factor de afectación en la producción, ciclos de cultivo y las propiedades del suelo. (Letey, 1985) determinó que el crecimiento de las raíces está determinado por factores como la resistencia mecánica del suelo, disponibilidad de agua, oxígeno y energía. Estudios realizados por (García *et al.* 2010) en un suelo con 64% de arcilla evidenciaron un incremento entre 3 y 8 MPa en la resistencia del suelo a profundidades entre los 12 y 25 cm debido al tráfico de la maquinaria. Estudios realizados por (Cairo, 1985) determinaron que $1.1 \frac{gr}{cm^3}$ corresponde a una densidad crítica para caña de azúcar con arcilla 2:1, alta retención de humedad y limitado drenaje. Con respecto al desarrollo radicular (Séguy *et al.* 1999) señalaron que las raíces son afectadas por la reducida

macroporosidad y el incremento en la resistencia del suelo lo cual limita la concentración de oxígeno y procesos de absorción.

1.3 Impacto del Tráfico de Equipos Durante la Cosecha de Caña de Azúcar

(Rodríguez & Valencia, 2012) mencionaron la compactación como un problema en el cultivo de caña el cual incrementa durante las labores de cosecha debido a la alta intensidad de tráfico que requiere la labor. Autores como (Botta *et al.* 2007) establecen como la principal causa en los procesos de compactación en los suelos es el pisoteo de la maquinaria en las labores de cosecha y recolección cuando se realizan en húmedo y las llantas generan altas presiones en el área de contacto suelo-llanta. La intensidad de tráfico es un parámetro que determina la distribución de las pasadas de la maquinaria sobre el campo y es determinante para la comparación de las labores de cosecha y efectos en la producción, (Botta *et al.* 2007) determinaron diferencias significativas en maíz debido a la alta intensidad de tráfico. Intensidades de tráfico entre 60 y 180 Mg Km ha⁻¹ ocasionaron pérdidas de producción entre 9.8 y 38%. (Hamza & Anderson, 2005), plantearon alternativas para minimizar el efecto del tránsito de maquinaria, tales como tránsito controlado, reducción de pases y bajar la presión de contacto con menor carga por eje mediante el uso de llantas con gran superficie de contacto. (Rodríguez & Valencia, 2012) mencionaron que contenidos de humedad en suelos arcillosos y limosos determinan el comportamiento mecánico del suelo, mientras en suelos con altos contenidos de arena los factores mecánicos tienen menor dependencia de las condiciones de humedad y son más dependientes a la densidad aparente. El diseño de campo interactúa con la maquinaria y generan información a través de mediciones que aportan diagnósticos de pisoteo sobre la cepa que depende de las dimensiones de la maquinaria, el espacio de entre surcos y ancho de los callejones para su respectivo tránsito. (Rodríguez & Valencia, 2012).

De acuerdo con estudios realizados por (Rodríguez & Valencia, 2012), para una cosecha de 250 m de longitud los vagones se movilizan una distancia de 615 m lo que genera

un 23% del tiempo vacío haciendo recorrido dentro del campo y 63% efectivo cosechando. En el corte mecánico de caña de azúcar la intensidad de tráfico ocasionado por la maquinaria es muy alta debido a la menor área cosechada, la intensidad de tráfico presenta variaciones que oscilan entre 317 Mg km ha⁻¹ en cosecha mecánica con vagones supermilenio HD20000 y 241 Mg km ha⁻¹ en vagones de autovolteo (Rodríguez & Valencia, 2012). Consideran que las diferencias se deben a configuraciones y tipo de vagones empleados, además, del recorrido sobre el lote cosechado y la capacidad del tractor. Los daños durante la cosecha una parte se ocasionan por compactación y pisoteo sobre el cultivo cosechado (Rodríguez & Valencia, 2012). Estudios realizados por (Kroulik *et al.* 2009) determinaron que en cultivos mecanizados el 95.3% del área es pisada por lo menos una vez en cada ciclo de cultivo. En la cosecha mecánica de caña la cosechadora, vagón y tractor ocasionan pisadas equivalentes entre el 120-138% del área cosechada para entresurcos en rangos entre 1.50 a 1.75 m y 45 a 65% de los entresurcos son expuestos a una doble pasada de la maquinaria que dependerá del ancho de la melga cosechada (Rodríguez & Valencia, 2012).

(Rodríguez & Valencia, 2012) definen que el pisoteo de la cepa es ocasionado por las diferencias entre las trochas de la maquinaria y ancho del entresurco, influyendo el ancho de cepa y la sección de la llanta. Los efectos ocasionados por el pisoteo de la maquinaria sobre la cepa son críticos durante las labores de cosecha mecánica debido a que una alta proporción de entresurcos es transitado o pisado dos veces por la máquina cosechadora, vagón y tractor. Diferencias en la distancia entre surcos y ancho de maquinaria ocasiona compactación sobre el surco generando efectos negativos en la producción (Braunack & McGarry, 2006). Vagones con trochas entre 2.0 y 2.15 m, emplean llantas entre 560 - 587 mm de sección generan pisoteo del 5% del ancho sobre la cepa del cultivo establecido a 1.75 m de distanciamiento entre surcos y puede llegar al 24% en cultivos establecidos a 1.65 m de distanciamiento entre surcos (Rodríguez & Valencia, 2012). Estudios llevados a cabo por (Laia *et al.* 2006)

evidenciaron que en los cultivos de caña de azúcar la resistencia a la penetración depende de la textura del suelo, número de cortes, no obstante, (Terminiello *et al.* 2000) concluyó que la compactación inducida por el tráfico de maquinaria se determina con la resistencia a la penetración. (Rodríguez & Valencia, 2012) indicaron que la resistencia a la penetración es influenciada por la humedad en los suelos. En suelos con alto contenido de arcilla y bajo contenido de humedad la cohesión de las partículas y la resistencia a la penetración son elevadas. Experimentos llevados a cabo por (Rodríguez & Valencia, 2012) determinaron en un suelo Typic Haplusters arcilloso con 21% de humedad antes de la cosecha una resistencia a la penetración mayor a 2.0 MPa en 0.20 m y 3.3 MPa en 0.80 m de profundidad, valores que referencian un efecto de compactación ocasionado por el tránsito de maquinaria y la humedad del suelo. Los niveles de compactación aumentan en la cosecha debido al peso de los equipos y repetición de pases, ocasionando mayores incrementos de resistencia a la penetración en el subsuelo a causa de altas cargas (Rodríguez & Valencia, 2012).

(Rodríguez & Valencia, 2012) determinaron el impacto en la cosecha usando vagones livianos con respecto a vagones pesados, obteniendo diferencias no significativas en la producción del 13.9%, cabe anotar que las características de los vagones generan efectos sobre el suelo y cultivo debido a que a mayor capacidad y tamaño es alta la probabilidad de mayor intensidad de tráfico y el pisoteo de cepas. Una cosecha adecuada debe brindar dos condiciones en la operación: menor recorrido nulos y tractores ajustados a la dimensión de vagones, factores que minimizan la intensidad de tráfico y el efecto del trabajo mecánico por tonelada de caña cosechada, además, concluyeron que los vagones de autovolteo usados para la cosecha de caña con peso equivalente a 160 kN, generan menos impacto en el suelo y el cultivo, además, garantiza la preservación de la productividad (Rodríguez & Valencia, 2012).

2. Resistencia a la Penetración

La humedad del suelo impacta tres factores que determinan la resistencia a la penetración: cohesividad, ángulo de fricción interna y compresibilidad (Gill & Camp, 1969). Como resultado de los tres factores valores mínimos de resistencia a la penetración se presentan cuando el suelo tiene altos contenidos de humedad.

En estudios realizados por (Threadgill E. , 1982) evidenció que valores superiores a los 1,5 MPa impactan el desarrollo radicular de las plantas, mientras que los valores en un rango de 2,1 a 2,5 MPa detienen el crecimiento de las raíces. (Daddow & Warrington, 1983) determinaron como umbral de crecimiento radicular referencias de densidad aparente equivalente a $1,65 \frac{Mg}{m^3}$. (Materechera *Et al.* 1991) en evaluaciones llevadas a cabo en suelos compactados comentó que las raíces con mayor resistencia mecánica crecen menos y tienden a ser finas con ramificaciones laterales.

2.1 Tópicos de la Resistencia a la Penetración

La resistencia a la penetración del suelo (RP) es una propiedad que permite evaluar la compactación inducida por el peso estático de la maquinaria que transita sobre el suelo, sus valores están condicionados por otras propiedades físicas del mismo como la textura, humedad y densidad. Para la medición de la resistencia a la penetración se emplea el penetrómetro de cono con ángulo de 30 grados (Jiménez *et al.* 1992). La medición de la resistencia a la penetración es afectada por piedras y el contenido de humedad en el suelo (Sullivan *et al.* 1967).

(Threadgill E. , 1982) reporta alta correlación entre niveles de compactación y resistencia del suelo, además, acepta que valores de resistencia mayores a 2 MPa impactan los rendimientos de los cultivos y valores por encima de 1.5 MPa disminuyen la tasa de crecimiento de las raíces. (Jiménez *et al.* 1992) concluyeron en estudios de resistencia a la penetración

como un indicador para evaluar los efectos físicos sobre el suelo sometido a tránsito y operaciones de labranza.

3. Densidad del Suelo

La densidad relaciona la masa y el volumen del suelo, la cual se define como densidad de partículas (densidad real) o total del suelo (densidad aparente) (Valenzuela & Torrente, 2010).

3.1 Densidad Real de Partículas (D_r)

La densidad real se define como la determinación de la densidad de partículas sólidas que componen el suelo sin tener en cuenta el volumen de poros (Valenzuela & Torrente, 2010). El método del picnómetro es el más empleado para medir la densidad de sólidos o gravedad específica y consiste en determinar la masa y el volumen de sólidos del suelo a través de un frasco de volumen conocido (Valenzuela & Torrente, 2010).

$$D_r = \frac{M_s}{V_s} = \frac{(M_{pss} - M_{pv}) * D_w}{(M_{pw} - M_{pv}) - (M_{pssw} - M_{pss})} \quad (3.1)$$

$D_r, D_w =$ densidad de partículas sólidas y densidad del agua ($\frac{g}{cm^3}$)

- M_{pss} : masa del picnómetro más suelo seco (g).
- M_{pv} : masa del picnómetro vacío (g).
- M_{pw} : masa del picnómetro más agua (g).
- M_{pssw} : masa del picnómetro más agua, más suelo seco (g).

3.2 Densidad Aparente (D_a)

La densidad aparente se determina como la relación en el peso de los sólidos del suelo frente al volumen total (Valenzuela & Torrente, 2010). La densidad aparente se determina por el método del cilindro (muestra de suelo sin disturbar en un cilindro de volumen conocido y secado a 105°C durante 24 horas). También existe otra técnica que determina la densidad aparente de los suelos a través del método del terrón (consiste en separar el suelo "in situ" terrones para luego pesarlos siendo recubiertos con parafina) (Valenzuela & Torrente, 2010).

$$Da = \frac{Ms}{Vt} \quad (3.2)$$

- Ms: masa del suelo húmedo menos suelo seco a 105°C (g).
- Vt: volumen total del cilindro (cm³)

3.3 Densidad Aparente como Indicador de Compactación del Suelo

De acuerdo con (Baver *et al.* 1991) la compactación es un proceso resultante de la aplicación de cargas y ocasiona la pérdida en el volumen de poros y altera la densidad aparente. (Blanco, 2009) determinó que cambios estructurales ocasionados por la compactación alteran las propiedades físicas del suelo alterando el crecimiento de las plantas por menor conductividad hidráulica y retención de humedad, ocasionando una deficiencia de aire para el desarrollo de las plantas. Así mismo la degradación de la estructura del suelo por compactación genera una ralentización o paralización del desarrollo de las raíces al aumentar la resistencia mecánica del suelo (Bengough, 1991).

La densidad aparente y la resistencia mecánica son propiedades usadas para analizar la degradación de los suelos por compactación debido a las actividades agropecuarias (Blanco, 2009), sin embargo, la relación entre ambas ha originado resultados contrastantes. (Voorhees, 1983) señaló que la densidad aparente y la resistencia a la penetración permiten medir niveles de compactación en el suelo pero no tienen correlación entre si. En este sentido la resistencia mecánica es un método más sensible para medir la compactación del suelo sobre todo en profundidad, pero es sensible a los cambios producidos en el suelo por microgrietas, fracturas y porosidad, mientras que la densidad aparente es sensible solo a los cambios de porosidad en el suelo. Resultados de densidad aparente y resistencia mecánica se caracterizan por elevada variabilidad espacial debido a condiciones ambientales de los puntos de muestreo, sin embargo, (Stitt *et al.* 1982) observó una relación directamente proporcional entre la resistencia a la penetración y la densidad aparente con correlaciones de 0.89 ($p < 0.05$) a 0.99 ($p < 0.001$).

4. Relación Suelo Máquina

La resistencia mecánica de un suelo depende de su contenido de humedad y la proporción de arcillas, en la medida que se generan esfuerzos sobre su superficie se generan rupturas y deformaciones. De acuerdo con (Kirbi, 1991) quien investigó sobre los problemas relacionados con el sistema poroso y los efectos sobre la variación en la permeabilidad de los suelos expuestos a compresión y corte, relacionó la falla por corte con la expansión o reducción del volumen total del suelo y sus efectos sobre la funcionalidad del sistema poroso, revelando una disminución de la permeabilidad, lo que evidencia el rol primordial de la continuidad de los macroporos. La respuesta del suelo a la fuerza que se le aplica con las máquinas e implementos dan como resultado la distribución del tamaño de sus partículas, la cantidad de la fracción arcilla, materia orgánica y contenido de humedad. La resistencia a la compresión del suelo aumenta hasta alcanzar un máximo situado dentro del intervalo plástico y luego disminuye debido a fenómenos relacionados con la orientación de las partículas (Copper, 1971). Como la mecanización del suelo está en función de la textura y la estructura en razón a que cualquier presión ejercida sobre el mismo, incluso su propio peso según sea el contenido de humedad, se traduce en reagrupación y reordenamiento de las partículas y microagregados que lo componen, si se tiene una granulometría dominada por partículas finas es fácil que un buen porcentaje de espacios vacíos sea ocupado por las partículas del suelo cambiando la disposición de los poros y con ello la labranza e incorporando los residuos de cosechas se reduce la erosión, se conserva la humedad, se disminuye la compactación al no tener que pasar la máquina varias veces y además se reduce el costo de mano de obra (Gavande, 1979).

