



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO**  
**AMBIENTE**



**TESIS**  
**EFFECTO DE LA MASA, VELOCIDAD DE AVANCE Y PRESIÓN DE**  
**INFLADO DE NEUMÁTICOS DEL TRACTOR SOBRE LA COMPACTACIÓN**  
**DEL SUELO AGRÍCOLA**

**PRESENTADA POR:**

**DAWES RAMOS ALATA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2023**

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**EFFECTO DE LA MASA, VELOCIDAD DE AVANCE Y PRESION DE INFLADO DE NEUMATICOS DEL TRACTOR SOBRE LA COMPA**

AUTOR

**DAWES RAMOS ALATA**

RECuento DE PALABRAS

**28385 Words**

RECuento DE CARACTERES

**135694 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**104 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**3.2MB**

FECHA DE ENTREGA

**Nov 30, 2023 4:49 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Nov 30, 2023 4:50 PM GMT-5**

● **15% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos:

- 14% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)

  
Dr. Cs. LUIS A. ALARÓ ITURZA-GUARA  
ING. AGRÓNOMO  
C.I.P. 116625

  
Dr. Jared Luque Coria  
ING. ESTADÍSTICO E INFORMATICO  
C.I.P. 116625

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO**  
**AMBIENTE**

**TESIS**



**EFFECTO DE LA MASA, VELOCIDAD DE AVANCE Y PRESIÓN DE**  
**INFLADO DE NEUMÁTICOS DEL TRACTOR SOBRE LA**  
**COMPACTACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA**

**PRESENTADA POR:**

**DAWES RAMOS ALATA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

  
.....  
D. Sc. EVARISTO MAMANI MAMANI

PRIMER MIEMBRO

  
.....  
Dr. PABLO ANTONIO BELTRAN BARRIGA

SEGUNDO MIEMBRO

  
.....  
Ph. D. BERNARDO ROQUE HUANCA

ASESOR DE TESIS

  
.....  
D. Sc. LUIS ALFREDO PALAO ITURREGUI

Puno, 04 de agosto del 2023

**ÁREA:** Ciencias de las ingenierías

**TEMA:** Compactación de suelos

**LÍNEA:** Recursos Naturales y Medio Ambiente.



## DEDICATORIA

A mis padres por darme la vida y apoyarme dándome fortaleza para terminar este proyecto de investigación, a mi papá Washington Ramos Casquino a mi mamá Petronila Alata Escobar por estar ahí cuando más los necesité; en especial a mi esposa Norma e hijos Jean y Mireya por apoyarme y motivarme en el cumplimiento de mis metas. También a mis hermanos Miriam, Christian, Anita y en el cielo Petrowisch.

A mis familiares políticos que ya no están con nosotros, papa Francisco, mamá María y hermanos: Abrahán, Clotilde y Silvia con mucho cariño.



## AGRADECIMIENTOS

“Agradezco en primer lugar a la Universidad Nacional del Altiplano y la Escuela de Posgrado al Programa de Doctorado en Ciencia tecnología y Medio Ambiente, por haberme forjado en la especialidad e inculcar en mi un profundo respeto por el medio ambiente y los recursos naturales y buscar la sostenibilidad de las actividades que tengan que ver con el suelo el agua y el aire, a sus profesores y personal administrativo que, labora en la Universidad Nacional del Altiplano”

Agradezco al Dr. Luis Alfredo Palao Iturregui por su acertada dirección en el presente trabajo de investigación.

Al Dr. Evaristo Mamani Mamani por sus observaciones y sugerencias al trabajo.

Al Ph.D. Bernardo Roque Huanca por sus sugerencias y observaciones.

Al Dr. Pablo Antonio Beltran Barriga por su colaboración en la ejecución de la presente investigación.

Al CE Illpa por su apoyo y facilidades en el uso de la maquinaria agrícola.

Al Ing. Jorge Cañihua del Laboratorio de suelos INIA-Salcedo-Puno por su colaboración eficaz en la investigación.



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1

### CAPÍTULO I

#### REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico	3
1.1.1. El suelo	3
1.1.2. La salud del suelo	3
2.1.3. Mollisol	4
1.1.4. Las propiedades físicas de los suelos	4
1.1.5. Densidad aparente del suelo	4
1.1.6. Porosidad del suelo	5
1.1.7. Resistencia a la penetración del suelo	5
1.1.8. El penetrometro	6
1.1.9. Los microorganismos del suelo	6
1.1.10. La Compactación del suelo	7
1.1.11. El tractor agrícola	7
1.1.12. Transferencia de peso	8
1.1.13. Relación peso-potencia	8
1.1.14. Presión de inflado de neumáticos	9
1.2. Antecedentes	9
1.2.1. Estudios sobre la compactación y la densidad aparente	9
2.2.2. Estudios sobre la compactación y porosidad del suelo	14
1.2.3. Estudios sobre la compactación y resistencia a la penetración	15
1.2.4. Estudios sobre microorganismos del suelo y la compactación	19



1.2.5. Estudios sobre tamaño de la maquinaria, compactación y aspectos técnicos	20
---	----

## **CAPÍTULO II**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

2.1. Identificación del problema	23
2.2. Enunciados del problema	23
2.3. Justificación	24
2.4. Objetivos	25
2.4.1. Objetivo general	25
2.4.2. Objetivos específicos	25
2.5. Hipótesis	25
2.5.1. Hipótesis general	25
2.5.2. Hipótesis específicas	25

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1. Lugar de estudio	27
3.2. Población	28
3.3. Muestra	28
3.4. Método de investigación	29
3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	29
3.5.1. Determinación del efecto de la potencia de los tractores agrícolas, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la densidad aparente del suelo (Da).	29
3.5.2. Comparación de la potencia de tractores agrícolas, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la porosidad total del suelo (%PT).	30
3.5.3. Evaluación de la potencia de tractores agrícolas, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre resistencia a la penetración del suelo (Rp).	31
3.5.4. Relación de la potencia de tractores agrícolas, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la cantidad de microorganismos del suelo (UFC).	32
3.5.5. Diseño experimental	34



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efecto de la potencia, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la densidad aparente del suelo agrícola	36
4.2. Evaluación de la potencia, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la porosidad del suelo agrícola	46
4.3. Comparación de la potencia, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la resistencia a la penetración del suelo agrícola	55
4.4. Relación de la potencia, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la cantidad de microorganismos del suelo agrícola	63
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFIA	73
ANEXOS	80



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Valores referenciales de presión de inflado de neumáticos marca Mittas.	9
2. Valores críticos de densidad aparente (Da) en función de la textura.	13
3. Análisis de Varianza para densidad aparente	36
4. Coeficiente de regresión para Densidad aparente	39
5. Optimizar Respuesta densidad aparente	40
6. Camino de Máximo Ascenso para densidad aparente (Da)	41
7. Camino de Máximo Ascenso para densidad aparente cambiando la potencia en 10 puntos (10hp)	41
8. Camino de Máximo descenso para Densidad Aparente cambiando	42
9. Análisis de Varianza para Porosidad	47
10. Datos técnicos de los tractores en estudio.	48
11. Coeficiente de regresión para porosidad del suelo	52
12. Camino de máximo descenso para porosidad	52
13. Optimización de respuesta para porosidad	53
14. Análisis de Varianza para Resistencia a la Penetración	56
15. Camino de máximo ascenso para resistencia a la penetración. kPa	60
16. Optimización de respuesta resistencia a la penetración.	61
17. Análisis de Varianza para Microorganismos	63
18. Microorganismos observados en el presente experimento	66
19. Coeficiente de regresión para microorganismos del suelo	67
20. Camino de Máximo descenso para Microorganismos	68
21. Optimizar Respuesta para Microorganismos	68
22. Base de datos y distribución de tratamientos diseño Box Behnken 3 factores	81
23. Resultado de muestras testigo o inicial del suelo en campo no perturbado	82
24. Marcas, características técnicas de los 3 tractores en estudio	88
25. Resultados del análisis microbiológica del suelo según tratamientos	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Mapa político de la región Puno	27
2. Imagen satelital del CE-IIIpa	28
3. Forma de medir la resistencia a la penetración en libras por pulgada cuadrada (psi) con penetrometro.	31
4. Escalas de compactación del suelo en el penetrometro Spectrum Technologies.	32
5. Muestra de suelo enfrascado para análisis microbiológico en laboratorio.	33
6. Diagrama de Pareto para densidad aparente.	37
7. Contornos de la superficie de respuesta estimada con una velocidad de avance de 3,5 km/h.	43
8. Efectos principales para densidad aparente del suelo	43
9. Interacciones de los factores sobre la densidad aparente del suelo	44
10. Probabilidad Normal para densidad aparente.	45
11. Superficie de respuesta estimada a una velocidad media de 3,5 km/h.	46
12. Diagrama de Pareto estandarizado para Porosidad	47
13. Grafica de efectos principales para porosidad.	50
14. Grafica de las interacciones para porosidad	53
15. Probabilidad normal para porosidad del suelo.	54
16. Grafica de superficie de respuesta estimada a una velocidad media 3,5 km/h.	54
17. Grafica de contornos de la superficie de respuesta estimada a una velocidad de 3,5 km/h.	55
18. Diagrama de Pareto estandarizado para resistencia a la penetración	57
19. Efectos principales para resistencia a la penetración (kPa)	58
20. Grafica de probabilidad normal para resistencia a la penetracion.	60
21. Grafica de superficie de respuesta estimada para resistencia a la penetracion a una velocidad de 3,5 km/h	61
22. Grafica de contornos de la superficie de respuesta estimada para resistencia a la penetración.	62
23. Diagrama de Pareto estandarizado para microorganismos del suelo	64
24. Grafica de efectos principales para microorganismos del suelo	67
25. Grafica de superficies de respuesta estimada para microorganismos del suelo	69