4.1 Efecto de la Carga Estática del Tractor.

La carga estática se define como la fuerza total normal a un plano de referencia sobre el cual rueda la máquina y es equivalente al peso total del tractor y su distribución sobre los ejes.

El esfuerzo en la superficie se propaga, disminuyendo a medida que la profundidad aumenta y dependerá de la presión de los neumáticos y la presión interna. (Soane *et al.*1981) comentaron que el área de contacto de las ruedas sobre la superficie rígida depende del tamaño y tipo de llanta (radial o convencional), carga estática, presión de inflado y condiciones de suelo.

4.2 Efecto de la Humedad

El agua destruye la agregación y deteriora la estructura del suelo a través de la caída de la lluvia, ocasionando este impacto una dispersión de partículas hasta el interior de los poros causando que la compactación aumente y disminuya la porosidad (Gavande, 1979).

4.3 Patinaje o Deslizamiento

Una de las muchas variables implicadas en la interacción suelo-máquina es el patinaje de las ruedas, ya que produce alta densidad en el suelo durante la operación de la maquinaria (Chaparro & Romero, 1995). El deslizamiento se define como el movimiento relativo en la dirección de recorrido en la superficie de contacto entre el tractor y el suelo. El deslizamiento es probablemente la causa sustancial del realineamiento de las partículas en una orientación paralela a la dirección de la fuerza y esto incrementa la cohesión y por lo tanto los esfuerzos en el suelo que retardan los movimientos del agua (Davies *et al.*1973). A un alto porcentaje de deslizamiento, la estructura del suelo se deteriora y el desgaste de las llantas es alto, a un bajo porcentaje de deslizamiento la tracción en relación con el peso del tractor es baja y algunas veces se incrementa la demanda del tiro, la cual puede producir serios impactos en la maquina y su manejo (Koleen & Kuipers, 1983). El porcentaje de deslizamiento a una eficiencia de tracción máxima varía desde un 10% bajo unas buenas condiciones a un 20% en malas condiciones. Si el porcentaje de deslizamiento es muy diferente del deslizamiento a máxima eficiencia, el consumo de combustible es innecesariamente alto. Porcentajes de deslizamiento más bajos que un 10% y por encima de un 15% deberán ser evitados. Se han realizado estudios, arando el suelo con diversos tractores de manera arbitraria y se obtuvo que el

porcentaje de deslizamiento varía de un 13 a un 39%, otras mediciones del porcentaje de deslizamiento para un gran número de tractores arando suelos arenosos y arcillosos y se puede concluir que estos porcentajes frecuentemente no son óptimos y que estos pueden influenciar más fácilmente los procesos de compactación (Koleen & Kuipers, 1983).

5. Zonificación Agroecológica

La zonificación agroecológica corresponde a agrupación de zonas homogéneas, que estiman una respuesta del cultivo en similares condiciones (Carbonell *et al.* 2011). La construcción de la zonificación agroecológica integró secuencias metodológicas de análisis de datos asociados con el balance hídrico regional, estudio de suelos del Valle del Cauca, grupos de humedad y homogéneos de suelos (Carbonell *et al.* 2011), obteniendo como resultado una herramienta que aporta metodología y criterios de decisión en el desarrollo de experimentos agrícolas y extrapolación de resultados a zonas con similares características. A continuación, se resume las principales variables que integran la herramienta:

5.1 Balance Hídrico Regional

El balance hídrico se desarrolló en función de las variables precipitación y evaporación (Torres *et al.* 2004), además, identifica las zonas y periodos con déficit y excesos de humedad. De acuerdo con (Carbonell *et al.* 2011) el desarrollo de la herramienta requirió análisis de precipitación con más de 15 años de registros en una red de 216 pluviómetros operados en toda la región, dicha integración de información fue analizada como precipitación anual con probabilidad de exceso del 75%.

5.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración se define como el consumo de agua en la planta y el proceso de pérdida por evaporación en la superficie del suelo y la absorción a través de la raíz que posteriormente genera pérdida por transpiración a través del área foliar (Torres *et al.* 2004). De acuerdo con (Carbonell *et al.* 2011) el desarrollo de la herramienta requirió para su cálculo el

uso de datos históricos con más de 10 años de evaporación a través de registros de tanque evaporímetro clase A ubicados en estaciones meteorológicas de la región. La integración de la información fue completada con información de radiación solar, oscilación, velocidad de viento y humedad que permitieron analizar datos de evaporación diaria con probabilidad de ocurrencia del 50% y coeficiente del cultivo $K_c=0.7$ para determinar la evapotranspiración.

5.3 Balance Hídrico

El balance hídrico fue analizado con base en la precipitación y evapotranspiración, factores que para el Valle del Cauca determinaron que el 60% del sector azucarero tiene déficit de humedad (<0 mm/año) (Carbonell *et al.* 2011), siendo estas tierras asociadas a ingenios de las zonas de Cerrito, Candelaria y Palmira. En cuanto a los niveles de excesos de humedad (0-200, 200-600 y >600 mm/año) se presentan principalmente en áreas cultivadas del norte del Cauca y Valle del Cauca. La tabla 1 presenta la distribución de acuerdo con el balance hídrico de Manuelita siendo >0 mm áreas con déficit y entre 0-200 mm áreas con exceso de humedad).

Tabla 1

Balance hídrico (Distribución de áreas en Manuelita)

Balance Hídrico	>0 mm Déficit	0-200mm Exceso	>200 -mm Exceso	Total
Área (Ha)	22,626	1,839	0	24,466

5.4 Estudio Detallado de Suelos

De acuerdo con (Carbonell *et al.* 2011), a diciembre del 2010 se obtuvo una base de datos geográfica administrada por Cenicaña en la cual se caracterizan en el Valle del Cauca 232 unidades de suelos en 212,200 hectáreas sembradas en caña. La clasificación de los suelos se agrupó de acuerdo con el régimen de humedad (agua aprovechable, punto de marchitez y saturación). En el Valle del Cauca se tienen tres regímenes de humedad que son

clasificados como Ústico (suelo seco parcialmente durante 90 días acumulativos), Údico (humedad del suelo no está seco en un periodo de 90 días acumulativos) y Ácuico (saturación del suelo por agua freática durante un lapso de pocos días). En la tabla 2 se presenta la distribución de acuerdo con el régimen de humedad en los suelos de Manuelita, siendo la mayor proporción de régimen Ústico.

Tabla 2

Régimen de Humedad (Distribución de áreas en Manuelita)

Régimen Humedad	Ústico	Údico	Ácuico	Total
Área (Ha)	23,072	5,0	1,379	24,456

Según (Carbonell *et al.* 2011) la distribución del área cultivada en caña en el Valle del Cauca está representada en mayor proporción por suelo Mollisol (48%), que se caracteriza por tener buena estructura y consistencia que facilita el desarrollo radicular de los cultivos. El segundo orden más representativo en la región es el Vertisol (31%) de textura arcillosa y ricos en arcillas expandibles que se agrietan cuando la humedad del suelo es baja. La tabla 3 presenta la distribución de ordenes de suelos en las áreas de Manuelita, siendo su mayor proporción en suelos Mollisol.

Tabla 3

Orden de suelo (Distribución de áreas en Manuelita)

Orden de Suelo	Mollisol	Vertisol	Inceptisol	Entisol	Total
Área (Ha)	15,490	6,102	2,671	186	24,44

5.5 Grupos de Humedad

Los grupos de humedad representan condiciones normales o exceso de humedad. Cenicaña a través de la herramienta de zonificación agroecológica precisó condiciones de suelo, topografía y condiciones de humedad (Carbonell *et al.* 2011). En la clasificación Cenicaña validó en 86 sitios del Valle del Cauca el balance hídrico a una probabilidad de exceso de precipitación del 75% y determinó in situ la permeabilidad del suelo para determinar la influencia en las condiciones de humedad. La tabla 4 y 5 presentan la clasificación de acuerdo con el grupo de humedad de suelos haciendo su clasificación de acuerdo con los niveles de humedad (exceso/déficit) y permeabilidad.

Tabla 4*Clasificación de suelos por grupo de humedad*

Grupo humedad suelos	Nivel Exceso o Déficit (mm/año)	Permeabilidad del suelo
H0 Déficit	< 0	Media a Alta
	0-200	Media a Alta
H1 Humedad Normal	<0	Baja
	200-400	Media a Alta
H2 Humedad Baja	0-200	Baja
	400-600	Media a Alta
H3 Humedad Media	200-40	Baja
	>600	Alta
H4 Humedad Alta	400-600	Baja
	>600	Baja a Media
H5 Humedad Muy Alta		

Tabla 5*Clasificación del grupo de humedad en Manuelita*

Grupo de Humedad	H0	H1	H2	H3	H4	TOTAL
Área (Has)	9,019	12,691	1,623	1,069	54	24,456

6. Caracterización del Sistema de Cosecha Mecánica

La cosecha de Manuelita tiene una capacidad instalada de 9.700 toneladas diarias que garantiza un suministro permanente y oportuno a la planta de producción. La cosecha está compuesta por siete frentes de cosecha mecánica que aportan el 100% del ingreso de la caña diaria a molienda, su capacidad de cosecha está en función de las zonas programadas, diseños de campo y condiciones que limitan la productividad (piedra, humedad, obstáculos, entre otros). La tabla 6 presenta la composición de los frentes de cosecha y sus capacidades.

Tabla 6*Composición de frentes de cosecha*

Frente	Capacidad (Ton/día)	Configuración
1	1.100	2 Cos – 4 Trc – 4 Autov
2	1.100	2 Cos – 4 Trc – 4 Autov.
7	900	2 Cos – 5 Trc – 4 Autov.
8	1.000	2 Cos – 5 Trc – 4 Autov.
9	2.000	3 Cos – 6 Trc – 6 Autov.
11	1.800	3 Cos – 6 Trc – 6 Autov.
13	1.800	3 Cos – 6 Trc – 6 Autov.

Cos: Cosechadora; Trc: Tractor; Autov: Autovolteo

6.1 Maquinaria de Cosecha

La flota de cosecha está compuesta por 17 cosechadoras, 36 tractores y 36 vagones de autovolteo los cuales están asignados a los frentes mecanizados y garantizan una relación de 2:1 en el conjunto cosechadora – tractor de forma que se reduzca la pérdida de tiempo durante las operaciones de corte. La tabla 7 describe la caracterización de la maquinaria asignada a los frentes de cosecha.

Tabla 7

Caracterización de la maquinaria en cosecha

Equipo	Cantidad	Marca	Potencia
Cosechadora	12	CASE AUSSTOFT A8810	Potencia 352 HP a 2.100 rpm
	3	CASE AUSTOFT 9900	Potencia 414 HP a 1.600 rpm
	2	JOHN DEERE CH 570	Potencia 337 HP a 2.100 rpm
Tractor	18	CASE PUMA 180	Potencia 182 HP
	13	JOHN DEERE 6180J	Potencia 180 HP
	5	JOHN DEERE 6170J	Potencia 170 HP
Autovolteo	36	IMECOL	---

Las tablas 8, 9, 10, 11, 12, 13 y figuras 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 muestran las caracterizaciones y especificaciones técnicas de las cosechadoras, tractores y vagones autovolteo utilizados en las operaciones de cosecha.

Tabla 8*Caracterización de la cosechadora de caña CASE 8810*

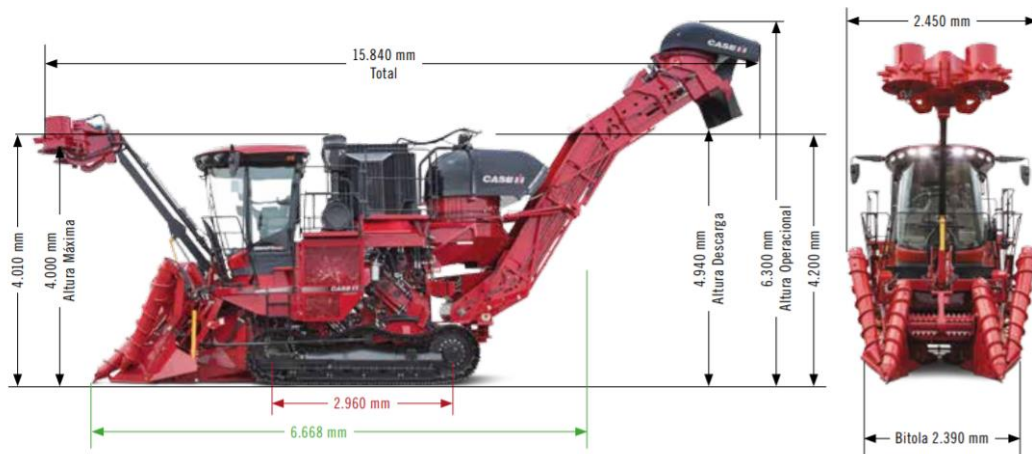
Característica	Especificación
Potencia	352 HP a 2.100 rpm
Velocidad de operación	0 a 9 km/h
Divisor de línea	Ángulo inclinación 45°
Elevador	Ángulo giro 170°
Extractor primario	600 a 1.100 rpm
Extractor secundario	Velocidad fija
Cortador de base	<ul style="list-style-type: none"> - Dos discos desmontables. - Distancia entre centros 630 mm. - 5 cuchillas por disco.
Conjunto picador	<ul style="list-style-type: none"> - 4 cuchillas por rodillo. - Diámetro de tambores 380 mm. - Ancho de cuchillas 65 mm.
Orugas	- Ancho de zapata 406 mm.
Capacidad	<ul style="list-style-type: none"> - 164 gal combustible. - 126 gal aceite hidráulico.
Peso	- 18.50 toneladas

Figura 1 Cosechadora de Caña CASE 8810



Figura 2

*Dimensiones de la Cosechadora de Caña 8810**



Nota. Adaptado de CASE AGRICULTURE

Tabla 9

Caracterización de la cosechadora de caña CASE 9900

Característica	Especificación
Potencia	414 HP a 1.600 rpm
Velocidad de operación	0 a 9 km/h
Divisor de línea	Ángulo inclinación 45°
Elevador	Ángulo giro 170°
Extractor primario	600 a 1.100 rpm
Extractor secundario	Velocidad fija
Cortador de base	<ul style="list-style-type: none"> - Dos discos desmontables. - Distancia entre centros 630 mm. - 5 cuchillas por disco.
Conjunto picador	<ul style="list-style-type: none"> - 4 cuchillas por rodillo. - Diámetro de tambores 380 mm. - Ancho de cuchillas 65 mm.
Orugas	- Ancho de zapata 406 mm.
Capacidad	<ul style="list-style-type: none"> - 164 gal combustible. - 132 gal aceite hidráulico.
Peso	- 20.75 toneladas

Tabla 10

Caracterización de la cosechadora de caña CH570

Característica	Especificación
Potencia	337 HP a 2.100 rpm
Velocidad de operación	0 a 9 km/h
Divisor de línea	Ángulo inclinación 46°
Elevador	Ángulo giro 170°
Extractor primario	650 a 1.360 rpm
Extractor secundario	Velocidad fija
Cortador de base	<ul style="list-style-type: none"> - Dos discos desmontables. - Distancia entre centros 630 mm. - 5 cuchillas por disco.
Conjunto picador	<ul style="list-style-type: none"> - 4 cuchillas por rodillo. - Ancho de cuchillas 95 mm.
Orugas	- Ancho de zapata 457 mm.
Capacidad	<ul style="list-style-type: none"> - 160 gal combustible. - 106 gal aceite hidráulico.
Peso	- 17.50 toneladas

Figura 3

Cosechadora de Caña CH570**Tabla 11***Caracterización del tractor para labor de autovolteo CASE PUMA 180*

Característica	Especificación
Potencia	182 HP
Ancho de vía delantero	1.552 – 2.2269 mm
Distancia entre ejes	2.884 mm
Radio de giro	6.59 m
Diámetro de giro	10.3 m
Peso	13.0 toneladas

Figura 4

Tractor para Labor de Autovolteo CASE PUMA 180



6.1.1 Especificaciones de Llantas y Presiones de Inflado en los Tractores de Cosecha

- Características de llantas: Radial R1W tanto delantera como trasera.
- Especificaciones: Llanta trasera 710/70R38 – llanta delantera 600/65R28.
- Presión de inflado: Llanta trasera 23 psi y 75% de lastre, delantera 23 psi y 0% de lastre líquido.
- Capacidad de carga: trasera 171D (6.150 Kg a 65 Km/h) – Delantera 154D (3.750 kg a 65 km/h).

Tabla 12

Caracterización del tractor para labor de autovolteo JOHN DEERE 6170-6180J

Característica	Especificación
Potencia	170 – 180 HP
Ancho de vía delantero	-
Distancia entre ejes	- 2.730 mm
Radio de giro	-
Diámetro de giro	-
Peso	10.3 toneladas

Figura 5*Tractor para Labor de Autovolteo JOHN DEERE 6180J***Tabla 13**

Caracterización de los vagones para la labor de autovolteo

Característica	Especificación
Volumen	23 m ³
Carga Neta	11.0 Toneladas
Tara	7.0 Toneladas
Ancho de trocha	2.120 mm
Altura	3.735 mm
Angulo giro	34°

Figura 6*Autovolteo en proceso de cargue***Figura 7**

Autovolteo en proceso de descargue**6.1.2 Especificaciones de Llantas y Presiones de Inflado en Vagones de Autovolteo**

- Características: R1W (radial) y R1 (convencional)
- Especificaciones: Llanta radial 620/75R26 o tractocañera 23.1 - 26.
- Presión de inflado; 46 psi en ambas referencias.
- Capacidad de carga: Radial 166 A8 (5.300 Kg a 40 km/h) – Convencional 16 PR (6.150 Kg a 40 km/h)

7.0 Parámetros de Operación en la Cosecha

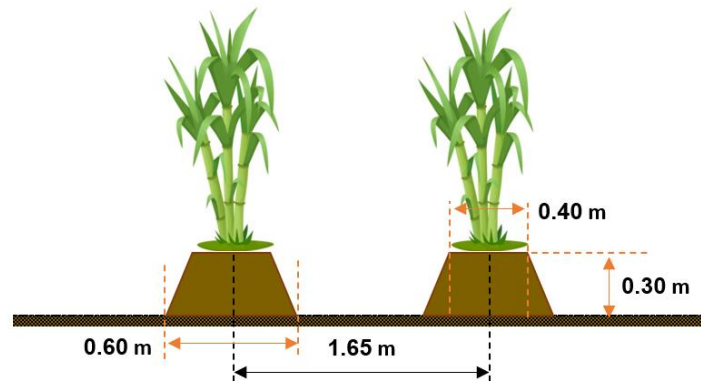
Los equipos de cosecha empleados en la operación tienen características en su diseño y capacidad que se ajustan al diseño actual de los campos sembrados. Las nuevas siembras en la zona de estudio se realizan con una longitud promedio de 180 m y espaciamiento entre surcos de 1.65 m lo que permite ajustar las trochas de los equipos empleados y las distancias recorridas durante la operación de cosecha.

7.1 Conformación De Surcos

La conformación de los surcos en zonas secas donde predominan (suelos francos) se diseñan con una forma casi trapezoidal que fija un ancho de base inferior de **0.60 m** y superior de **0.40 m**, su altura promedio se fija en **0.30 m** que facilita la operación de corte mecánico. La figura 8 presenta el ancho de surcos para la cosecha mecánica

Figura 8

Ancho de surcos para la cosecha mecánica de caña



7.2 Ajuste de Trochas en Equipos de Cosecha

Los equipos de cosecha de acuerdo con su funcionalidad en la operación se ajustan a la geometría de los surcos en las áreas sembradas, a continuación, se presentan los respectivos ajustes de las trochas de los equipos empleados en la operación de cosecha, de acuerdo con el tipo de labor que desarrollan.

7.2.1 Cosechadora

Las cosechadoras CASE Y JOHN DEERE utilizadas en la operación de corte mecanizado tienen un ancho de trocha de **1.88 m** y oruga de **0.44 m** que le permite ajustarse al espaciamiento de surcos de 1.65 m. En condiciones de zonas secas este espaciamiento entre surcos minimiza el impacto del pisoteo que pueda ocasionar la cosechadora sobre las líneas de

siembra. La figura 9 y 10 muestran las medidas y ajuste de las trochas en las cosechadoras de caña y la operación de cosecha con espaciamiento de surcos a 1.65 m.

Figura 9

Trocha en cosechadoras para la labor de corte mecánico de caña

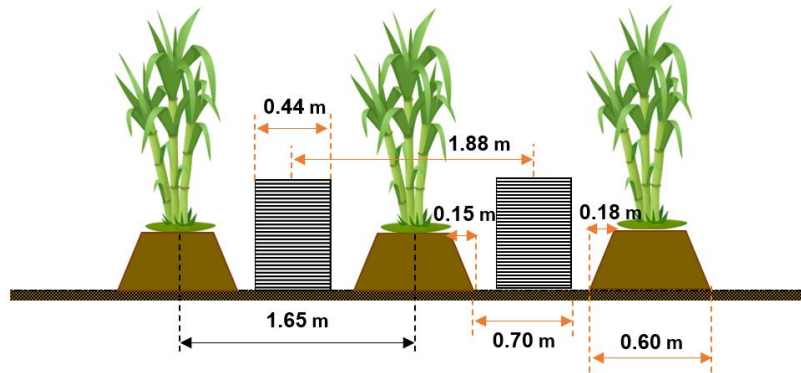


Figura 10

Operación de cosecha con espaciamiento de surcos a 1.65 m

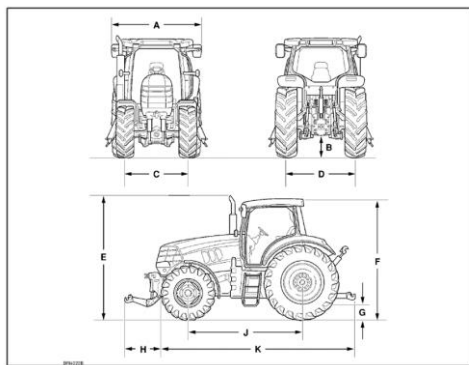


7.2.2 Tractor y Vagón Autovolteo

Los tractores de 180 HP usados para la labor de arrastre y autovolteo en la operación de cosecha (CASE y JOHN DEERE), tienen un ancho de trocha de **1.92 m** y tienen adaptadas llantas delanteras con referencia 600/65R28 las cuales tienen un ancho de **0.60 m**. En el eje trasero los equipos utilizan llantas 710/70R38 que tienen un ancho de **0.71 m**. Las figuras 11, 12, 13, 14 y 15 muestran las especificaciones y acomodación en los entresurcos de los tractores y vagones utilizados en la labor de autovolteo en la cosecha de caña.

Figura 11

*Especificaciones ancho de trocha en tractores utilizados para labor de autovolteo**

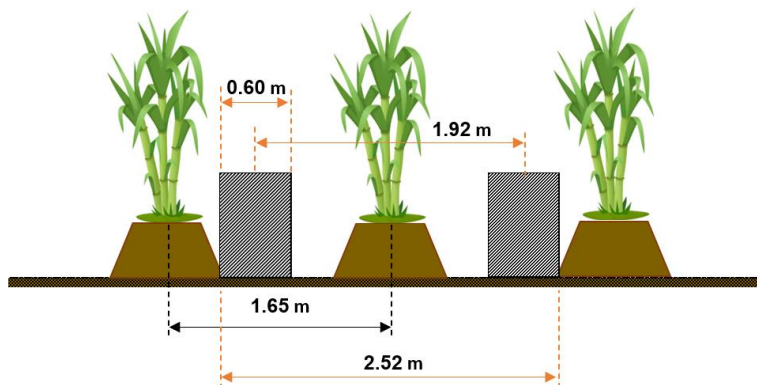


DIMENSIONES GENERALES	PUMA165, PUMA180, PUMA195 y PUMA210			
		Tracción simple	Tracción total Estándar	Tracción total Suspensión
B. Altura máxima sobre el suelo por debajo del eje delantero		--	Todos los modelos de tracción total, 613 mm (24,1 pulg.)	
C. Ancho de vía delantero	mm	1545 - 2187	Sólo los modelos con tracción total, 1.552 - 2.269	
	pulg	60.8 - 86.3	Todos los modelos con tracción total, 61,1 - 89,3	
D. Ajuste de la batalla entre ruedas traseras	- con eje de brida	Todos los modelos, 1.426 - 2.026 mm (56,1 - 79,8 pulg.)		
	- con eje de barra de 98 pulg.	Todos los modelos, 1.524 - 2.438 mm (60 - 96 pulg.)		
	- con eje de barra de 112 pulg.	Todos los modelos, 1.524 - 2.794 mm (60 - 110 pulg.)		
	- con eje de barra de 119 pulg.	Todos los modelos, 1.524 - 2.998 mm (60 - 118 pulg.)		

Nota. Adaptado Manual de operación tractor Case Puma 180

Figura 12

Ajuste de trocha en tractores

**Figura 13**

Trocha de tractores y acomodación en entresurcos



Los vagones que se utilizan para la labor de autovolteo tienen una capacidad de carga de 11.0 toneladas y un peso bruto de 18.06 toneladas. Estos equipos tienen un ancho de trocha de **2.12 m** y tienen dos tipos de llantas adaptadas con referencia 620/75R26 que tienen un ancho de sección de **0.62 m** y tractocañera 23.1-26 de un ancho de sección de **0.58 m**.

Figura 14

Adaptación de trochas en conjunto tractor – autovolteo

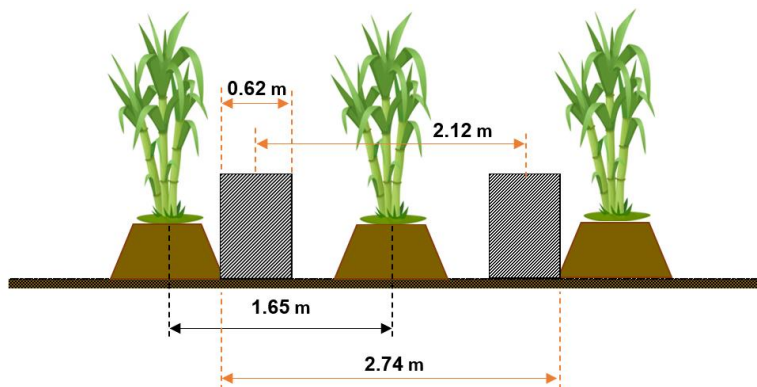
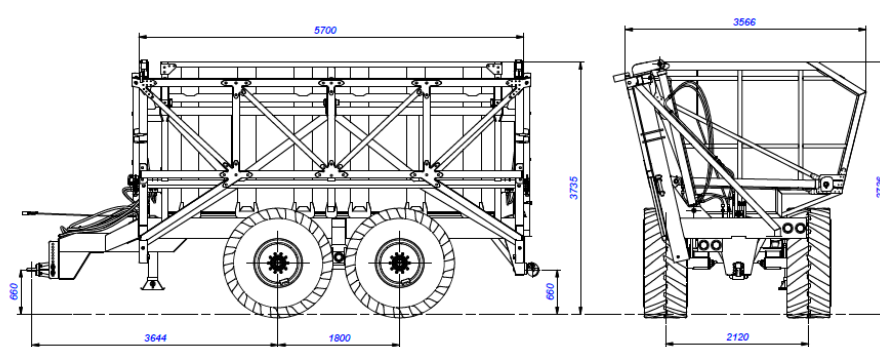


Figura 15

Características del vagón de autovolteo utilizado en la labor de cosecha de caña



Nota. Adaptado Manual vagón autovolteo Imecol

7.3 Parámetros de Operación (Brechado y Secuencia de Operaciones)

Las operaciones de cosecha requieren una logística que garantice la máxima eficiencia de los equipos de corte y autovolteo; sin embargo, las actividades de planeación y programación están en función de las variables que puedan afectar de forma positiva o negativa la operabilidad y suministro de caña por el frente de cosecha. Una de las labores fundamentales en la operación cosecha es el brechado de las suertes en las cuales se da el inicio a la operación. Esta labor de brechado está en función del diseño de campo y geometría de los lotes, a través del cual se asegura la proporción de área a cortar buscando siempre la reducción de tiempos muertos debido a giros y desplazamientos en vacío de la cosechadora. No obstante, dependiendo del brechado se asegura el menor pisoteo en el área de corte debido al rompimiento de las melgas que incurren en el abatimiento de caña y requerimiento de varias pasadas del conjunto cosechadora – tractor – autovolteo por una proporción de surcos. En la figura 16, 17, 18 y 19 se presenta la parametrización del brechado para la labor de cosecha mecánica, dicho proceso se inicia con el conteo de una secuencia de los primeros 30 surcos en uno de los extremos del lote a cosechar y de forma continua la marcación de 45

surcos siguientes para definir las amplitudes y porciones de área a cortar. La operación de la cosechadora da inicio con el rompimiento de la brecha cortando un surco y de forma paralela ingresa el tractor a los 3 surcos contiguos con el agobiado de la caña (pisada) realizando la labor de carga. Esta operación se repite dos veces más; en el que la cosechadora realiza la labor de corte de un surco en pie y el tractor agobia dos surcos más; de forma que se defina la brecha en una amplitud de seis surcos que permitan realizar la operación continua de corte en función del diseño del campo y amplitud de los giros de la maquinaria