26. Grafica de contornos de la superficie de respuesta estimada a una velocidad de avance de 3,5 km/h	70
27. Croquis de distribución de tratamientos y su ubicación dentro del campo experimental	81
28. Resultados del análisis de suelo	83
29. Imagen del análisis Microbiológico del suelo	85
30. Imagen de un penetrometro actual analógico.	86
31. Muestreo del suelo en la parte central de la huella	86
32. Imagen de los microrganismo en el suelo sin perturbar	87
33. Tractores utilizados de Izq. A Der Mitsubishi de 25 hp, New Holland TT65 de 65hp y New Holland TD 95D de 98hp	87
34. Reparto de pesos estáticos en tractores de cuatro ruedas motrices desiguales	88
35. Horotacometro de tractor donde se regula según las rpm la velocidad de avance.	89
36. Instrumento de medición digital de presión de neumáticos en libras por pulgada cuadrada (psi)	89
37. Neumático posterior tractor de 65hp de 420mm de ancho por 85% de alto y radial de 30 pulgadas de diámetro interior	90
38. Lectura de la profundidad de huella del tractor de 98 hp	90
39. Imagen del ancho efectivo del neumático radial tractor de 98 hp	91



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Figura de croquis experimental	81
2. Resultados de laboratorio	81
3. Figuras de instrumental y equipo utilizado	86

## RESUMEN

La compactación del suelo es un problema de la agricultura moderna a causa del tractor agrícola, la investigación tuvo como propósito determinar el efecto de los caballos de potencia (hp), presión de inflado de neumáticos (psi) y velocidad de avance (km/h) de tres tractores agrícolas sobre la densidad aparente ( $D_a$  g/cm<sup>3</sup>), porosidad total (PT %), resistencia a la penetración ( $R_p$  kPa.) y microorganismos del suelo (UFC), usando un diseño de superficies de respuesta Box-Behnken para ver el efecto de niveles de potencia, presión de inflado y velocidad: bajo (25 hp, 15 psi y 2 km/h) medio (61,5 hp, 25 psi y 3,5 km/h) y alto (98 hp, 35 psi y 5 km/h) en 15 corridas en un Mollisol con 22% de humedad en el CE. Illpa Puno. Se midió la  $R_p$ , se muestreó y analizó en laboratorio, los resultados muestran que la densidad y porosidad están íntimamente ligados, donde el tractor de potencia y presión alta mas velocidad baja aumenta la  $D_a$  (1,93 g/cm<sup>3</sup>) y disminuye el porcentaje de la PT (29,93 %), la  $R_p$  se incrementó (1330 kPa) por la potencia alta del tractor (98 hp) más presión de inflado media (25 psi) mientras que los microorganismos en el suelo son afectados negativamente por la potencia alta (98 hp) y presión de inflado de neumático alto (35 psi) disminuyendo su conteo (4200 UFC's), con un valor-P < 0,05 siendo el factor potencia alta y presión de inflado mayor como los más perjudiciales sobre el suelo y microorganismos.

**Palabras clave:** Box-Behnken, compactación del suelo, densidad aparente, porosidad, resistencia a la penetración, tractor agrícola.

## ABSTRACT

Soil compaction is a problem in modern agriculture caused by agricultural tractor, the purpose of the research was to determine the effect of horsepower (hp), tire inflation pressure (psi) and forward speed (km/h) of three agricultural tractors on apparent density ( $D_a$  g/cm<sup>3</sup>), total porosity (TP %), resistance to penetration ( $R_p$  kPa.) and soil microorganisms (CFU), using a Box-Behnken response surface design to see the effects of 3 powers, inflation pressures and speeds: low level (25 hp, 15 psi and 2 km/h) medium level (61.5 hp, 25 psi and 3.5 km/h) and high level ( 98 hp, 35 psi and 5 km/h) in 15 runs in a Mollisol with 22% humidity in the CE. Illpa Puno. It was walked over the ground, the  $R_p$  was measured, it was sampled and analyzed in the laboratory. The results show that the  $D_a$  of the soil and the PT are closely linked, where the tractor with high power and pressure plus low speed increases the  $D_a$  (1.93 g/cm<sup>3</sup>) and the percentage of the PT decreases (29.93 %), the  $R_p$  increased (1330 kPa) the reason is the effect of the high power of the tractor plus medium inflation pressure while the amount of microorganisms in the ground are negatively affected by high power and high tire inflation pressure decreasing their count (4200 CFU's), with a P-value < 0,05 being the factors of high power and higher inflation pressure as those with the greatest negative effect on apparent density, total porosity, resistance to penetration and microorganisms.

**Keywords:** Agricultural tractor, Box-Behnken, bulk density, porosity, resistance to penetration, soil compaction.

## INTRODUCCIÓN

“La compactación del suelo es una de las áreas más importantes de la investigación para la protección del ambiente a nivel mundial. Los problemas de compactación del suelo se presentan con mucha frecuencia en áreas donde se tiene una mecanización agrícola extensiva e intensiva” (Torres *et al.*, 2017).

“La agricultura moderna utiliza vehículos agrícolas grandes, lo que ha aumentado los riesgos de compactación del suelo. Por lo tanto, los agricultores se benefician de la maquinaria con mayor capacidad, pero pueden sufrir de rendimientos reducidos causados por la compactación” (Parvin *et al.*, 2022).

Un mayor peso ejercido sobre el suelo agrícola constituye un problema latente ya que provoca la pérdida o modificación de: densidad aparente, resistencia a la penetración y disminución de la porosidad del suelo, se consideran las características físicas más importantes, y también determinantes del potencial agrícola del suelo. La compactación se da por la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo debido a fuerzas externas que actúan sobre el mismo.

“Los microorganismos del suelo son vitales para el funcionamiento de los ecosistemas, por su papel en el ciclado de nutrientes, el uso intensivo del suelo y las prácticas agrícolas alteran negativamente a la actividad microbiana fúngica” (Vázquez y Bianchinotti, 2016).

En el Perú existe la necesidad de mecanizar unas 400 mil hectáreas, lo que representa aproximadamente 2,500 tractores. En el 2011 se importó tractores por US\$ 40,1 millones (1.851 unidades compradas), lo que representó un crecimiento de 58,7% respecto al año anterior representando el 94% del total según el Ministerio de agricultura y riego del Perú (MIDAGRI, 2015). Lo que significa un riesgo para el suelo si no se considera su aptitud.

En Puno el problema está en el desconocimiento del riesgo que trae el uso de tractores de gran tamaño y masa no estando regulado ni recomendado su uso en lugares propensos a la compactación, la libre importación de tractores nuevos y sobre todo usados representa un riesgo potencial si no se conoce para que actividad están diseñados.

Siendo los objetivos determinar el efecto de la potencia (hp), presión de inflado de neumáticos en libras por pulgada cuadrada (psi) y velocidad de operación en kilómetros por hora (km/h) sobre la densidad aparente del suelo en gramos por centímetro cubico



(g/cm<sup>3</sup>), porosidad total en porcentaje (%), resistencia a la penetración del suelo en kilo Pascal (kPa) y la cantidad de microorganismos en el suelo en unidades formadoras de colonias (UFC).

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1. Marco teórico

##### 1.1.1. El suelo

Según el portal de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) “El suelo en palabras comunes es el medio natural para el crecimiento de las plantas. También se ha definido como un cuerpo natural dividida en capas u horizontes compuestos de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua” (FAO, 2023).

El suelo es el producto de miles de años de formación y es influenciado por el tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), proviene de materiales parentales como rocas y minerales originarios. Como consecuencia es diferente de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas (FAO, 2023).

“Los suelos son la fuente de innumerables servicios y bienes esenciales para los seres humanos, incluyendo la provisión de alimentos y hábitat, la regulación del clima, la retención del agua, la detoxificación de contaminantes, la producción de antibióticos, enzimas, entre otros” (Zabaloy, 2021).

##### 1.1.2. La salud del suelo

La salud del suelo es un concepto que emerge a comienzos del siglo XXI, se define como “la capacidad continuada de un suelo de funcionar como un ecosistema vital para sostener la vida de plantas, animales y seres humanos” Zabaloy (2021). Los

suelos proveen muchos servicios y bienes esenciales para los seres humanos, incluyendo la provisión de alimentos y un lugar donde vivir, la regulación del clima, la retención del agua, la detoxificación de contaminantes, la producción de sustancias bioactivas, como antibióticos y enzimas, entre otros (Zabaloy, 2021).