Figura 16

Parametrización de brechado para cosecha mecánica

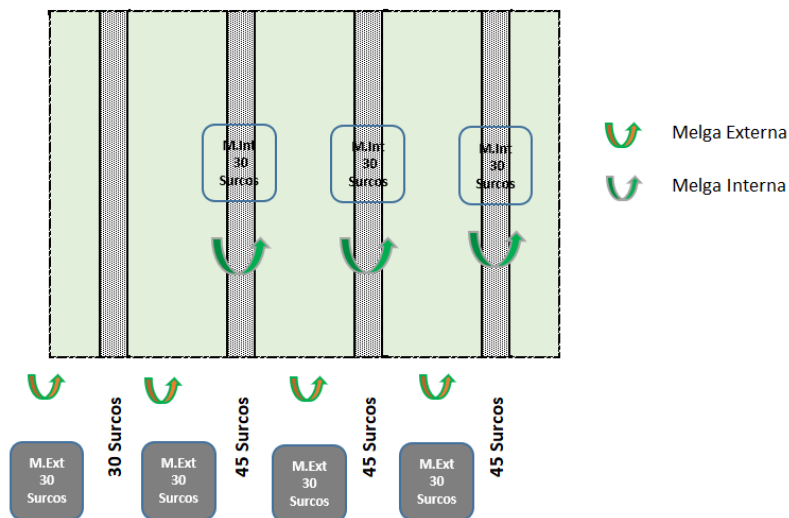


Figura 17

Apertura de brecha



Figura 18

Pisada de caña con tractor y corte de caña en pie



Figura 19

Desarrollo de brecha con surcos cosechados y surcos pisados por el tractor

**8.0 Caracterización de la Zona de Estudio****8.1 Valle del Cauca**

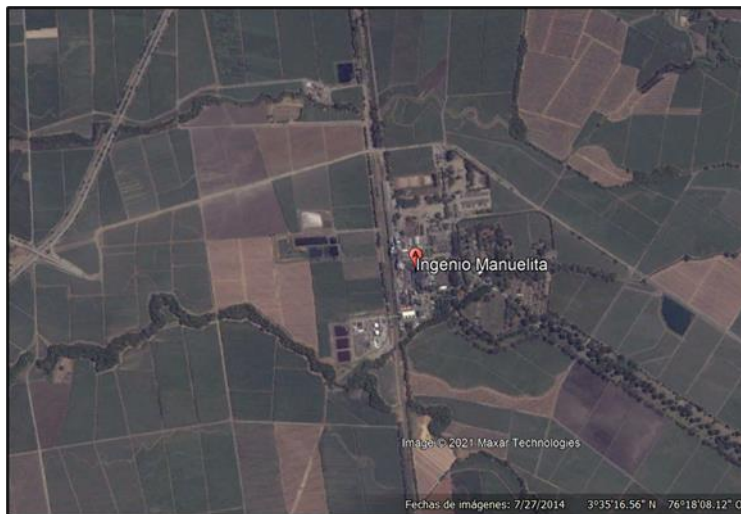
El Valle del Cauca está ubicado entre la región Andina y Pacífica. Limita al norte con Risaralda, al oriente con Tolima y Quindío, al sur con Cauca y occidente el océano pacífico. El Valle del Cauca se extiende en un ancho máximo de 32 km entre la cordillera central y occidental y presenta una altura de 1.000 m.s.n.m. El clima de la región es cálido y presenta una temperatura promedio que fluctúa entre los 23 – 24°C, con una humedad relativa entre el 65 – 75%. La región presenta un régimen de lluvias bimodal con una precipitación promedio anual de 938 mm distribuidos en dos épocas húmedas que van de marzo a mayo y una segunda época que va entre los meses de octubre a diciembre.

8.2 Localización Del Área De Estudio

El estudio se llevó a cabo en una proporción de los suelos con cultivos cosechados por Manuelita, ubicados alrededor de las coordenadas geográficas 3°35'10.65"N, 76°18'19.27"O dentro del departamento del Valle del Cauca, Colombia. La figura 20 presenta la localización de Manuelita

Figura 20

Localización del área de estudio



8.2.1 Caracterización Clima

Manuelita presenta un régimen de lluvias bimodal con una precipitación promedio histórica de 990 mm/año. Los periodos de máxima precipitación se presentan entre los meses de abril – mayo alcanzado promedios de 134 mm/mes y los meses más secos se presentan entre julio – agosto con precipitación promedio de 36 mm/mes.

8.3 Zonificación Agroecológica

De acuerdo con (Carbonell *et al.* 2011) Manuelita cuenta con un área cultivada de 24,448 Has en las cuales predominan tres zonas agroecológicas que representan el 61.9% del

área total, siendo las principales 11H0, 11H1, 6H1. La tabla 14 presenta la distribución de zonas agroecológicas en Manuelita.

Tabla 14

Distribución de zonas agroecológicas en Manuelita

Zona Agro	Área (Ha)	%
11H0	5,527	22.6%
11H1	4,860	19.8%
6H1	4,787	19.5%
Otras	9,274	38.1%
Total	24,448	100.0%

8.3.1 Zona Agroecológica 11H0

De acuerdo con la clasificación agroecológica de los suelos en el Valle del Cauca, la zona agroecológica 11H0 está compuesta por suelos franco fino con arcilla menor al 35%, además, presentan características de drenaje que van de moderada a bien drenados. Los suelos correspondientes a 11H0 de acuerdo con el grupo de humedad presentan déficit ($H0 < 0$ mm/año).

8.3.2 Zona Agroecológica 6H1

La zona agroecológica 6H1 corresponde a suelos finos, profundos y moderadamente profundos que se agrietan al reducir su humedad, presentan permeabilidad lenta y escasos de macroporos. Presentan contenidos de arcilla entre el 35 y 60%. Los suelos correspondientes a 6H1 de acuerdo con su grupo de humedad presentan humedad normal ($H1 < 200$ mm/año).

8.4 Tipo de suelos

De acuerdo con (Carbonell *et al.* 2011), la distribución del área cultivada en Manuelita según los órdenes de suelo marca un predominio de Mollisoles que representan el (63%) del área total. Este tipo de suelo presenta características favorables para el desarrollo de raíces debido a la presencia de un horizonte superficial oscuro de buena estructura y rico en materia orgánica. Con respecto a los vertisoles ocupan un 25% del área cultivada en Manuelita, sus características están en altos contenidos de arcillas expansibles que en función de la humedad ocasionan grietas en el perfil del suelo. La tabla 15 muestra la distribución de acuerdo a los ordenes de suelos en Manuelita.

Tabla 15

Distribución órdenes de suelo en Manuelita

Orden Suelo	Mollisol	Vertisol	Inceptisol	Entisol	Total
Área (Ha)	15,490	6,102	2,671	186	24,448
% Área	63.4%	25.0%	10.9%	0.8%	100.0%

8.4.1 Grupo Homogéneo De Suelos

Manuelita presenta una dominancia del grupo de suelos 11, con textura franca fina sobre arcillosa, de condición seca y profundos a moderadamente profundos, con buena capacidad de drenaje y ubicados en el ápice de abanicos y llanura aluvial (Carbonell *et al.* 2011).

9.0 Materiales y Métodos

9.1 Determinación de Muestreo

Para la determinación del muestreo se tuvo una población de 2,570 suertes que producen caña. Las zonas agroecológicas 6H1 y 11H0 tienen una representación porcentual

total del 34% sobre el total de las suertes, tal como se muestra en la tabla 16 en la cual se presenta la distribución de las zonas agroecológicas 6H1 y 11H0 de acuerdo con su porcentaje de representación en el ingenio.

Tabla 16

Distribución de suertes 6H1 y 11H0 Manuelita

Zona Agroecológica	Cantidad de Suertes	Porcentaje (%)
6H1	419	16
11H0	458	18
Total	877	34

El sistema productivo de caña de azúcar establecido a lo largo del valle del río Cauca se caracteriza por ser heterogéneo en los momentos de cosecha. Esto debido a que los suelos, el recurso hídrico y el clima de la región ofrece condiciones favorables para el cultivo lo que permite operaciones de cosecha mecánica durante todos los días del año (Cenicaña, 1995). Por esta razón y teniendo en cuenta la población objetivo presentada en la tabla 17 se plantea un muestreo estratificado con recolección de datos aleatorios por unidad de muestreo (hectárea de suelo), garantizando condición de independencia, distribución idéntica y representatividad que permita hacer inferencia sobre la población estudiada (Otzen & Manterola , 2017). En cada muestra se levantó información sobre las variables de interés por surco y entre surco del suelo en el cultivo de caña de azúcar durante dos momentos: antes de iniciar la operación de cosecha y después de finalizar la operación de cosecha para identificar la correlación entre la compactación y el tránsito de maquinaria.

Tabla 17*Población de interés y tratamientos definidos para la experimentación*

	Estratos	Tratamientos
1	Suelos calificados como 6H1 sometidos a operaciones de cosecha mecánica en el mes de agosto - septiembre de 2021.	T1: Antes de la Operación. T2: Entresurco sometido a (2) pases de cosechadora.
2	Suelos calificados como 11H0 sometidos a operaciones de cosecha mecánica en el mes de agosto - septiembre de 2021.	T3: Entresurco sometido a (2) pases de cosechadora, (1) de tractor y vagón. T4: Entresurco sometido a (2) pases de cosechadora, (2) de tractor y vagón.

9.2 Variables De Interés

Las variables de interés para el estudio son: Resistencia a la penetración, Densidad Aparente e Intensidad de Tráfico acumulada por el patrón de cosecha mecánica. En la Tabla 18 se presenta el método de recolección y las unidades en las que se expresa la variable.

Tabla 18*VARIABLES DE INTERÉS PARA LA EXPERIMENTACIÓN*

Variable de Interés	Método de Recolección	Unidad
Resistencia a la penetración	Penetrologger con GPS marca Eijkelkamp	MPa
Densidad Aparente en Húmedo	Método del cilindro (Jaramillo D. , 2002)	g.cm ⁻³
Intensidad de Tráfico Acumulado	Seguimiento con GPS diferencial al tránsito de la maquinaria sobre los suelos muestreados (Rodríguez & Valencia, 2012)	Mg.km. ha ⁻¹

Para la determinación de la densidad aparente en húmedo (DaH) se utilizó el método del cilindro. De acuerdo con (Hossne García & Cedeño Campos, 2012) la densidad aparente húmeda se determina en función de la masa total de suelo en el volumen del cilindro muestreador, incorporando así la humedad de la muestra y simular mejor la condición actual del suelo agrícola en evaluación. Para el muestreo se utilizó cilindros de acero con 13 cm diámetro por 15 cm de altura construidos con borde afilado.

$$Vol (cm^3) = \pi \frac{\theta^2}{4} h = \pi \frac{(13)^2 cm}{4} (15) cm = 1,990 cm^3 \quad (9.1)$$

En la recolección de información se tomó ocho muestreos en once surcos, en los cuales se determinó el peso total de la muestra y la densidad aparente en húmedo. Se determinó el resultado para cada punto muestreado a través de la fórmula:

$$DaH = \frac{Peso\ Neto\ Muestra\ (g)}{Volumen\ Cilindro\ (cm^3)} \quad (9.2)$$

Se realizaron dos pruebas (antes y después de cosecha), siendo él antes de cosecha el tratamiento testigo y el después de la cosecha estando los entresurcos sometidos a diferente intensidad de tráfico. Se realizó un muestreo de 168 puntos sobre los entresurcos transitados por el conjunto de cosecha (cosechadora y tractor con vagón autovolteo) en diferente intensidad de tráfico. Antes de la operación de cosecha se realizó el muestreo de las entrecalles correspondiente a los tratamientos para determinar la densidad aparente a una profundidad de muestreo de 15 cm con un muestreo completamente al azar y un espaciamiento de 15 m entre puntos.

Para la determinación de la resistencia a la penetración se usó el penetrómetro con ángulo de cono a 60°, se realizaron mediciones en los entresurcos sobre ocho puntos de muestreo antes y después del tránsito de la maquinaria. Las profundidades evaluadas se concentraron en un rango de 10 a 50 cm. La figura 21 muestra el equipo empleado para la determinación de la resistencia a la penetración en las suertes evaluadas.

Figura 21

Determinación de la resistencia a la penetración con penetrómetro digital



La intensidad de tráfico para cada tratamiento se determinó en función de la longitud promedio del surco (139,5 m a 1,65 m de distancia siembra) transitado por los equipos de cosecha, relación con el peso (cosechadora 17,5 ton; tractor 13,0 ton y vagón a mitad de carga 9,0 ton) y número de pasadas por cada equipo (de acuerdo con el tratamiento). A continuación, se describe la información para la determinación de la intensidad de tráfico en función de los surcos evaluados.

9.3 Análisis Estadístico

Las variables de interés recolectadas durante la investigación; Resistencia a la Penetración y Densidad Aparente en Húmedo fueron inicialmente analizadas mediante los descriptores de la estadística descriptiva (la media, la desviación estándar, valor máximo, valor mínimo y coeficiente de simetría), posteriormente se determinaron los intervalos de confianza para el valor medio de las variables de interés y se realizaron las pruebas de hipótesis para conocer si existen diferencias significativas con un nivel de significancia estándar (95% de confianza y 5% de significancia). Los análisis estadísticos se realizaron con los programas StatsGraphics Centurion XVI y Microsoft Excel del Paquete Microsoft Office.

9.4 Análisis Geoestadístico y Modelación Espacial

La información de las variables de interés recolectadas en las muestras se analizaron usando un sistema de referencia de coordenadas proyectado (X, Y) se sometieron a pruebas para validar que los atributos cumplen el supuesto de ser un proceso estocástico estacionario de sentido amplio; la prueba comprende someter cada uno de los atributos a una regresión lineal multivariable (posición X y posición Y como variables independientes) y evaluar la distribución espacial de los atributos alrededor de la media y una desviación estándar a través del coeficiente de correlación de Pearson ($r \approx 0$) (Saavedra Rincon, 2018). Una vez comprobada la condición de estacionariedad, se construyeron los semivariogramas para cada una de las variables de interés, procurando que el modelo ajustado tuviera el menor valor para la suma de

los errores al cuadrado, que indican la magnitud de la variabilidad aleatoria del proceso. Por último, una vez seleccionado el semivariograma que mejor explique la variabilidad espacial de los atributos de interés, se construyó una representación gráfica que muestre dicha variabilidad espacial utilizando el método de interpolación espacial lineal óptimo insesgado Kriging Ordinario, que permite hacer inferencia sobre la población de interés con respecto al fenómeno estudiado (Saavedra Rincon, 2018). Todos los análisis estadísticos mencionados se realizaron con el programa GS+ y QGIS.

9.5 Caracterización del Área de Estudio

El estudio se desarrolló en los predios cosechados por Manuelita identificados como SANTA ANITA 26 e ITALIA 25A, las suertes corresponden a plantillas que fueron cosechadas durante el mes de agosto - septiembre (periodo seco). La tabla 19 presenta las características de las suertes que fueron objeto de experimentación.

Tabla 19

Caracterización zona de estudio

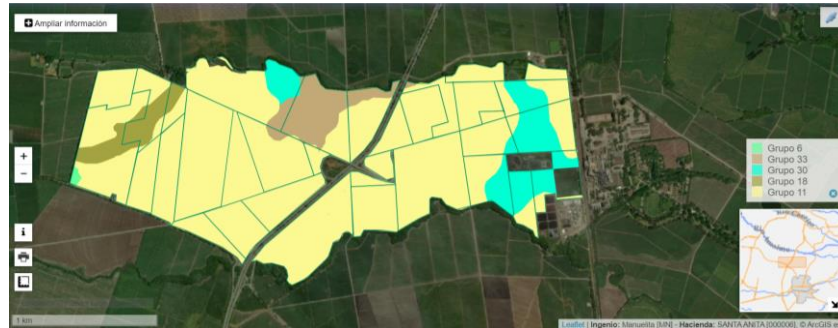
Hacienda	Suerte	Variedad	#Corte	Área (Ha)	Zona Agro.
SANTA ANITA	26	CC 05-430	00	20.93	11H0
ITALIA VILLEGAS	25A	CC 05-430	00	1.10	6H1

El predio SANTA ANITA se encuentra ubicado en el municipio de Palmira (Valle), corregimiento de Amaime en las coordenadas geográficas Latitud: 3.5944 y longitud: -76.2912. donde predominan las zonas agroecológicas 11H1 (45.8%) y 11H0 (38.8%) del área total. Se caracteriza por estar ubicada en un mega-ambiente semiseco y predominio de suelos con

permeabilidad media. Las figuras 22, 23, 24 y 25 muestran la representación gráfica de la caracterización de suelo en SANTA ANITA suerte 26.

Figura 22

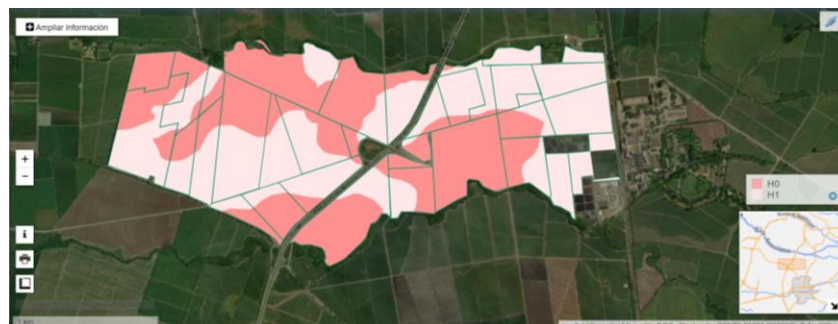
Grupo de suelos SANTA ANITA



Nota. Adaptado Zonificación agroecológica Cenicaña

Figura 23

Grupo de humedad SANTA ANITA



Nota. Adaptado Zonificación agroecológica Cenicaña

La suerte donde se realizó el estudio corresponde a una zona agroecológica 11H0 y Consociación de suelos MN (Manuelita / Fluventic Haplustoll), con suelos profundos a muy profundos de textura media y moderadamente fina. (Carbonell, et al 2011).

Figura 24*Zona agroecológica SANTA ANITA 26*

Nota. Adaptado Zonificación agroecológica Cenicaña

Figura 25*Consociación de suelo SANTA ANITA 26*

Nota. Adaptado Zonificación agroecológica Cenicaña

El predio ITALIA se encuentra ubicado en el municipio de Palmira (Valle), zona urbana en las coordenadas geográficas Latitud: 3.4995 y longitud: -76.3119. ITALIA tiene un área donde predomina las zonas agroecológicas 11H0 (42.4%) y 6H1 (38.5%) del área total. Se caracteriza por estar ubicada en un mega-ambiente semiseco y predominio de suelos con permeabilidad lenta a media. Las figuras 26, 27 y 28 muestran la representación gráfica de la caracterización de suelo en ITALIA VILLEGAS suerte 25A.

Figura 26

Grupo de suelos ITALIA VILLEGAS



Nota. Adaptado Zonificación agroecológica Cenicaña

Figura 27

Grupo de humedad ITALIA VILLEGAS



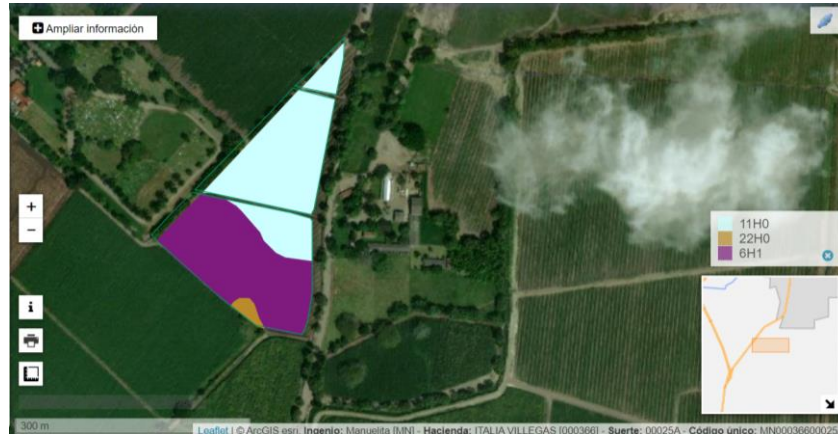
Nota. Adaptado Zonificación agroecológica Cenicaña

La suerte donde se llevó a cabo el estudio corresponde a una zona agroecológica 6H1 y asociación de suelos CT (Corintias / Typic Haplustert). Se caracteriza por suelos profundos y

moderadamente profundos, de textura fina, además, presenta alta fertilidad y características vérticas dominantes (Carbonell et al. 2011).

Figura 28

Zona agroecológica ITALIA VILLEGAS 25A



Nota. Adaptado Zonificación agroecológica Cenicaña

10.0 Análisis de Información en SANTA ANITA 26

La operación de cosecha en este sector se definió con la realización de brechas para proporcionar área de corte y optimizar giros en la maquinaria. Se inició con apertura de seis surcos en los cuales tres son cortados por la cosechadora y tres tienen son pisados con la caña en pie por el tractor y vagón autovolteo. Una vez realizada la brecha se da inicio al normal proceso de operación en forma de melgas cuyo patrón de cosecha de los surcos es en forma de carrusel interno. En la tabla 20 se presentan los tratamientos establecidos para la medición de las variables.

Tabla 20*Tratamientos comparativos de evaluación*

Tratamiento	Descripción	Caracterización	IT (Mg*km/ha)
T1	Testigo	Antes de la cosecha	-
T2	2Cos	Después de (2) pases de cosechadora	212.12
		Después de (2) pases de cosechadora por	345.45
T3	2Cos x 1Trc	(1) de tractor con vagón	
		Después de (2) pases de cosechadora por	478.79
T4	2Cos x 2Trc	(2) de tractor con vagón	

Los resultados de intensidad de tráfico en la cosecha de SANTA ANITA 26, evidencian un mayor impacto en el T4 donde el área de evaluación fue sometida a la doble pasada de la cosechadora y el conjunto tractor – autovolteo. Dicho indicador presenta un valor de 478.79 Mg*km/ha el cual supera en 39% lo obtenido en el tratamiento T3 en el cual solo se transita una sola vez con el tractor y vagón autovolteo.

10.1 Caracterización de Suelo SANTA ANITA para la Operación de Cosecha

El análisis físico de laboratorio determinó que el suelo de SANTA ANITA presenta una distribución de Arcillas (21%), Limo (46%) y Arena (33%), lo cual corresponde a una textura de

suelo franco. El contenido de humedad antes de la cosecha fue del 38% y finalizadas las operaciones se redujo al 33%.

10.2 Determinación de la Densidad Aparente en Húmedo del Suelo

La Tabla 21 muestra la estadística descriptiva en SANTA ANITA la cual presentó una densidad aparente mínima de 1.16 g/cm^3 y máxima de 1.79 g/cm^3 . La desviación estándar fue de 0.12 lo cual indica una menor dispersión de los datos sobre la media. Los resultados de la media, moda y mediana presentan una distribución normal y simétrica de los datos. La información de densidad aparente en húmedo (DaH) corresponde a 80 datos son de T1, 40 datos a T2, 16 datos a T3 y 32 datos a T4, cuyos resultados analizados para cada tratamiento muestran que para el T1 la (DaH) es de 1.55 g/cm^3 a los 15 cm de profundidad, resultado que se encuentra en los rangos clasificados para suelos Arcillosos y Arcilloso – Franco (Jaramillo J. , 2006).

Tabla 21*Resultados estadística descriptiva SANTA ANITA 26*

Media (g/cm³)	1.58
Mediana (g/cm ³)	1.59
Moda (g/cm ³)	1.53
Desviación estándar (g/cm ³)	0.12
Varianza de la muestra	0.01
Asimetría	-0.62
Mínimo (g/cm ³)	1.16
Máximo (g/cm ³)	1.79
No datos	168

10.3 Análisis de Varianza para la Variable Densidad Aparente

El análisis de varianza entre los tratamientos y la densidad aparente evidenciaron diferencias significativas, datos presentados en la tabla 22 que muestra los promedios entre los tratamientos evaluados del suelo sujeto en estudio.

Tabla 22*Análisis de varianza en Densidad Aparente*

Tratamiento	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor-P
DaH	3	0.172	0.057	0.006
Residual DaH	164	2.197	0.013	-

El parámetro de operación en el área de estudio tuvo el efecto del paso de los equipos en diferentes configuraciones, lo que resultó en un incremento en la densidad aparente en

húmedo. Si bien, no se logró observar diferencias significativas entre las condiciones iniciales y las posteriores a la cosecha, se advierte un incremento en la magnitud de la densidad aparente en húmedo luego del tránsito de la maquinaria de cosecha, observándose un valor máximo de 1.64 g/cm^3 .

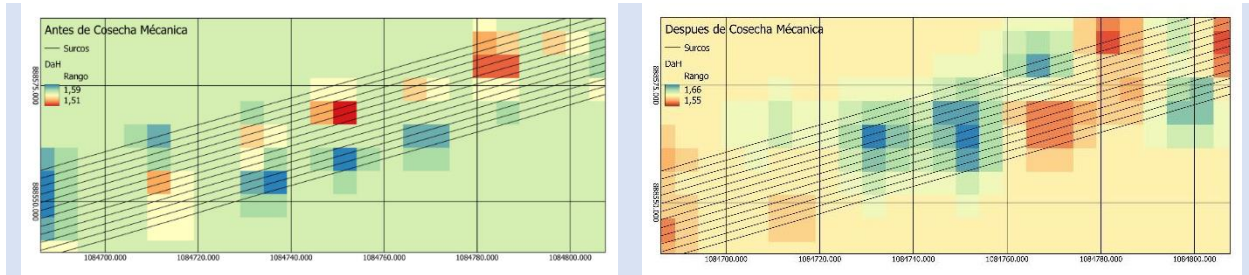
Resultados presentados en la tabla 23, el promedio de densidad aparente resultante en el T2 presentó un incremento con respecto a T1 de 0.04 g/cm^3 , siendo el de menor incremento con respecto a los demás tratamientos. (Morejón *et al.*, 2016) en evaluaciones realizadas en cosechadora CAMECO, concluyó que la presión que ejercen las orugas sobre el suelo oscila en los $52,20 \text{ kPa}$, factor que es determinante para disminuir el impacto en la compactación del suelo con respecto a otro tipo de maquinaria. El mayor incremento de densidad aparente fue en el T3 con respecto a T1, alcanzando un diferencial de 0.09 g/cm^3 el cual está impactado en el primer tráfico del tractor. De acuerdo con (Morejón *et al.*, 2016) en sus investigaciones del impacto en el tránsito de la maquinaria de cosecha determinó que los equipos enllantados ejercen una mayor presión sobre el suelo alcanzando presiones que oscilan entre 245 a 490 Kpa , siendo estos valores muy superiores a la presión ejercida por las orugas de la cosechadora.

Tabla 23*Promedio Densidad aparente de los tratamientos evaluados*

Densidad Aparente	T1	T2	T3	T4
Media (g/cm³)	1.55a	1.59a	1.64b	1.60a
Mediana (g/cm ³)	1.56	1.61	1.66	1.60
Moda (g/cm ³)	1.60	1.68	-	1.55
Desviación estándar (g/cm ³)	0.12	0.12	0.10	0.10
Varianza de la muestra	0.02	0.01	0.01	0.01
Mínimo (g/cm ³)	1.16	1.27	1.43	1.37
Máximo (g/cm ³)	1.77	1.79	1.77	1.79
No datos	80	40	16	32

*medias con letras diferentes significan diferencias significativas.

La resultante de los modelos Kriging de superficie continua de la DaH está representado en la Figura 29, obteniéndose un modelo de variograma Gaussiano con una débil dependencia espacial antes de la operación (nugget 84.61% del full sill) y moderada dependencia espacial después de la cosecha (nugget 75.00% del full sill). La magnitud del rango antes de la operación fue de 7.41 m con valores mínimo y máximo de 1.51 y 1.59 gr/cm³ respectivamente; después de la operación el rango fue de 14.44 m con valores mínimo y máximo de 1.55 y 1.66 gr/cm³ respectivamente.