### **2.1.3. Mollisol**

Los Mollisoles por lo general son suelos minerales propios de las planicies y estepas con un horizonte superficial muy oscuro, coloreado y rico en bases. La mayoría de los Mollisoles tienen un epipedión móllico y muchos también poseen un horizonte de diagnóstico subsuperficial argílico, nátrico o cálcico. Algunos pocos Mollisoles pueden mostrar un horizonte de diagnóstico álbico, petrocálcico o duripan, la vegetación típica son las praderas y se dan en muchos climas cuyos regímenes de humedad van desde lluviosos a desérticos, mientras que los regímenes de temperatura del suelo van desde el helados a muy calientes, la precipitación para estos suelos son de 200 a 800 mm por año y se encuentran en zonas subhúmedas hasta áreas semiáridas ejemplo en las llanuras de Norteamérica, Europa, Asia y América del Sur y se encuentran muy extendidos en latitudes medias, altas y regiones tropicales (Ibáñez *et al.*, 2011).

### **1.1.4. Las propiedades físicas de los suelos**

“Las partículas texturales del suelo como arena, limo y arcilla se asocian para formar agregados y a unidades de mayor tamaño nombrados por pedos. La estructura del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión” (FAO, 2023).

“Es muy importante para las personas involucradas en el uso de la tierra, deben saber sobre las propiedades físicas del suelo, para entender cómo interactúan con las plantas y como la actividad del hombre puede llegar a modificarlas negativamente y mantener las condiciones físicas del suelo lo más saludable posible” (FAO, 2023).

### **1.1.5. Densidad aparente del suelo**

“La densidad aparente del suelo ( $D_a$ ) es uno de los indicadores más utilizados para evaluar la estructura del suelo, que se puede utilizar para caracterizar la capacidad

del suelo en la retención de agua, los intercambios gaseosos y el crecimiento de los cultivos” (Rabot *et al.*, 2018).

Se conoce que a través de la densidad del suelo se puede obtener la porosidad total del mismo se refiere al peso por volumen del suelo. “Existen dos tipos de densidad, real y aparente. La densidad real, de las partículas densas del suelo, varía con la proporción de elementos constituyendo el suelo y en general está alrededor de 2,65 g/cm<sup>3</sup>” (FAO, 2023). Además, la densidad real o de partícula se determina en laboratorio y se relaciona con la mineralogía del suelo y la densidad de sus componentes, Por lo general es invariable en el suelo y es de 2,65g/cm<sup>3</sup>.

Cuando la densidad aparente es elevada indica un suelo compacto o duro, con un tenor alto de partículas granulares de arena. Una densidad aparente baja no indica necesariamente un ambiente favorecido para el crecimiento de las plantas (FAO, 2023).

#### **1.1.6. Porosidad del suelo**

El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo que no está ocupado por sólidos. En general, el volumen del suelo consiste en un 50 % de sólidos (45 % de minerales y 5 % de materia orgánica) y un 50 % de espacio poroso. Los macro y microporos se pueden distinguir en el espacio poroso, donde el agua, los nutrientes, el aire y los gases pueden circular o permanecer. Los macroporos no retienen el agua contra la gravedad, son los encargados de secar y airear el suelo y forman un espacio para que se formen las raíces. Los microporos retienen agua y parte de ella está disponible para las plantas (FAO, 2023).

La porosidad total y los macroporos dependen del grado de compactación y del contenido de limo más arcilla, mientras que el contenido de limo más arcilla afecta significativamente a los meso y microporos. La porosidad total y la macroporosidad disminuye con el aumento de la compactación (Lima *et al.*, 2022).

#### **1.1.7. Resistencia a la penetración del suelo**

La resistencia a la penetración del suelo (RPS) se utiliza para medir la compactación del suelo. La RPS expresada por el índice de cono (Ic) se define como “la fuerza por unidad de área base requerida para presionar un cono estándar a través del suelo, el

penetrometro tiene dos diámetros de base de penetración manual de 20,27 mm para suelos que no superen valores de RPS de 2 MPa (suelos blandos) y de 12,83 mm para suelos con valores de RPS hasta 5 MPa (suelos duros) y debe introducirse uniformemente a 30 mm s<sup>-1</sup>” (Nisha *et al.*, 2023).

“A nivel mundial existen escalas de evaluación de la compactación de los suelos, expresada en N/cm<sup>2</sup> o MPa, referente a índices de resistencia a la penetración (Rp) o muchas veces también llamado índice de cono (Ic)” (Domínguez *et al.*, 2018).

Estas escalas en la mayoría de los casos definen un valor de 200 N/cm<sup>2</sup> o 2 MPa como el valor crítico por encima del cual se producen problemas de compactación del suelo; Sin embargo, en Cuba, las escalas de calificación de la compactación del suelo se refieren a g/cm<sup>3</sup> asociadas con el uso generalizado del método de densidad aparente (Domínguez *et al.*, 2018).

“El nivel de compactación inducida en los campos de cultivo se ve fuertemente influenciada por el tránsito de los tractores y las máquinas agrícolas. La compactación del suelo aumenta en la mayoría de los casos y la resistencia mecánica del suelo impide la infiltración del agua y el crecimiento de raíces; además genera alteración de la densidad aparente y disminución del espacio poroso” (Gutiérrez *et al.*, 2012).

#### **1.1.8. El penetrometro**

La resistencia a la penetración que se mide con un instrumento manual llamado penetrometro cuyos resultados se expresan en gramos por centímetro cuadrado (g/cm<sup>2</sup>), kilogramos por metro cuadrado (kg/m<sup>2</sup>), miligramos por metro cuadrado (mg/m<sup>2</sup>), Newton por centímetro cuadrado (N/cm<sup>2</sup>), libras por pulgada cuadrada, pounds per square inches (psi), Mega Pascal (MPa) y kilo Pascal (kPa) (Domínguez *et al.*, 2018).

#### **1.1.9. Los microorganismos del suelo**

Los microorganismos del suelo (bacterias y hongos) son parte integral del ecosistema, porque participan activamente en la circulación de nutrientes y la descomposición de la materia orgánica muerta. Más del 50% de la biomasa microbiana del suelo está formada por hongos, que, además de sustancias

descompuestas, contribuyen a mantener la estructura y la humedad de este medio y así evitar su erosión. La productividad del sistema agrícola está fuertemente relacionada con la actividad microbiológica del suelo. La intensificación del uso de la tierra y las prácticas agrícolas, a su vez, cambia negativamente la actividad de los microbios del suelo. Por lo tanto, el estudio de la biomasa y la actividad microbiana del suelo es importante para comprender el impacto de las actividades agrícolas en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas (Vázquez y Bianchinotti, 2016).

#### **1.1.10. La Compactación del suelo**

“La compactación es el resultado de la acción mecánica de las máquinas. Se traduce por una reducción de la porosidad (o por un aumento de la densidad) bajo el efecto de una presión exterior” (Gil, 2016). La compactación es el resultado directo del peso del tractor sobre el suelo, principalmente obedece a la presión interna del aire en el interior de los neumáticos, además es recomendable los neumáticos gemelos o anchos (o ruedas gemelas), con una presión interna baja en lo posible, así como el empleo de implementos livianos sin mucho requerimiento de tracción de tractores (Gil, 2016).

“La compactación del suelo se puede evaluar directamente en el campo con ensayos sencillos de firmeza o densificación, así como determinando la densidad aparente, la resistencia a un penetrometro la medida de la permeabilidad del agua y al aire” (Porta *et al.*, 2014).

#### **1.1.11. El tractor agrícola**

“El uso de tractores muy pesados permite conseguir una fuerza de tracción máxima con un deslizamiento inferior al 10%. Sin embargo, este método tiene un efecto nocivo, como el exceso de peso, lo que resulta en un mayor consumo de combustible y compactación del suelo” (Moinfar *et al.*, 2020).

El peso de los tractores agrícolas ha aumentado enormemente desde los últimos sesenta años. Las cargas por rueda de las cosechadoras han aumentado de aproximadamente 1,5 Mg en 1960 a 9 Mg en la actualidad, y las cargas por rueda de tractores han aumentado de aproximadamente 1 Mg en 1955 a más de 4 Mg hoy, donde el efecto del aumento de peso de vehículos agrícolas causa un estrés sobre el suelo (Keller *et al.*, 2019).

Actualmente los tractores tienen transmisiones simples (2WD) y dobles (4WD) con caja de cambios mecánicas y automáticas (CVT) incluso algunos con reductores de marcha capaces de transitar a velocidades muy bajas 1 km/h hasta 40 km/h, esto favorece enormemente al operador porque puede escoger la velocidad adecuada para cada operación. Al respecto Moinfar *et al.*(2022) manifiesta que “con el incremento de la velocidad y la profundidad, la compactación del suelo disminuyó. La densidad aparente mínima de  $1109 \text{ kg/m}^3$  se produjo a una velocidad de 6,78 km/h utilizando el sistema 4WD, también con este sistema a la profundidad de 40 cm la densidad fue de  $1127 \text{ kg/m}^3$ . Mientras que a una velocidad de 1,26 km/h y una profundidad de 20 cm la densidad del suelo fue de  $1190 \text{ kg/m}^3$ ”.