Figura 29*Modelo Kriging de la Densidad aparente para la experimentación en SANTA ANITA 26*

Las superficies continuas que representan el comportamiento espacial de DaH (figura 29) durante la experimentación están acorde a lo expuesto por los análisis de varianza. Si bien se percibe un incremento de las magnitudes de la variable de interés entre las condiciones iniciales y la aplicación de los tratamientos, el patrón espacial no delimita de forma clara el efecto de los tratamientos en los entre surcos estudiados. Es decir, se presentó propagación horizontal de la compactación debido al tránsito de la maquinaria sobre el suelo en diferentes intensidades de tráfico, que influenció todos los surcos y entresurcos en una distancia de 14.44 m. Lo que se reflejó en una débil y moderada dependencia espacial del modelo Kriging, que indicó que la compactación causada dentro los entre surcos no fue debido únicamente al tratamiento aplicado en cada uno, sino, que hubo incidencia de los tratamientos aplicados en entre surcos contiguos.

10.4 Resistencia a la Penetración

Los resultados de resistencia a la penetración presentados en la tabla 24 evidencian un rango mínimo de 0.33 MPa y máximo de 4.92 MPa con una desviación estándar de 0.83 MPa.

Tabla 24*Resistencia a la penetración promedio de Santa Anita 26*

Media (MPa)	2.33
Mediana (MPa)	2.36
Moda (MPa)	2.67
Desviación estándar (MPa)	0.83
Varianza de la muestra	0.69
Simetría	0.24
Mínimo (MPa)	0.33
Máximo (MPa)	4.92
N _o datos	520

10.5 Análisis de Varianza para la Variable Resistencia a la Penetración

El análisis de varianza entre los tratamientos y la resistencia a la penetración, tal como se muestra en la tabla 25 evidenció diferencias significativas como resultado de la aplicación de los tratamientos en el suelo sujeto de estudio.

Tabla 25*Análisis de varianza en Resistencia a la penetración*

Tratamiento	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor-P
Rp	3	77.865	25.955	0.0
Residual Rp	516	279.811	0.542	-

Las diferencias significativas se expresaron entre el T1 y T2, T3, T4 que coinciden con las condiciones iniciales y posteriores al tránsito de la maquinaria. Lo que evidencia un incremento en la resistencia a la penetración con la operación de la maquinaria de cosecha.

Tabla 26

Resistencia a la penetración promedio por tratamientos

Profundidad (cm)	T1	T2	T3	T4	Promedio (MPa)
10	0.80	1.69	1.66	1.71	1.55
20	1.32	2.49	2.31	2.40	2.25
30	1.56	2.89	2.76	2.99	2.70
40	1.66	2.79	2.75	2.90	2.64
50	1.80	2.58	2.80	2.65	2.52
	1.43	2.49	2.45	2.53	
	a	b	b	b	

*medias con letras diferentes significan diferencias significativas.

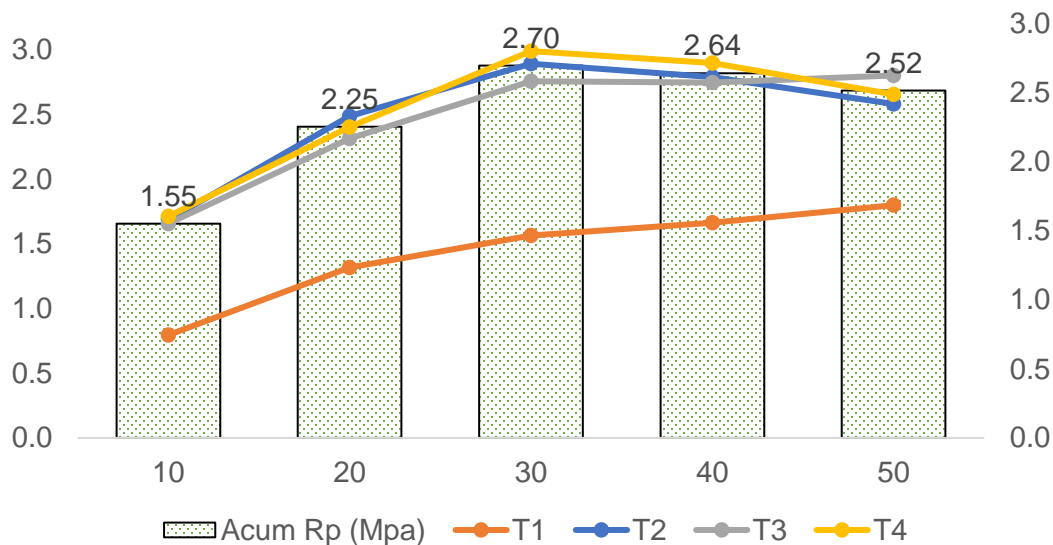
La resistencia a la penetración para el T1 evidenció un mayor nivel de compactación a una profundidad de 50 cm, condición que pudo ser afectada por la intensidad de operaciones durante las actividades de preparación de suelos o labores de levante. (Threadgill E. , 1982) concluyó que resistencia a la penetración superior a 1,5 MPa afectan el desarrollo radicular de las plantas al igual que valores entre 2,1 y 2,5 MPa impiden el desarrollo de raíces. Los resultados previos a la cosecha se encuentran en niveles críticos a partir de los 30 cm de profundidad teniendo valores promedio de 1,56 MPa hasta 1,80 MPa indicadores que pueden impactar el desarrollo radicular del cultivo y por ende menor producción. Una vez realizada la medición de la resistencia a la penetración sin el tránsito de maquinaria, se iniciaron las operaciones de cosecha llevando a cabo los tres tratamientos que involucraron el tránsito individual de la cosechadora y el movimiento del tractor en su conjunto con el vagón.

Los resultados obtenidos luego de la operación de cosecha evidencian un incremento importante en la resistencia a la penetración en los diferentes tratamientos, es de anotar, que

en los primeros 30 cm del perfil de suelo los indicadores de resistencia superaron los 2,5 MPa siendo el T4 el de mayor impacto con 2,99 MPa a 30 cm de profundidad, de acuerdo con (Threadgill E. , 1982) valores entre 2,1 MPa y 2,5 MPa limitan el crecimiento de raíces, más aún, con las condiciones de cosecha usando equipos de mínimo peso obligan en las labores culturales desarrollar practicas intensivas de descompactación (subsuelo) que permita reducir la resistencia a la penetración del perfil de suelo. A mayor profundidad (30 a 50 cm) la resistencia a la penetración presentó una reducción con respecto al tráfico sobre la superficie, no obstante, los valores obtenidos presentan unos resultados superiores a los 2,6 MPa que aún continúan siendo críticos para el desarrollo radicular de las plantas. De acuerdo con (Porras, 1995) el 85% del sistema radicular del cultivo de caña se encuentra en los primeros 60 cm de suelo, factor que puede limitar un mejor desarrollo en caso de no llevar a cabo operaciones adecuadas de roturación. La figura 30 presenta gráficamente los valores de resistencia a la penetración a diferentes profundidades de muestreo.

Figura 30

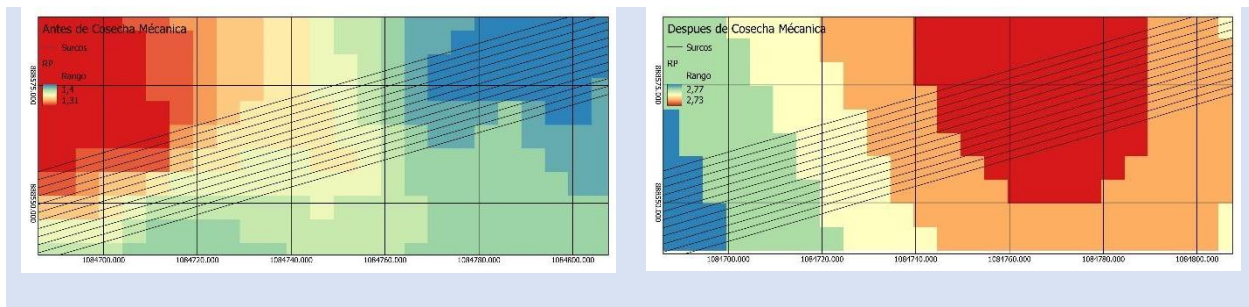
Resistencia a la penetración por tratamiento y profundidad de muestreo



La resultante de los modelos Kriging de superficie continua de la Rp está representado en la Figura 31, obteniéndose un modelo de variograma Esférico con una moderada dependencia espacial antes de la operación (nugget 45.00% del full sill) y débil dependencia espacial después de la cosecha (nugget 82.61% del full sill). La magnitud del rango antes de la operación de cosecha mecánica fue de 128.42 m con valores mínimo y máximo predichos de 1.31 y 1.40 MPa respectivamente; después de la operación la magnitud del rango fue de 127.74 m con valores mínimo y máximo predichos de 2.73 y 2.77 MPa respectivamente.

Figura 31

Modelo Kriging Resistencia a la penetración SANTA ANITA 26



Las superficies continuas que representan el comportamiento espacial de Resistencia a la penetración (Rp) en la figura 31, durante la experimentación están acorde a lo expuesto por los análisis de varianza. Si bien se encontró diferencia significativa entre las condiciones iniciales y la aplicación de los tratamientos, el patrón espacial no delimita de forma clara el efecto de los tratamientos en los entre surcos estudiados. Es decir, la propagación horizontal de la compactación debido al tránsito de la maquinaria sobre el suelo en las diferentes intensidades de tráfico influenció todos los surcos y entre surcos dentro del área de estudio, esto se refleja en la magnitud elevada del rango del modelo de superficie continua. Lo que se reflejó en una débil y moderada dependencia espacial del modelo Kriging, que indicó que la compactación

causada dentro los entre surcos no fue debido únicamente al tratamiento aplicado en cada uno, sino, que hubo incidencia de los tratamientos aplicados en entre surcos contiguos.

10.6 Interacción de Condiciones Físicas en Función de la Compactación

SANTA ANITA 26 está clasificada como zona agroecológica 11H0 y corresponde a suelos de textura franca fina con contenido de arcilla menor al 35%, cuenta con drenaje moderado a bien drenado. Durante las operaciones de cosecha el contenido de humedad se redujo de 38% a 33%. De acuerdo con los resultados de límite líquido (40%W) y plástico (26%W) el suelo analizado presentó un contenido de humedad cercano al límite líquido lo cual implica condiciones inadecuadas para el tránsito de maquinaria agrícola, de acuerdo con (Cueto *et al*, 2009) la compactación del suelo aumenta con el contenido de humedad, a medida que incrementan las presiones ejercidas sobre él y se alcanza la humedad crítica del suelo mayor compactación se provoca.

El proceso de compactación analizado desde la resistencia a la penetración evidencia un incremento de la variable en función del tránsito de los equipos de cosecha, siendo significativo desde la primera interacción de la maquinaria – suelo, de acuerdo con (Cueto *et al*, 2006) concluyó que el tráfico es el principal causante de compactación en los suelos, siendo la textura y el contenido de humedad el aspecto más relevante en la reducción del espacio poroso, de igual manera, (Alakuku, 1996) determinó que la compactación persiste entre 3 y 11 años en suelos con contenidos de arcilla entre el 6 y 85% cuando es transitado con altas cargas sobre el eje de los equipos, asociando también un mayor número de pasadas como un efecto determinante en el incremento de la densidad aparente y la mayor compactación en la superficie y profundidad del perfil de suelo.

11 Análisis De Información En ITALIA VILLEGAS 25A

La operación de cosecha en este sector se definió con la realización de brechas para distribuir el área de corte y giro de la maquinaria. Se inició con apertura de seis surcos en los

cuales tres son cortados por la cosechadora y tres tienen el efecto de pisado y agobio de la caña en pie por parte del conjunto tractor vagón de autovolteo. Una vez realizada la brecha se da inicio al normal proceso de operación en forma de melgas cuyo patrón es de cosecha de surcos en forma de carrusel interno.

11.1 Caracterización de Suelo ITALIA VILLEGAS 25A para la Operación de Cosecha

El análisis físico de laboratorio determinó que el suelo de ITALIA VILLEGAS presenta una distribución de Arcillas (48%), Limo (26%) y Arena (26%), lo cual corresponde a una textura de suelo arcilloso. El contenido de humedad antes de la cosecha fue del 35% y finalizadas las operaciones se redujo al 33%. La Tabla 27 muestra la estadística descriptiva en ITALIA VILLEGAS la cual presentó una densidad aparente mínima de 1.43 g/cm^3 y máxima de 1.81 g/cm^3 . La desviación estándar fue de 0.10 lo cual indica una menor dispersión de los datos sobre la media. Los resultados de la media, moda y mediana presentan una distribución normal y simétrica de los datos. La base de datos para el análisis de la densidad aparente en húmedo (Da) corresponde a 88 datos de T1, 32 datos a T2, 16 datos a T3 y 40 datos a T4, cuyos resultados analizados para cada tratamiento muestran que para el T1 la (DaH) es de 1.65 g/cm^3 a los 15 cm de profundidad, resultado que se encuentra en los rangos clasificados para suelos Arcillosos y Arcilloso – Franco (Jaramillo J. , 2006).

Tabla 27*Resultados estadística descriptiva ITALIA VILLEGAS 25A*

Media (g/cm³)	1.66
Mediana (g/cm ³)	1.67
Moda (g/cm ³)	1.80
Desviación estándar (g/cm ³)	0.10
Varianza de la muestra	0.01
Mínimo (g/cm ³)	1.43
Máximo (g/cm ³)	1.81
No datos	176

11.2 Análisis de Varianza para la Variable Densidad Aparente

Datos presentados en Tabla 28 muestran el análisis comparativo de varianza entre los tratamientos y la densidad aparente, los cuales no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos debido a la menor variabilidad en la compactación medida a través de la densidad aparente.

Tabla 28*Análisis de varianza en Densidad Aparente*

Tratamiento	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor-P
DaH	3	0.027	0.009	0.413
Residual DaH	172	1.615	0.009	-

La tabla 29 presenta el parámetro de operación en el área de estudio el cual tuvo el efecto del paso de los equipos en diferentes configuraciones, lo que resultó un incremento leve

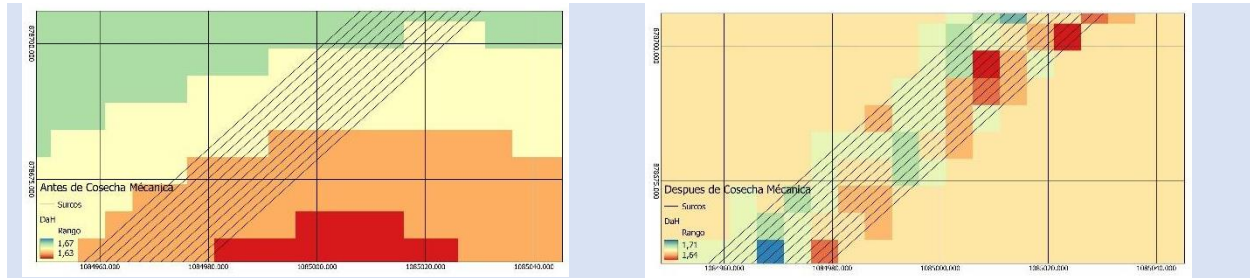
en la densidad aparente en húmedo. Si bien, no se logró observar diferencias significativas entre las condiciones iniciales y las posteriores a la cosecha, se advierte un incremento en la magnitud de la densidad aparente en húmedo luego del tránsito de la maquinaria de cosecha, observándose un valor máximo de 1.68 g/cm^3 . El promedio de densidad aparente resultante en el T2 presentó un incremento de 0.02 g/cm^3 , siendo el de menor incremento con respecto a los demás tratamientos. De acuerdo con (Morejón *et al.*, 2016) en estudios realizados en cosechadora CAMECO, concluyó que la presión que ejercen las orugas sobre el suelo oscila en los 52,20 kPa, factor que es determinante para disminuir el impacto en la compactación del suelo con respecto a otro tipo de maquinaria. El mayor incremento de densidad aparente se presentó en los tratamientos T3 y T4, alcanzando un diferencial de 0.03 g/cm^3 el cual está impactado en el primer tráfico del tractor. Estos tratamientos presentaron un incremento adicional en la densidad aparente de 0.01 g/cm^3 con respecto al T2, dicho comportamiento está asociado a las condiciones de humedad del suelo durante la cosecha y textura arcillosa. De acuerdo con (Saavedra & Chaparro, 2022) la densidad aparente bajo condiciones particulares de humedad y con valores cercanos a la máxima densidad de un suelo agrícola no presenta incrementos significativos del indicador.

Tabla 29*Promedio Densidad aparente de los tratamientos evaluados*

Densidad Aparente	T1	T2	T3	T4
Media (g/cm³)	1.65a	1.67a	1.68a	1,68a
Mediana (g/cm ³)	1.66	1.69	1.68	1.72
Moda (g/cm ³)	1.63	1.79	-	1.80
Desviación estándar (g/cm ³)	0.09	0.11	0.09	0.10
Varianza de la muestra	0.01	0.01	0.01	0.01
Mínimo (g/cm ³)	1.43	1.49	1.52	1.46
Máximo (g/cm ³)	1.81	1.80	1.79	1.80
No datos	88	32	16	40

*medias con letras diferentes significan diferencias significativas.

La resultante de los modelos Kriging de superficie continua de la DaH está representado en la Figura 32, obteniéndose un modelo de variograma Gaussiano con una moderada dependencia espacial antes de la operación (nugget 70.00% de full sill) y variograma esférico con débil dependencia espacial después de la cosecha (nugget 80.00% del full sill). La magnitud del rango antes de la operación de cosecha mecánica fue de 113.98 m con valores mínimos y máximos predichos de 1.63 y 1.67 gr/cm³ respectivamente; después de la operación el rango fue 6.51 m con valores mínimos y máximos predichos de 1.64 y 1.71 gr/cm³ respectivamente.

Figura 32*Modelo Kriging Densidad aparente*

Las superficies continuas que representan el comportamiento espacial de DaH (figura 32) durante la experimentación están acorde a lo expuesto por los análisis de varianza. Si bien se percibe un incremento de las magnitudes de la variable de interés entre las condiciones iniciales y la aplicación de los tratamientos, el patrón espacial no delimita de forma clara el efecto de los tratamientos en los entre surcos estudiados. Es decir, existió propagación horizontal de la compactación debido al tránsito de la maquinaria sobre el suelo en las diferentes intensidades de tráfico, que influenció todos los surcos y entre surcos dentro de una distancia de 6.51 m. Lo que se reflejó en una débil y moderada dependencia espacial del modelo Kriging, que indicó que la compactación causada dentro los entre surcos no fue debido únicamente al tratamiento aplicado en cada uno, sino, que hubo incidencia de los tratamientos aplicados en entre surcos contiguos.

11.3 Resistencia a la Penetración

Los resultados de resistencia a la penetración presentados en la tabla 30 evidencian un rango mínimo de 0.10 MPa y máximo de 4.04 MPa con una desviación estandar de 0.58 MPa.

Tabla 30*Resistencia a la penetración promedio de Italia Villegas 25A*

Media (MPa)	1.68
Mediana (MPa)	1.70
Moda (MPa)	1.71
Desviación estándar (MPa)	0.58
Varianza de la muestra	0.34
Mínimo (MPa)	0.10
Máximo (MPa)	4.04
Nº datos	600

11.4 Análisis de Varianza para la Variable Resistencia a la Penetración

El análisis de varianza entre los tratamientos y la resistencia a la penetración, tal como se muestra en la tabla 31 evidenció diferencias significativas como resultado de la aplicación de los tratamientos en el suelo sujeto de estudio.

Tabla 31*Análisis de varianza en Resistencia a la penetración*

Tratamiento	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor-P
Rp	3	3.487	1.162	0.016
Residual Rp	596	198.902	0.334	-

Las diferencias significativas se expresaron entre el T4 y T1, T2, T3 que coinciden con las condiciones iniciales y posteriores al tránsito de la maquinaria. Lo que evidencia un

incremento en la resistencia a la penetración con una operación intensiva de la maquinaria de cosecha.

La tabla 32 presenta los resultados asociados a la resistencia a la penetración para el T1 evidenció un mayor nivel de compactación a una profundidad de 50 cm, condición que pudo ser afectada por la intensidad de operaciones durante las actividades de preparación de suelos o labores de levante. De acuerdo con (Threadgill E. , 1982) concluyó que valores superiores a los 1,5 MPa limitan el desarrollo radicular mientras que los valores entre 2,1 y 2,5 MPa frenan el crecimiento de raíces. Los resultados previos a la cosecha se encuentran en niveles críticos a partir de los 30 cm de profundidad teniendo valores promedio de 1,65 MPa hasta 1,97 MPa indicadores que pueden impactar el desarrollo radicular del cultivo y por ende menor producción. Una vez realizada la medición de la resistencia a la penetración sin el tránsito de maquinaria, se iniciaron las operaciones de cosecha llevando a cabo los tres tratamientos que involucraban el tránsito individual de la cosechadora y el movimiento del tractor en su conjunto con el vagón.

Los resultados obtenidos luego de la operación de cosecha evidencian un incremento importante en la resistencia a la penetración en los diferentes tratamientos, es de anotar, que a partir de los 40 cm del perfil de suelo los indicadores de resistencia superaron los 2,0 MPa siendo el T4 el de mayor impacto con 2,14 MPa a 50 cm de profundidad, de acuerdo con (Threadgill E. , 1982) valores superiores al rango de 2,1 MPa a 2,5 MPa pueden impedir o detener el crecimiento de raíces, más aún, con las condiciones de cosecha usando equipos de mínimo peso obligan en las labores culturales desarrollar prácticas intensivas de descompactación (subsuelo) que permita reducir la resistencia a la penetración del perfil de suelo. A mayor profundidad (30 a 50 cm) la resistencia a la penetración presentó un incremento con respecto al tráfico sobre la superficie, no obstante, los valores obtenidos presentan unos resultados superiores a los 1,5 MPa que aún continúan siendo críticos para el desarrollo

radicular de las plantas. De acuerdo con (Porrás, 1995) el 85% del sistema radicular del cultivo de caña se encuentra en los primeros 60 cm de suelo, factor que puede limitar un mejor desarrollo en caso de no llevar a cabo operaciones adecuadas de roturación. La figura 33 muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos en la resistencia a la penetración a las diferentes profundidades analizadas.

Tabla 32

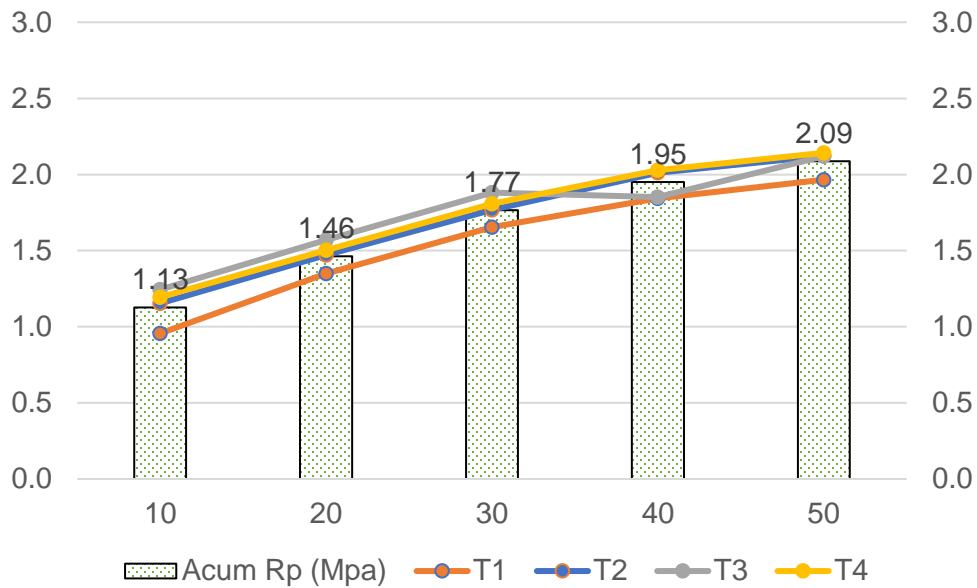
Resistencia a la penetración promedio por tratamientos

Profundidad (cm)	T1	T2	T3	T4	Promedio (MPa)
10	0.96	1.15	1.24	1.19	1.13
20	1.35	1.47	1.57	1.50	1.46
30	1.65	1.77	1.88	1.81	1.77
40	1.84	2.01	1.85	2.03	1.95
50	1.97	2.12	2.12	2.14	2.09
	1.55	1.71	1.73	1.74	
	a	a	a	b	1.68

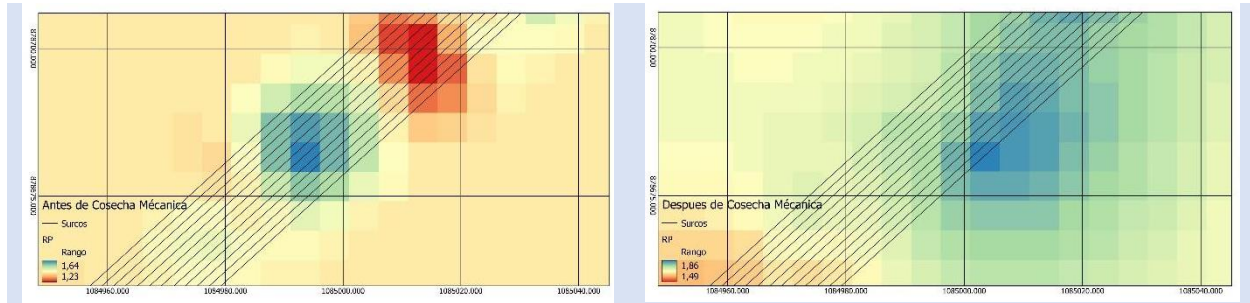
*medias con letras diferentes significan diferencias significativas.

Figura 33

Resistencia a la penetración por tratamiento y profundidad de muestreo



La resultante de los modelos Kriging de superficie continua de la Resistencia a la penetración está representado en la Figura 34, obteniéndose un modelo de variograma Esférico con una moderada dependencia espacial antes de la operación (nugget 68.96% del full sill) y débil dependencia espacial después de la cosecha (nugget 77.31% del full sill). La magnitud del rango antes de la operación de cosecha mecánica fue de 13.71 m con valores mínimo y máximo de 1.23 y 1.64 MPa respectivamente; después de la operación la magnitud del rango fue de 51.25 m con valores mínimo y máximo de 1.49 a 1.86 MPa respectivamente.

Figura 34*Modelo Kriging de la resistencia a la penetración ITALIA VILLEGAS*

Las superficies continuas que representan el comportamiento espacial de RP (figura 34) durante la experimentación están acorde a lo expuesto por los análisis de varianza. Si bien se percibe un incremento en la magnitud de la variable de interés entre las condiciones iniciales y la aplicación de los tratamientos, el patrón espacial no delimita de forma clara el efecto de los tratamientos en los entre surcos estudiados. Es decir, la propagación horizontal de la compactación debido al tránsito de la maquinaria sobre el suelo en las diferentes intensidades de tráfico influenció todos los surcos y entre surcos dentro del área de estudio, esto se refleja en la magnitud elevada del rango del modelo de superficie continua. Lo que se reflejó en una débil y moderada dependencia espacial del modelo Kriging, que indicó que la compactación causada dentro los entre surcos no fue debido únicamente al tratamiento aplicado en cada uno, sino, que hubo incidencia de los tratamientos aplicados en entre surcos contiguos.

11.5 Interacción de Condiciones Físicas en Función de la Compactación

ITALIA VILLEGAS 25A está clasificada como zona agroecológica 6H1 y corresponde a suelos de textura fina, profundos y moderadamente profundos que se agrietan al secarse, presentan permeabilidad lenta y escasez de macroporos. Presentan contenidos de arcilla entre el 35 y 60% Durante las operaciones de cosecha el contenido de humedad se redujo de 35% a 33%. De acuerdo con los resultados de límite líquido (40%W) y plástico (17%W) el suelo

analizado presentó un contenido de humedad cercano al límite líquido lo cual implica condiciones inadecuadas para el tránsito de maquinaria agrícola, de acuerdo con (Cueto *et al*, 2009) la compactación del suelo aumenta con el contenido de humedad, a medida que incrementan las presiones ejercidas sobre él y se alcanza la humedad crítica del suelo mayor compactación se provoca.

El proceso de compactación analizado desde la resistencia a la penetración evidencia un incremento de la variable en función del tránsito de los equipos de cosecha, siendo significativo desde la primera interacción de la maquinaria – suelo, de acuerdo con (Cueto *et al*, 2006) determinó que el tráfico vehicular es el principal responsable de la compactación de suelos, siendo la textura y el contenido de humedad el aspecto más relevante en la reducción del espacio poroso, de igual manera, (Alakuku, 1996) determinó que la compactación persiste entre 3 y 11 años en suelos con contenidos de arcilla entre el 6 y 85% cuando es transitado con altas cargas sobre el eje de los equipos, asociando también un mayor número de pasadas como un efecto determinante en el incremento de la densidad aparente y la mayor compactación en la superficie y profundidad del perfil de suelo. De acuerdo con (Saavedra-Rincon & Chaparro-Anaya, 2022) el proceso de compactación durante la cosecha en función de la intensidad de tráfico presenta una propagación vertical con incrementos considerables sobre los estratos subsuperficiales del suelo (> 30 cm).