#### **1.1.12. Transferencia de peso**

Cuando las ruedas del tractor están cargadas por fuerzas verticales que no corresponden a las proporciones especificadas, las deformaciones de los neumáticos delanteros y traseros tampoco corresponden a las proporciones especificadas, y esto conduce a una discrepancia cinemática debido al cambio en la relación entre las ruedas motrices. En caso de discrepancia cinemática, se está produciendo un deslizamiento/derrape de las ruedas. Se conoce la importancia de la presión de inflado de los neumáticos tanto delanteros y traseros, lo que permiten evitar el deslizamiento/patinaje de las ruedas del tractor (Pupinis y Kurkauskas, 2014).

Los neumáticos están disponibles en una variedad infinita de tamaños, clasificaciones de carga, patrones de rodadura y compuestos de materiales. Los neumáticos son los únicos componentes del sistema de vehículos de ruedas que conectan el vehículo con el terreno sobre el que viaja. Esto puede variar desde una sola rueda hasta varias ruedas, según el vehículo y la aplicación (Beker y Shalck, 2022).

#### **1.1.13. Relación peso-potencia**

Las recientes tendencias en la mecanización agrícola han conducido al desarrollo de maquinaria cada vez mayor con masas que superan a 16 Mg de carga en el eje frontal y tractores con pesos en el orden de 200 kN con 250 kW (20394,33 kg) lo que se busca es un mayor rendimiento en el campo a menos costo y mayores áreas sin prestar

atención a la compactación, reduciendo el crecimiento de raíces.(Gutiérrez *et al.*, 2017). Teniendo una relación peso-potencia muy elevada de 67.98 kg/hp.

#### 1.1.14. Presión de inflado de neumáticos

Los neumáticos de los tractores agrícolas que trabajan con baja presión soportan la mayor parte de la carga total, y la mayor presión se distribuye sobre los ejes de los neumáticos cuando el suelo está seco. Cuando la presión de los neumáticos es alta, la rigidez del neumático aumenta, provocando más presión en el centro del neumático, mientras que en superficies mojadas, la presión de los neumáticos no tiene efecto sobre la presión sobre el suelo, donde solo depende de la carga del neumático (González *et al.*, 2012).

Tabla 1

*Valores referenciales de presión de inflado de neumáticos marca Mittas.*

Kilo pascal	Kilogramo/centímetro cuadrado	Libras/pulgada cuadrada
80 (kPa)	0,81 (kg/cm <sup>2</sup> )	11,6 (psi)
140 (kPa)	1,42 (kg/cm <sup>2</sup> )	20,3 (psi)
160 (kPa)	1,63 (kg/cm <sup>2</sup> )	23,2 (psi)
245 (kPa)	2,49 (kg/cm <sup>2</sup> )	35 (psi) P. Max. Admisible

Fuente: Bauer (2022).

Existe una gran diversidad de neumáticos, se hace difícil la elegir sin embargo existen modelamientos geométricos que no solo determina el tamaño específico de neumático, los tractores modernos pueden monitorear la presión de inflado y mantener esta presión constante y cambiar cuando es necesario por tipo de suelo, humedad y otros para minimizar la compactación del suelo, esta innovación está disponible en las principales marcas pero su complejidad y costo hacen difícil su aplicación (Sheludchenko *et al.*, 2022).

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Estudios sobre la compactación y la densidad aparente

Para Pulido *et al.* (2019) la compactación del suelo es uno de los principales problemas en la agricultura a través del globo. “El tráfico por el campo con

maquinaria pesada es la principal causa de compactación de la superficie y el subsuelo que afecta a 33 millones de hectáreas de tierras templadas de Europa”.

“El problema de la compactación del suelo se ha visto agravado por el incremento del tamaño de maquinaria agrícola sino también por manejo inadecuado del suelo en condiciones de mucha humedad” (Pulido *et al.*, 2019).

Los últimos años se han caracterizado por un aumento del peso de la maquinaria agrícola, debido al aumento global en el número e intensidad de las operaciones agrícolas causando un impacto antrópico sobre el suelo reduciendo la producción agrícola, muy especialmente la estructura del suelo, se interrumpe y se altera la relación agua-aire del suelo con cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo y por eso se busca mejorar el funcionamiento de la maquinaria agrícola con ruedas (Sheludchenko *et al.*, 2022).

La compactación del subsuelo es un problema latente en toda Europa, en Holanda se realizó un estudio donde se buscaba los suelos más susceptibles a la compactación en función de la textura, densidad aparente y el clima, el segundo caso con la resistencia a la compresión y la carga máxima permitida por rueda de un neumático, donde se determinó que los suelos arenosos y franco-arenosos se indican como más vulnerables que los arcillosos (Van den Akker y Hoogland, 2011).

En un suelo húmedo, con neumáticos con presión estática sobre el suelo de 150 a 450 kPa y presiones de inflado de 100 a 325 kPa (14.5 a 43 libras por pulgada cuadrada psi), la distribución de la presión en la superficie de contacto no es uniforme, la presión influyendo sólo en los primeros 15 cm de la capa superficial, a partir de esta profundidad las presiones verticales son resultado sólo de la carga sobre el eje (González *et al.*, 2012).

En Colombia se realizó el trabajo “Compactación, una de las causas más comunes de la degradación del suelo”, donde se observó un incremento potencial de la compactación del suelo, ya que debido a la masa elevada peso de los tractores y maquinaria empleada de manera imprudente e irresponsable ocasionando altas presiones superficial sobre el suelo, los que alteraron la densidad aparente y además de reducir los macroporos del suelo (Torres *et al.*, 2017).

La presión de contacto neumático-suelo cambia para diferentes condiciones de presión de inflado ( $P_i$ ), tanto en suelo seco como húmedo, se aprecia como la  $P_i$  de 100 kPa causa una mayor presión en los costados del neumático e inferior en el centro. Este resultado se explica porque a bajas presiones de inflado la carcasa sostiene la mayor parte del peso sobre el neumático. A presión de inflado de 325 kPa y soportando el neumático la misma carga (712 N), este es más rígido y la  $P_i$  en su interior soporta mayor carga y la presión en el centro del neumático es mayor (González *et al.*, 2012).

Se investigó en Toluca México el efecto de tipos de tractores (4WD y 2WD), masas e inflado de sus neumáticos, en un Vertisol. siendo el tractor con tracción en las 4 ruedas (4WD) el que menos compacto la capa superficial del suelo básicamente debido al mayor área de contacto de la rueda traseras quienes son las que cargan el 60% de la masa del tractor con  $0.1844\text{m}^2$  de área de contacto (Gutiérrez *et al.*, 2017).

En Argentina se realizaron investigaciones sobre compactación superficial del suelo a causa del tráfico de maquinaria agrícola, la labranza profunda sin inversión disminuyó significativamente la densidad aparente del suelo hasta una profundidad de 0 - 0,20 m;  $P < 0,0001$ ; en un -4,3 % en promedio es decir  $0,06\text{ Mg/m}^3$  ( $0,06\text{ g/cm}^3$ ) llegando hasta  $0,19\text{ Mg/m}^3$  (Peralta *et al.*, 2021).

En Irán se evaluó el sistema de conducción sobre el deslizamiento de las ruedas del tractor Goldoni 240, donde la tracción en las cuatro ruedas (4WD), la tracción en las ruedas traseras (RWD) y la tracción en las ruedas delanteras (FWD) a diferentes velocidades de desplazamiento. 1.26, 3.96 y 6.78 km/h, presiones de inflado de llantas de 170, 200 y 230 kPa humedades del suelo, número de pasadas (1, 5 y 9) y texturas del suelo (franco arcilloso, franco y franco arenoso) a las profundidades de 10, 20, 30 y 40 cm. el aumento del patinamiento de las ruedas del tractor mostró un efecto significativo en el aumento de la compactación del suelo. El deslizamiento más bajo de las ruedas del tractor se produjo con el sistema 4WD y, al aumentar la velocidad de desplazamiento en este sistema, disminuyó la compactación del suelo. El aumento de la velocidad del tractor en el sistema FWD aumentó el deslizamiento de las ruedas del tractor y la compactación del suelo. Además, el aumento del contenido de humedad del suelo resultó en un aumento de la compactación del suelo, y este evento fue intenso en suelos finos como el franco arcilloso. Según los

coeficientes estándar de los modelos de regresión, la profundidad, el tipo de sistema de conducción, el número de pasadas, el contenido de humedad, la textura, la velocidad y la presión de inflado fueron los factores que afectaron significativamente en la densidad aparente del suelo (Moinfar *et al.*, 2022).

La densidad aparente del suelo es considerada uno de los factores con más relevancia como indicador de la degradación de la tierra. Se midió los cambios a lo largo del tiempo en cítricos en España desde el 2007 al 2020 los resultados demuestran un aumento en la densidad aparente del suelo densidad de  $1,05 \text{ g/cm}^3$  a  $1,33 \text{ g/cm}^3$ , los cambios en la densidad aparente del suelo fueron mayores en el centro de la fila como resultado de la compactación debido al paso de la maquinaria (Cerdà *et al.*, 2021).