Conclusiones

Los resultados de densidad aparente determinados en el suelo 11H0 (textura franca) no presentaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos evaluados, lo que confirma lo determinado por (Saavedra-Rincon & Chaparro-Anaya, 2022) en estudios de compactación inducida durante labores de cosecha mecánica, quienes concluyeron que la variable no es un parámetro conveniente para la evaluación de la compactación.

La resistencia a la penetración del suelo de textura franca presentó diferencias significativas resultantes del número de pasadas de los equipos alcanzando valores de 2.33 MPa y presentando valores críticos en los primeros 30 cm de profundidad, factor determinante en la ejecución de labores de roturación que eviten posteriores problemas de desarrollo de las raíces en el perfil de suelo.

Suelos de textura arcillosa 6H1 no presentaron diferencias significativas en la densidad aparente, lo cual coincide con estudios realizados por (Willians J, 2010) quien comprobó que suelos con mayor contenido de Arcilla y Limo presentan menor cambio en la densidad por cambios en la humedad debido a la influencia de partículas finas que cementan los agregados y les confiere mayor capacidad de soporte a las presiones ejercidas en el suelo, por lo que los cambios de densidad son de menor cuantía.

La resistencia a la penetración en el suelo arcilloso alcanzó 1.68 MPa y presentó diferencias significativas entre los tratamientos, siendo un mayor impacto de la variable a mayor profundidad caso de estudio (50 cm).

La menor intensidad de tráfico se obtuvo con el tránsito de la cosechadora ($212.2 \text{ Mg km ha}^{-1}$), lo cual confirma un menor impacto de este equipo en referencia con el uso de vagones HD20000 los cuales presentan IT que varían entre ($241 \text{ a } 317 \text{ Mg km ha}^{-1}$) de acuerdo con lo reportado por (Rodriguez & Valencia, 2012).

En áreas donde el suelo recibe doble pase de los equipos de cosecha presentó valores de intensidades de tráfico de ($478.79 \text{ Mg km ha}^{-1}$) el cual incrementó un 39% en referencia a los sitios donde transitó una vez el tractor, lo que confirma que al aumentar el número de pases se incrementa la IT y las variables que impactan el proceso de compactación (Rodriguez & Valencia, 2012).

Bibliografía

- Adebiyi, A, Koike, T, Yusawa, S, & Kuroishi, I. (1991). *Compaction characteristics for the towed and driven conditions of a wheel operating on agricultural soil.*
- Alakuku, L. (1996). Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short term effects on the properties of clay organics soils. *Soil & Tillage Research* 37, 211-222.
- Arvidsson, J., & Hakansson, I. (1996). Do effects of soil compaction persist afterploughing. *Soil Till Res.* 39, 175-197.
- Atwell, B. (1990). The effect of soil compaction on wheat during early tillering I. Growth, development and root structure. *New Phytol.* 115, 29-35.
- Barley, K., & Greacen, E. (1963). Influence of soil strenght on the growth of roots. *Soil Sci.* 96, 175-180.
- Baver, L., Gardner, W., & Gardner, W. (1991). *Física de suelos.* México: Limusa.
- Bengough, A. (1991). The penetrometer in relation to mechanical resistance to root growth . *Soil analysis*, 431-445.
- Blanco, R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia* 43, 231-239.
- Botta, G., Jorajuria, D., & Draghi, L. (2002). Influence of the axle load, tire size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Terramechanics* (39), 47-54.
- Botta, G., Rosatto, H., & Pozzolo, O. (2007). Aplicación del tráfico controlado en la cosecha de maíz (*Zea mays* L). Efecto sobre rendimientos del cultivo y las propiedades físicas del suelo. *Agro-Ciencia*, v.23, 23-29.
- Braunack, M., & McGarry, D. (2006). Traffic control and tillage strategies for haversting and planting of sugarcane (*Sacharum officinarum*) in Australia. *Soil & Tillage Research*, v.86, 86-102.
- Cairo, C. (1985). Evaluación de la densidad óptima para el desarrollo de la caña de azúcar en suelos pesados. *Universidad Central de las Villas*, (pág. 25). Villa Clara, Cuba.
- Carbonell G., J., Quintero D., R., Torres A., J., Osorio M., C., Isaacs E., C., & Victoria K., J. (2011). *Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación). Principios metodológicos y aplicaciones.* Cali: Serie Técnica No. 38.
- Cenicaña. (1995). *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia.* Cali: Publicación Cenicaña.
- Chaparro, J., & Romero, T. (1995). *Efectos de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo en el cultivo de palma africana.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Copper, W. (1971). Compaction of agricultural soil: effects of tillage on soil compaction. *ASAE. USA*, 321-324.

- Cueto, O., Coronel, C., & Herrera, M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 18, No.2, 57-63.
- Cueto, O., Rodríguez, M., & Herrera, M. (2006). Compactación del suelo por tráfico de los medios de transporte durante la cosecha de caña de azúcar. *Centro azúcar* 33(2); abril-junio, 85-88.
- Daddow, R., & Warrington, G. (1983). Growth - limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. *USDA - F5, Watershed systems development group REP. WSD6-TN-00005, USDA - FS, Fort Collins, CO.*
- Davies, D., Finney, J., & Richardson, S. (1973). Relative effects of tractor weight and wheel slip in causing soil compaction. *Journal of soil science*. Vol 24 N°3.
- García, I., Sánchez, M., Vidal, M., Betancourt, Y., & Rosa, J. (2010). Efecto de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de la caña de azúcar. *R. Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 19 N.2, 51-55.
- Gavande, S. (1979). *Física de suelos*. México: Limusa S.A.
- Gill, W., & Camp, C. (1969). *The effect of drying on soil strength parameters*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 33.
- Gomez, K. (2011). *Incidencia de la compactación ocasionada por el tractor en las propiedades físicas en un andisol*. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia.
- Goss, M., & Russel, R. (1980). Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.). *J. Exp. Bot* 31, 577-588.
- Gutierrez, F., Vaca, V., Morales, E., Huerta, A., Pérez, D., & Saldívar, P. (2015). Compactación de un vertisol debido al tránsito y diferentes masas de tractores agrícolas. *Rev. Mex. Cienc. Agrí Vol. 6 Núm 4*, 803-813.
- Hamza, M., & Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, v.82, 121-145.
- Hossne García, A. J., & Cedeño Campos, H. J. (2012). Comparación de tres métodos para determinar densidad aparente y solidez en tres suelos franco arenosos de sabana. *Revista Científica UDO Agrícola*, 861-872.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- Jaramillo, J. (2006). Características Físicas del Suelo. En J. J, *Drenaje Agrícola* (pág. 9 a 24). Palmira: Universidad Nacional de Colombia.
- Jiménez, J., Puentes, H., & Leiva, F. (1992). Efectos de tratamientos de labranza sobre la resistencia a la penetración de un andisol. *Agronomía Colombiana.*, v.9 N.1, 30-39.
- Jorajuria, D. (1997). La resistencia a la penetración como parámetro mecánico del suelo. En *Metodologías físicas para la investigación del suelo* (págs. 43-52).

- Jorajuría, D., & Draghi, L. (1997). The distribution of soil compaction with depth and the response of perennial forage crop. *Journal of agricultural engineering research*, V. 66, 261 - 265.
- Jorajuria, D., & Draghi, L. (2000). Sobrecompactación del suelo agrícola Parte 1: Influencia del peso y del número de pasadas. *Rev. Brasileira de engenharia agricola ambiental*. 4, 445-452.
- Jorajuría, D., Draghi, L., & Aragón, A. (1995). *Compactación del suelo bajo tráfico repetido*. Investigación agraria, Prod. Prot. Veg.
- Jorajuria, D., Draghi, L., & Aragón, A. (1997). The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of a lolium/trifolium grassland. *Soil Tillage Res.*41, 1-12.
- Kirbi, J. (1991). The influence of soil deformations on the permeability to air. *Journal of soil science*. 42, 227-235.
- Koleen, A., & Kuipers, H. (1983). Agricultural soil mechanics. *Springer-Verlag*.
- Kroulik, M., Kumhala, F., Hula, J., & Honzik, I. (2009). The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. *Soil & Tillage Research*., v.105, 171-175.
- Laia, A., Maia, J., & Kim, M. (2006). Uso do penetrometro electronico na avaliacao da resistencia do solo cultivado com cana-de-acucar. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*,10, 523-530.
- Letey, J. (1985). Relationship between soil properties and crop production. *Adv. Soil Sc.*, 1, 273-294.
- Letey, J. (1985). Relationship between soil properties and crop production.
- Martino, D. (1998). *Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa*. Manitoba, Canada: University of Manitoba.
- Materechera, S., Dexter, A., & Alston, A. (1991). *Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant-species*. Plant and soil.
- Mielke, L., Powers, W., Badri, S., & Jones, A. (1994). *Estimating soil water content from soil strength*. Soil Till. Res. 31.
- Morejón, Y., González, R., Garcia, A., Vega, E., & Pérez, J. (2016). Influencia de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar en la compactación del suelo. *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol.6 No.1, 33-38.
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *Int. J. Morphol*, 35 (1), 227-232. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ijmorphol/v35n1/art37.pdf>
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *Int. J. Morphol*, 35(1), 227-232. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ijmorphol/v35n1/art37.pdf>

- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N., & Pellegrini, S. (2003). Changes in some physical properties of clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Italia: soil & tillage research* 73, 119-129.
- Porras, V. (1995). Labores de Cultivo. En Cenicaña, *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (págs. 179-189). Cali: Cenicaña.
- Richmond, P., & Rillo, S. (2006). Evaluación del efecto de la compactación por el rodado de maquinas sobre algunas propiedades físicas del suelo y el cultivo de trigo en siembra directa. *INPOFOS informaciones agronómicas N.32*.
- Rodríguez, L., & Valencia, J. (2012). Impacto del tráfico de equipos durante la cosecha de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). *Rev. Brasileira de engenharia agrícola e ambiental v.16, n.10*, 1128-1136.
- Rodriguez, L., & Valencia, J. (2015). Propiedades físicas del suelo. En C. d. Colombia, *Preparación de suelos para la producción sostenible de caña de azúcar* (pág. 164). Cali: Cenicaña.
- Rowse, H., & Goodman, D. (1984). Drilling vegetables into autumn cultivated soil with a low ground pressure vehicle: effects o timeliness and soil compaction . *Journal of science* 35, 347-355.
- Saavedra, S., & Chaparro, O. (2022). Compactación inducida durante cosecha mecánica de *Saccharum* spp. y su relación con propiedades estructurales del suelo. *Avances en investigación agropecuaria*, 155-176.
- Saavedra, S. (2018). *Fertilización nitrogenada en caña de azúcar hacia una labor sostenible mediante agricultura de precisión (Tesis de Maestría)*. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira.
- Saavedra, S., & Chaparro, O. (2022). Compactación inducida durante cosecha mecánica de *Saccharum* spp. y su relación con propiedades estructurales del suelo. *Avances en investigación agropecuaria*, 155-176.
- Séguy, L., Bouzinac, C., Maronezzi, V., & Taffarel, J. (1999). Plantio direto do arroz de sequeiro de alta tecnologia na zona tropical úmida do centronorte do Mato Grosso. *Piracicaba: Potafos*, 29.
- Smith D, & Dickson J. (1990). *Contributions of weight and ground pressure to soil compaction*. Silsoe, UK: Journal of Agricultural Engineering Researchm.
- Soane, B., & Van Ouwerkerk, C. (1994). Soil compaction problems in world agriculture. *Elsevier Science, The Netherlands*, 1-21.
- Soane, B., Blackwell, P., Dicksin, J., & Painter, D. (1981). Compaction by agricultural vehicles: a review soil and wheel characteristics. *Elsevier scientific publishing company. UK*.
- Souza, Z., Prado, R., Paixao, A., & Cesarin, L. (2005). Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana de acucar. *Agropec. Bras.*, 40, 271-278.
- Stitt, R., Cassel, D., Weed, S., & Welson, L. (1982). Mechanical impedance of tillage pans in Atlantic Coastal plains soil and relationships with soil physical. *Soil Sci. Soc* 46, 100-106.

- Sullivan, M., Dickson, J., & Campbell, D. (1967). Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *Journal of soil science*, 38, 137-148.
- Taylor, H., & Ratliff, L. (1969). Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci* 108, 113-119.
- Taylor, J., & Gill, W. (1984). Soil compaction: State of art report. *Journal of terramechanics, Oxford v.21*, 195-213.
- Terminiello, M., Medina, H., Ariata, M., Hilbert, J., Claverie, J., & Jorajuria, D. (2000). Compactación inducida por el tránsito vehicular sobre un suelo en producción hortícola. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, v.4, n.2, 290-293.
- Threadgill, E. (1982). Residual tillage effects as determined by cone index. *Trans ASAE* 25, 859-863, 867.
- Threadgill, E. (1982). Residual tillage effects as determined by cone index. *ASAE*, 25, 859-863.
- Torres, J., & Villegas, F. (1993). Differentiation of soil compaction and cane stool damage. *Sugar cane N.1*, 7-11.
- Torres A., J., Cruz V., R., & Villegas T., F. (2004). *Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar*. Cali: Cenicaña.
- Touchton, C., Reeves, D., & Delaney, D. (1989). Tillage System for summer crops following winter grazing. *Southern Conservation Tillage*, 72-75.
- Valenzuela, G., & Torrente, A. (2010). Física de suelos. En H. Burbano, & F. Silva, *Ciencia del suelo principios básicos* (págs. 154-157). Bogotá, D.C: Sociedad colombiana de la ciencia del suelo.
- Van den Akker, J. (1998). *Prevention of subsoil compaction by defining a maximum wheel load bearing capacity*. Soil compaction and compression in relation to sugar beet production.
- Veen, B. (1982). The influence of mechanical impedance on the growth of maize roots. *Pl. Soil* 66, 101-109.
- Voorhees, W. (1983). Relative effectiveness of tillage and natural forces alleviating wheel induced soil compaction. *Soil Sci. Soc Am.* 47, 129-133.
- Wood, R., Morgan, M., Holmes, R., Brodbeck, K., Carpenter, T., & Reeder, R. (1991). Soil physical properties as affected by traffic: single, dual, and flotation tires. *ASAE* 34, 2363-2369.
- Willians, J Reyes. (2010). Evaluación de la susceptibilidad a la compactación en cuatro series de suelo bajo uso agrícola en Venezuela. *Bioagro v.22. n.1*, pp-29-36