Al evaluar la interfaz suelo-neumático medidas debajo de los tacos del neumático que tenía las siguientes dimensiones 18.4 R38 que transitó por un suelo franco arenoso de Norfolk. El neumático se cargó con una carga por eje equivalente de 2,7 Mg. Donde los contornos indican presiones de 40 a 120 (kPa), y las mediciones de densidad aparente también se encontraron en el centro de la huella cuando el neumático radial del tractor estaba muy inflado (121 kPa). Alterando en mayor grado y de manera negativa la densidad aparente justo en el centro de la huella y a menores presiones de inflado en los contornos (Raper, 2005).

La densidad del suelo aumentó a medida que aumentó la humedad del suelo. La densidad máxima de  $1330,2 \text{ kg/m}^3$  se produjo en la humedad de 22%, que fue la humedad crítica para el suelo determinada por la prueba Proctor estándar. A mayor velocidad de avance del tractor disminuye la densidad del suelo, y esto probablemente ocurrió porque el aumento de la velocidad disminuye el área de contacto del neumático con el suelo y el tiempo de contacto disminuyendo así la compresión del suelo y de los neumáticos. Al aumentar la velocidad de 1 a 5 km/h, a un promedio de profundidad y humedad, la densidad del suelo disminuyó de 1321 a  $1279,6 \text{ kg/m}^3$ . encontró que la densidad aparente del suelo disminuyó significativamente a medida que aumentó la velocidad (Shahgholi y Abuali, 2015).

Se puede evitar una mayor densidad aumentando la velocidad de avance de los tractores. Sin embargo, cuando aumenta el deslizamiento el aumento de la velocidad no puede evitar la compactación del suelo FWD. Debido a que la velocidad de desplazamiento no puede aumentar sin un aumento del deslizamiento, aumentar la

velocidad conduce a un mayor deslizamiento y compactación del suelo. La reducción de la compactación del suelo mediante el aumento de la velocidad se ha observado claramente en muchos estudios que utilizan sistemas 4WD o RWD (Moinfar *et al.*, 2022).

El mismo autor reporta una alta presión de inflación destruye el suelo y aumenta la compactación del suelo, mientras que a una profundidad de 10 cm, existe una diferencia significativa en la densidad aparente entre las diferentes presiones de inflado de los neumáticos. La razón de esta diferencia podría ser la tensión que las ruedas aplican a la capa superior del suelo, pero la tasa de transmisión de la tensión al subsuelo es insignificante (Moinfar *et al.*, 2022).

Existe una triple interacción entre la humedad, profundidad y velocidad del tractor donde se mostró que una densidad mínima de  $1234.5 \text{ kg/m}^3$  se produjo en la humedad más baja de 11% con un máximo velocidad 5 km/h y profundidad de 40 cm, respectivamente. La densidad máxima de  $1382 \text{ kg/m}^3$  ocurrió en el máximo humedad del 22%, velocidad del tractor de 1 km/h y profundidad de 20 centímetros (Shahgholi y Abuali, 2015).

Tabla 2

*Valores críticos de densidad aparente ( $D_a$ ) en función de la textura*

Textura	Densidad aparente critica (Mg m-3) - $\text{g/cm}^3$
Franco arcillosa	1,55
Franco limosa	1,65
Franco arenosa fina	1,80
Arenosa franca fina	1,85

**Fuente :** Rubio, 2010

“La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas debido al efecto que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir” (Rubio, 2010), puede variar según el suelo y de la especie de que se trate.

### 2.2.2. Estudios sobre la compactación y porosidad del suelo

La densidad aparente fue evaluada y se encontró que es un factor confiable para medir la compactación, de similar manera la porosidad del suelo y estructura del suelo, donde los equipos utilizados en términos de peso (6,5–8 Mg) y ancho de neumático (0,70 m), anchuras de trabajo (3 m) y presión de inflado (70 kPa), para cosechadoras con más de (15 Mg) con una alta presión de inflación (200-300 kPa), representan datos muy interesantes que pueden ser utilizados a futuro (Lamichhane *et al.*, 2021).

La porosidad y El "tiempo de transitabilidad" sin lluvia, o riegos tienen efectos estacionales sobre el tiempo de transitabilidad, fueron más pronunciados en los suelos arcillosos. Donde se necesita investigación adicional para la validación y para restringir mejor las estimaciones de tiempo de transitabilidad para suelos arcillosos y de textura fina, que muestran un mayor grado de incertidumbre en medio de un mayor riesgo de compactación en condiciones de mayor humedad indicado por los índices de plasticidad (Devine *et al.*, 2022).

“La porosidad total y la densidad aparente inicial del suelo no fueron influenciadas por la estructura del suelo (conservado y no conservado) pero la relación entre macroporosidad y microporosidad sí lo fue; además, al aumentar la densidad aparente, hubo una disminución de los macroporos y de la deformación del suelo bajo carga ”.(Eduardo *et al.*, 2022). De la misma manera demostró que valores similares (35 a 47 kPa) en un Vertisol bajo pastoreo de ganado, y esos valores se correlacionaron positivamente con la densidad aparente y de forma negativa con porosidad total.

La porosidad del suelo fue evaluada para estudiar la compactación originada por las ruedas con cargas de ~3 Mg (M3) y ~8 Mg (M8) ~12 Mg (S12). Por cuatro años la calidad estructural del subsuelo se evaluó visualmente los poros del suelo se cuantificaron para núcleos de suelo mínimamente perturbados muestreados a 30, 50, 70 y 90 cm. profundidad dos años después del final del experimento. Los resultados indican que M8 afectó significativamente la estructura del suelo, hasta > 50 cm de profundidad en términos de calidad estructural del subsuelo reduciéndose el espacio poroso lleno de aire, permeabilidad al aire, difusividad del gas y aumento de la densidad aparente. El paso repetido de la rueda compromete la estructura del suelo

reduciendo la cantidad de poros ( $\sim 50\text{--}70 \mu\text{m}$ ), haciéndose más pequeños que los texturales (Pulido *et al.*, 2019).

### 1.2.3. Estudios sobre la compactación y resistencia a la penetración

El Índice de cono ( $I_c$ ) medido en la aradura con discos después de la siembra el  $I_c$  supero los 3 MPa por debajo de 12.5 cm mientras que con multiarado en 80% de los datos fueron inferiores a 3 MPa, coincidiendo con el  $I_c$  después de la cosecha en ambos casos trabajando con un tractor 6603 John Deere (4X4) neumático radial con una masa total de 5 872 kg. A una presión de inflado de neumático de 140 kPa (García *et al.*, 2020).

“El efecto del endurecimiento del suelo causa en la raíz una reducción en su crecimiento hasta en un 50%, cuando el  $I_c$  se encuentra de 0.7 a 1.5 MPa y se limita completamente a valores mayores de 4 MPa” (Kirkegaard y Troedson, 1993).

“Hernández encontró una correlación positiva significativa entre la resistencia a la penetración ( $R_p$ ) y densidad aparente ( $D_a$ ) cuando este es trabajado con maquinaria” (Hernández *et al.*, 2017).

“El uso de una moto azada, azadón y sin maquinaria mostraron que la resistencia a la penetración ( $R_p$ ) presento diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) siendo mayor para el tratamiento mecanizado, en las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm” (Hernández *et al.*, 2017).

Los resultados mostraron que el índice del cono del suelo aumentó a una profundidad: 0–450 mm en el orden: cero ( $1,90 \pm 0,31$  MPa) > tráfico controlado ( $2,46 \pm 0,19$  MPa) > aleatorio ( $3,75 \pm 0,21$  MPa), respectivamente, lo que explica diferencias de tratamiento en la biomasa de raíces (Botta *et al.*, 2022).

En Costa Rica se realizó un estudio titulado “Degradación del suelo por compactación en función de la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas”, donde se encontró el límite máximo para el suelo en condiciones friables es de 49 kN por eje (4 996,61 kg), donde solo el 3,1 % de los tractores con ruedas paso el peso límite, sin embargo, cuando se analizó el tractor con el implemento levantado la carga genero un exceso de peso (Gómez *et al.*, 2019).

En México se realizó la “Evaluación de la intensidad del tráfico de tractores e implementos en un suelo agrícola”, donde se observó el recorrido en todas las tareas, y las lecturas de datos se tomaron con un intervalo de 2 s. Se midió el ancho de los neumáticos, presión de inflado de 140 kPa (20.30 psi), siendo la labranza convencional con  $I_c$  (índice de cono) superior a los 3 MPa y labranza mínima 3 MPa, coincidiendo con el  $I_c$  después de la cosecha en ambos casos (García *et al.*, 2020).

Así mismo se investigó los patrones de tráfico de máquinas tuvieron un efecto ( $P < 0.001$ ) en los valores de resistencia a la penetración a 400 mm de profundidad del suelo en septiembre y a 250 mm en febrero en la capa de suelo de 0-250 mm, las mayores resistencias se registraron en la zona de giro (2,04 y 1,83 MPa para septiembre y febrero), mientras que a mayor profundidad 250-400 mm se dio en el borde del campo (3,56 y 1,83 MPa) trabajando con un tractor con una masa 5,88t donde la tendencia general es de aumento de la resistencia a la penetración (Ward *et al.*, 2021).

En Argentina se realizaron investigaciones sobre compactación superficial del suelo a causa del tráfico de maquinaria agrícola, la labranza profunda sin inversión disminuyó significativamente la resistencia a la penetración del suelo a una profundidad 0 – 0.20 m en un 44 % en promedio ( $\Delta = -0.86$  MPa) equivalente a 860 kPa (Peralta *et al.*, 2021).

En un estudio realizado en Etiopia sobre degradación y compactación del suelo se ha comparado tipos de arados y labranzas donde se midió la resistencia a la penetración del suelo resultando este menor significativamente hasta 40 cm de profundidad con arado modificado. Teniendo efectos positivos sobre el aumento del almacenamiento de agua y el desarrollo de raíces que resultaron en un aumento promedio en el grano de maíz en 15%, 0,95 t- ha (Fenta *et al.*, 2022).

El mismo autor manifiesta que a lo largo de la campaña agrícola del 2017, se midió semanalmente la resistencia a la penetración ( $R_p$ ) a 40 y 60 cm de profundidad manteniéndose cerca a los 2 MPa incrementándose en época lluviosa, la  $R_p$  media fue de a 60 cm de profundidad fue de 1,96 MPa, 2,11 MPa, 2,18 MPa y 2,32 MPa para arado Berken (BT), convencional arado (CT), CT + Bio y no labranza (NT), respectivamente. Cambiando luego de 11 semanas en 2.19 MPa, 2.21 MPa, 2.33

MPa y 2.25 MPa a la misma profundidad. Siendo el mejor significativamente el arado Berken (BT) con menos de 2 MPa (Fenta *et al.*, 2022).

En un estudio realizado en Argentina se investigó el efecto de tres tratamientos de tráfico cero, controlado, y tráfico aleatorio de maquinaria agrícola sobre la resistencia a la penetración, los resultados mostraron que el Índice de cono de suelo (rango de profundidad: 0–450 mm) había aumentado en el orden: cero ( $1,90 \pm 0,31$  MPa) > controlado ( $2,46 \pm 0,19$  MPa) > tráfico aleatorio ( $3,75 \pm 0,21$  MPa), donde se concluye y se menciona que existe potencial para el desarrollo futuro de la agricultura de tráfico controlado (Botta *et al.*, 2022).

Balsari probó distintas velocidades del tractor (3, 6, 9 y 12 km/h), profundidad de trabajo nominal (6, 9 y 15 cm) y velocidad del rotor (285 y 411 rpm) a una velocidad de toma de fuerza de 1000 revoluciones por minuto (rpm) para evaluar las diferencias en el rendimiento del sistema tractor, los resultados obtenidos en condiciones de operación pueden ser favorable con respecto al consumo de energía y combustible ya que esta información puede ser muy útil para los agricultores para reducir costos mas no así registro efectos de la velocidad de desplazamiento del tractor en el suelo (Balsari *et al.*, 2020).

En Irlanda se realizó un estudio en 41 lugares manejados convencionalmente para investigar el efecto de la compactación en el borde del campo, zonas de giro, transición y dentro del campo en relación con la maquinaria agrícola observándose a 250–400 mm de profundidad, la densidad aparente, porosidad y la resistencia a la penetración fue distinta por ubicación, siendo las zonas de menor tráfico de maquinaria con los mejores puntajes (Sq 2.81 y DS 2.48), y la zona de giro de más tráfico arrojó los puntajes más bajos en la capa de suelo de 0–250 mm (Sq 3.31 y DS 2.91 ). Para la resistencia a la penetración fue mayor en la zona superior (2,49 y 3,20) e inferior (3,41 y 4,05) y para la veleta de corte (38,17 y 53,59 kPa) para el mismas zonas (Ward *et al.*, 2021).

Los resultados de resistencia a la penetración del suelo ( $I_c$ ) mostró que los valores en diferentes transectos del suelo hasta 37,5 cm de profundidad y luego aumento considerablemente con promedios de 1,19 MPa en todo el perfil a una profundidad de 0 a 45 cm, trabajándose con diferentes equipos agrícolas desde sembradoras con

un peso de 3200 kg., pulverizadores de 10 600 kg. y cosechadoras de más de 8 300 kg de masa (Sivarajan *et al.*, 2018).

En Irán la compactación del suelo es un problema considerado ambiental que requieren estudios precisos. Se investigó la compactación del suelo a tres niveles de carga por rueda (1, 2 y 3 kN), tres niveles de velocidad (0.5, 0.75 y 1 m/s) y a 1, 2 y 3 pasos de rueda con tres repeticiones en suelo franco arcilloso. Los experimentos se realizaron en un ambiente controlado con probador de una sola rueda dentro de un contenedor de suelo. Resistencia a la penetración y el hundimiento del suelo se determinaron como índices de compactación del suelo. Donde la mayor resistencia a la penetración fue de 260 kPa ocurrió a una profundidad de 210 mm, en el tercer paso, con una carga de rueda de 3 kN y velocidad de 0,5 m/s, La resistencia a la penetración más baja de 121 kPa fue a una carga de rueda de 1 kN, primera pasada y a una velocidad de 1 m/s (Taghavifar y Mardani, 2014).

El perímetro de la zona de contacto se puede ver que la presión de contacto aumenta ligeramente en la presión de inflado más baja de 80 kPa (11 psi) a medida que la banda de rodadura se desgasta 100% a 50%. Se observa una caída de presión de contacto del 60 al 66 % con una banda de rodadura del 0 % (Becker y Els, 2022).

De las huellas y mapas de presión se advierte que la banda de rodadura al 100% tiene una huella más larga en comparación con el 50% mientras que la condición de 0% de la banda de rodadura tiene las medidas de perímetro más pequeñas; sin embargo, esta condición tiene la más alta área de contacto de las tres condiciones, por lo que tiene la presión de contacto más bajo (presión estática). El área de contacto, para una condición de banda de rodadura al 0 % y un inflado presión de 80 kPa, aumenta un 202 % (35 993 mm<sup>2</sup>) en comparación con el 100 % de la banda de rodadura condición a 80 kPa. (8490 mm<sup>2</sup>). El área de contacto para una condición de banda de rodadura de 0% para un La presión de inflado de 200 kPa aumenta un 147 % en comparación con la Estado de la banda de rodadura al 100 % a 200 kPa.(30 PSI) (Becker y Els, 2022).

La resistencia a la penetración ( $R_p$ ) fue evaluada con tres tratamientos: Mecanizado, con azadón y testigo y los valores estuvieron por debajo de los umbrales de compactación y estos varían de 1.5 MPa (50% de disminución en el crecimiento radical de maíz) a 3 MPa (detenimiento del crecimiento radical) pudiendo variar por

cultivo y condiciones fisiológicas y proponen nivel crítico de  $R_p$  mayor 2.0 MPa. a profundidad menor 0,20 m (Hernández *et al.*, 2017).

El simple hecho del pisoteo de un caballo, paso de una maquinaria forestal, genera mayores valores de tensión de precompresión para las muestras de suelo no perturbadas, debido al historial de cargas aplicadas por el tráfico de la maquinaria y el pisoteo de animales pudiendo superar valores de 300 kPa, donde se obtuvo diferencias utilizando muestras de suelo no alteradas (Eduardo *et al.*, 2022).

La reducción de las cargas de las ruedas ha sido durante mucho tiempo el consejo clave para reducir el riesgo de deformación del subsuelo, pero esto ignora otras interacciones entre la maquinaria y el suelo, como los efectos de la tracción y el uso repetido de las ruedas. El tráfico experimental comprendía un tractor (carga estática 11 Mg) con tracción en las cuatro ruedas activada que remolcaba un remolque (carga estática 17 Mg o 24 Mg) y se llevó a cabo en un suelo franco arenoso con rastros de avena con un contenido de agua del suelo cercano a la capacidad de campo. Las mediciones de estrés vertical del tractor fue inferior al del remolque alcanzado valores de 230 kPa altamente significativo en el remolque y 150 kPa no significativo en los neumáticos traseros del tractor, ya que la forma del área de contacto del neumático era más cuadrada que elíptica, pero no más larga (Damme *et al.*, 2021).

No obstante, al cambiar la presión de inflado, es necesario tomar en cuenta la carga admisible de los neumáticos especificado por el fabricante generalmente al costado del neumático, la resistencia a la penetración ( $R_p$ ) disminuye con una disminución de la presión de inflado. Al evaluar la presión medida debajo de las ruedas traseras del tractor con arado, se encontró además que el inflado de los neumáticos tiene un mayor efecto sobre la presión de contacto de la parte de las ruedas traseras que delanteras (Bauer *et al.*, 2022).

#### **1.2.4. Estudios sobre microorganismos del suelo y la compactación**

En un estudio se buscó relacionar el número potencial de cianobacterias con la rotación de cultivos, donde fue menor los recuentos en la plantación y mayor en el panojamiento y embuchado del arroz en la rotación arroz-arroz. El análisis estadístico no mostró efecto de las rotaciones sobre el número de cianobacterias, se reconocieron un total de 13 géneros de cianobacterias Lyngbya,

Oscillatoria, Plectonema, Spirulina, Anabaena, Nostoc, Aulosira, Calothrix, Gloeotrichia, Aphanocapsa, Croococcus, Myrocystis y Gloeocapsa (Sánchez *et al.*, 2019).

Las relaciones entre la salud se dan como resultado de la transferencia de microorganismos o de parte de sus genes entre plantas, animales y suelos. La diseminación de enfermedades ocurre de manera horizontal. “Si bien estos eventos biológicos ocurren en forma natural en el microbioma del suelo, su frecuencia puede incrementarse significativamente debido al uso de enmiendas orgánicas derivadas de excretas animales crudas no fermentadas” (Zabaloy, 2021), además del riego con aguas residuales con agroquímicos.

“Los microorganismos del suelo son vitales para el correcto funcionamiento de los ecosistemas, principalmente por su papel en el ciclado de nutrientes. La intensificación del uso del suelo y las prácticas agrícolas alteran negativamente la actividad microbiana. La biomasa fúngica es uno de los parámetros más utilizados para estudiar el impacto de las actividades agrícolas en la estructura y el funcionamiento del suelo” (Vázquez *et al.*, 2016).

Una de las actividades más apropiadas que se han propuesto para mitigar la degradación de los suelos, es la de técnicas de cultivos de cobertura y de incorporación de materia orgánica descompuesta, para incrementar la actividad de los microorganismos así como el uso de acondicionadores o mejoradores, para estabilizar la estructura y mejorar la porosidad y la infiltración del agua en el suelo (Núñez, 2014).

#### **1.2.5. Estudios sobre tamaño de la maquinaria, compactación y aspectos técnicos**

El peso del tractor demostró ser el factor más importante en el hundimiento del tractor sobre el suelo afectando significativamente la compactación, el deslizamiento de los neumáticos, el tipo de sistema de tracción, la presión de inflado de los neumáticos y la velocidad de avance tienen un efecto similar al incremento de peso y hace que la presión se transfiera a las capas del subsuelo y se produzca la compactación del subsuelo (Moinfar *et al.*, 2022).

A través de una simulación mediante ecuación de estimación en base a: el hundimiento de las ruedas, el deslizamiento y la deflexión de las llantas en un rango de presiones de inflado de las llantas, y las relaciones entre ellos fueron analizados e incorporados en una nueva ecuación para la estimación de Índice de Cono Real RCI. Donde el hundimiento de rueda tiende a aumentar con la presión de inflado de los neumáticos, pero no más allá la presión óptima de inflado de los neumáticos. El hundimiento de las ruedas de los tractores dentro del rango de 1 a 3 cm en el suelo experimental. Así, independientemente de la presión de inflado de los neumáticos (Oh *et al.*, 2019).

El aumento del tamaño de la maquinaria tiene el inconveniente de aumentar las cargas por eje y las tensiones del subsuelo se estimó un aumento promedio de 14 veces en las tensiones del subsuelo (desde 0,02 MPa en 1930 utilizando arado y caballos a 0,28 MPa a 0,4 m de profundidad) en el 2010 con cosechadoras de 30 Mg, respectivamente. Lo que constituye “maquinaria pesada” y se le atribuye a todo aquel equipo que aplica un esfuerzo  $> 200$  kPa en la superficie del suelo y no debe ser simplemente una función de la masa de la máquina, sino que debe estar determinado por la masa en la rueda, donde (1990) se establece que la carga máxima en la interfaz del suelo debe ser mucho menor que 0,2 MPa. (2,03 kg/cm<sup>2</sup>) (Bennett *et al.*, 2019).

En los últimos 10 años el tamaño y el peso de los equipos agrícolas han aumentado significativamente, la gravedad y la profundidad de la zona compactada pueden haber aumentado proporcionalmente, investigaciones anteriores indican que la compactación del suelo afecta el crecimiento de los cultivos y el rendimiento del grano. Se han realizado muy pocos estudios en Dakota del Norte (ND) para comprender la compactación del suelo con la maquinaria actual y su efecto en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Sivarajan *et al.*, 2018).

De similar manera en 8 países de Europa se estudió el conocimiento y comprensión sobre el tráfico controlado de tractores (CTF) siendo los principales factores que limitan la adopción de CTF parecen ser: la falta de compatibilidad en la maquinaria y Sistemas Global de Navegación por Satélite (GNSS), la falta de beneficios demostrados en las condiciones locales y se sugieren a futuro un cambio de



maquinaria simple, liviana, adaptable y energéticamente eficiente (Tamirat *et al.*, 2022).

“Es imposible eliminar el efecto del tráfico de vehículos en la producción de cultivos agrícolas. La capacidad de propulsar un vehículo a través del campo para realizar operaciones de campo es necesaria y no puede eliminarse” (Raper, 2005).

Sin embargo, se pueden reducir el efecto del tráfico de vehículos en la producción de cultivos, estos incluyen reducir la capacidad del suelo para compactarse como realizar enmiendas y rotaciones de cultivo, reducir al mínimo el tráfico de los vehículos, reducir el tamaño de los vehículos, controlar el tráfico, minimizar el contacto entre los elementos de tracción y el suelo (Raper, 2005).

Aumentando el tamaño de los neumáticos puede significar una mayor área de contacto de un neumático que está en contacto con el suelo. Suponiendo que los anchos de un neumático sean iguales, los neumáticos más grandes deberían producir una mayor área de contacto con el suelo debido a su mayor longitud de contacto (Raper, 2005).

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1. Identificación del problema

“La compactación del suelo es una de las áreas más importantes de la investigación para la protección del ambiente a nivel mundial. Los problemas de compactación del suelo se presentan con mucha frecuencia en áreas donde se tiene una mecanización agrícola extensiva e intensiva” (Gutiérrez *et al.*, 2017).

Mantener o mejorar la calidad física del suelo es cada vez más importante para la producción agrícola. Uno de los agentes que degrada la calidad física del suelo es la compactación, especialmente bajo agricultura altamente mecanizada. El aumento gradual del tamaño y el peso de los equipos agrícolas ha aumentado de forma concomitante la preocupación por la compactación del suelo (Eduardo *et al.*, 2022). La compactación excesiva del suelo limita los servicios del ecosistema del suelo, incluida la producción de alimentos y piensos, dinámica de C y nutrientes, la aireación del suelo, almacenamiento de agua, el agua disponible para las plantas, la actividad biológica y otros procesos esenciales (Gomez y Rodriguez, 2019).

#### 2.2. Enunciados del problema

En el Perú y Puno el problema está en el desconocimiento del riesgo que trae el uso de tractores de gran tamaño y masa no estando regulado ni recomendado su uso en lugares propensos a esta compactación, la libre importación de tractores nuevos y sobre todo usados representa un riesgo potencial si no se conoce para que actividad están diseñados.

### 2.3. Justificación

Aunque la compactación es un problema bien reconocido, sigue siendo un desafío cuantificar el impacto económico y costos ecológicos de la compactación. La mecanización en la agricultura ha resultado en un aumento constante del peso de vehículos agrícolas. Es razonable suponer que esto ha exacerbado la compactación del suelo, pero hay poco conocimiento cuantitativo sobre el desarrollo de los niveles de compactación en suelos cultivables. Para cuantificar estas tendencias, se puede utilizar registros históricos de los pesos de las máquinas en especial tractores para simular cómo el aumento de peso ha cambiado las tensiones del suelo y la densidad aparente del suelo cultivable, y para predecir los impactos en la resistencia mecánica para el crecimiento de las raíces y en el suelo propiedades hidráulicas (Keller *et al.*, 2019).

El ajuste de la carga por rueda y la presión de inflado de los neumáticos en la maquinaria y el equipo son importantes para evitar una compactación adicional (Moinfar *et al.*, 2022). Por lo tanto, es fundamental evaluar la capacidad de un suelo para ser utilizado para actividades agrícolas, forestales o de pastoreo, buscando los mejores manejos para evitar la degradación del suelo con baja densidad aparente y valores de tensión de precompresión y alta permeabilidad y son altamente susceptibles a la compactación (Eduardo *et al.*, 2022).

La degradación de la estructura del suelo es una reducción del espacio poroso entre los agregados lo conduce a una compactación que limita el almacenamiento o movimiento del aire y el agua del suelo. Existen alternativas poco conocidas que pueden reducir el impacto directo de la compactación como es el uso correcto del tipo de tractor, presión adecuada de neumáticos y velocidades óptimas de operación sobre todo en suelos de textura fina, los resultados del presente trabajo nos permitirá sugerir el tamaño óptimo e ideal para el tipo de suelo típico del altiplano Puneño (Mollisol) así mismo recomendar las características técnicas de operación del tractor para minimizar la degradación del suelo.

Finalmente el uso correcto y racional de la maquinaria representará una alternativa sostenible ya que al reducir su efecto sobre el suelo se reducirá la compactación y se evitara las técnicas costosas de recuperación de suelos degradados, generando consecuentemente un impacto positivo al agricultor.

## 2.4. Objetivos

### 2.4.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la potencia y masa del tractor agrícola, condiciones técnicas y de operación sobre las características físicas del suelo.

### 2.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de los caballos de potencia (hp), presión de inflado de neumáticos en libras por pulgada cuadrada (psi) y velocidad de operación (km/h) sobre la densidad aparente del suelo agrícola ( $\text{g/cm}^3$ ).
- Comparar el efecto de los caballos de potencia (hp), presión de inflado de neumáticos (psi) y velocidad de operación (km/h) sobre la porosidad del suelo agrícola (%).
- Evaluar el efecto de la potencia (hp), presión de inflado de neumáticos (psi) y velocidad de operación (km/h) sobre la resistencia a la penetración del suelo (kPa).
- Relacionar la potencia (hp), presión de inflado de neumáticos (psi) y velocidad de operación (km/h) con la cantidad de microorganismos en el suelo (UFC).

## 2.5. Hipótesis

### 2.5.1. Hipótesis general

La potencia y masa de los tractores agrícolas, condiciones técnicas y de operación afecta en las tres características físicas del suelo y microorganismos.

### 2.5.2. Hipótesis específicas

- La densidad aparente del suelo ( $\text{g/cm}^3$ ) se ve afectado por la potencia en hp, presión de inflado de neumáticos (psi) y velocidad de avance (km/h) de los tractores agrícolas.
- La porosidad total del suelo (%) es influenciado por la potencia, presión de inflado de neumáticos (psi) y velocidad de avance de los tractores agrícolas.



- La resistencia a la penetración del suelo (kPa) es modificado por causa de la potencia, presión de inflado de los neumáticos y velocidad del tractor agrícola.
- La cantidad de microorganismos del suelo (UFC) podría ser afectado por efecto de la potencia, presión de neumáticos y velocidad de los tractores agrícolas.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de estudio

La investigación se llevó a cabo en el Centro Experimental Illpa de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, ubicado en el distrito de Paucarcolla, provincia de Puno, departamento de Puno-Perú. Ubicado geográficamente en la Longitud : 70° 04' 50" Oeste. Latitud : 15° 42' 30" Sur. Altitud: 3 820 msnm. Latitud (Sur) 151447, Longitud (Oeste) 722852, con un clima frígido y seco, correspondiente a la zona agroecológica circunlacustre, con una precipitación pluvial anual de 600- 700 mm, este trabajo fue iniciado en el mes de agosto del 2022 y finalizó en marzo del 2023.

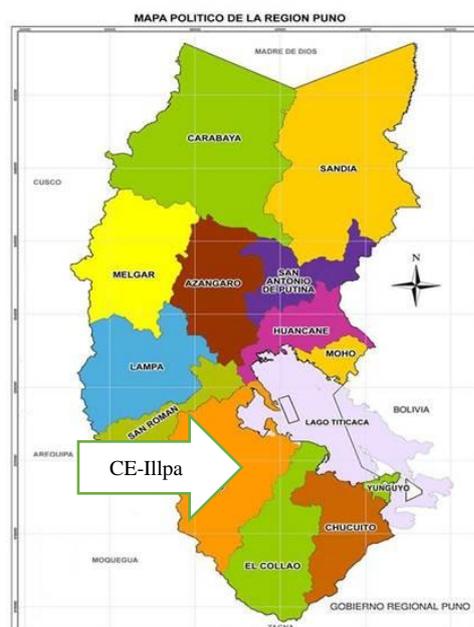


Figura 1. Mapa político de la región Puno

Fuente: Ministerio de Economía y Finanzas

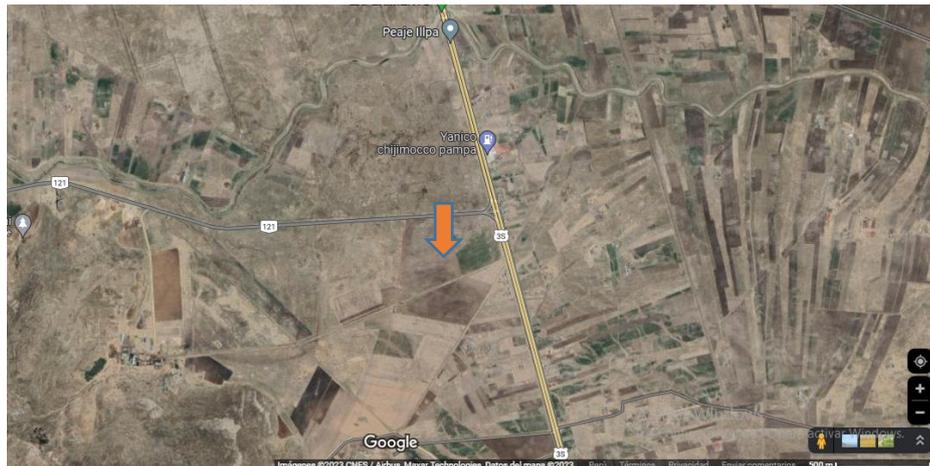


Figura 2. Imagen satelital del CE-Ilpa

Fuente: Google Earth Pro

### 3.2. Población

La población en la investigación estuvo determinada por la cantidad de tractores agrícolas existentes en el Dpto. de Puno, según El Censo del 2014 Puno tiene alrededor de 600 tractores de diversas marcas y modelos. La Universidad Nacional del Altiplano cuenta en la actualidad con más de 15 tractores operativos que son del año 2010 hasta el 2018 como el más nuevo, estos tractores varían de peso y potencia desde 65 a 130 hp, para la realización del presente trabajo se escogió los más representativos que son entre 25, 65 y 98 hp.

### 3.3. Muestra

Dada la naturaleza de la investigación que es experimental, se ha utilizado un diseño de superficies de respuesta modelo Box Behnken (DBB) donde una de los principio es la optimización de recursos donde a criterio del investigador se ha escogido 3 potencias de tractores representativos para poder evaluar sus efectos sobre 4 variables en 15 corridas (N) y poder establecer una relación entre los 3 factores en estudio: potencia, presión de inflado y velocidad (-1) (0) y (+1), donde no aplica el criterio de tamaño de muestra para esta investigación. El número de experimentos (N) requerido para desarrollar un DBB,

$N = 2k(k - 1) + C_0$ , (donde  $k$  es el número de factores y  $C_0$  es el número de puntos centrales) (Ferreira *et al.*, 2007).

### 3.4. Método de investigación

La investigación fue de corte experimental utilizando el diseño de superficies de respuesta modelo Box Behnken con 15 corridas utilizando 3 puntos centrales con valores mínimos y máximos (-1) (0) y (+1) se utilizó el Software STATGRAPHICS centurión.

### 3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

#### 3.5.1. Determinación del efecto de la potencia de los tractores agrícolas, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la densidad aparente del suelo ( $D_a$ ).

Para determinar el efecto de las tres potencias (masas) de tractores siendo el mínimo de 25 hp y el máximo de 98 hp se utilizó tres tractores agrícolas estándar de 4 ruedas motrices con neumático radial R1 cuyo reparto de pesos estáticos fueron de 40% para el eje delantero y 60% para el eje posterior ver Anexo Figura 31, se realizó pruebas de campo en un Mollisol serie Titicaca en rotación de cultivo, se tuvo 3 parcelas experimentales cada una de 200 m<sup>2</sup> (20 m x 10 m), para cada tractor y de éstas, una para cada presión de inflado 15(-1) y 35(+1) en libras por pulgada cuadrada (“Pounds forcé per square inch” psi) este factor se procedió de la siguiente manera, primeramente se inflaron los neumáticos a una presión alta de 35 libras por pulgada cuadrada (psi) y segundo lugar se utilizó las velocidades entre 2 y 5 km/h. las velocidades se escogieron según el rango que tiene todo tractor corroborado por el tacómetro y su equivalencia en el manual de operador,(Figura 33) terminado estas combinaciones de potencia, presión de inflado 35 psi se bajó la presión de los neumáticos a al valor medio 25 (0) psi y finalmente el valor bajo de (-1) 15 psi utilizando un medidor digital de presión Goodyear (Figura 34), donde se tomó muestras de suelo sobre las huellas de la rueda posterior dejadas por cada tractor para determinar la densidad aparente del suelo ( $D_a$ ) en g/cm<sup>3</sup> mediante el método del Hidrómetro tomando un total de 15 muestras que posteriormente se llevaron al laboratorio de suelos del INIA Salcedo.

Para determinar la densidad aparente ( $D_a$ ) se utilizó el método del Hidrometro cuya fórmula es:

$$D_a = \frac{MS}{VT}$$

Donde:

Da : Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

MS : Masa de suelo seco (g)

VT : Volumen total del suelo ( $\text{cm}^3$ )

Dp : Densidad real o de partícula  $2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$

### 3.5.2. Comparación de la potencia de tractores agrícolas, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la porosidad total del suelo (%PT).

Para comparar el efecto de las tres potencias (masas) de tractores siendo el mínimo de 25 hp y el máximo de 98 hp se realizó pruebas de campo en un Mollisol serie Titicaca en rotación de cultivo, se tuvo 3 parcelas experimentales cada una de 20m2 (2mx10m), para cada tractor y de éstas, una para cada presión de inflado 15(-1) y 35 (+1) psi y velocidades 2 y 5 km/h. Donde se tomó muestras de suelo sobre las huellas de la rueda posterior dejadas por cada tractor para determinar la porosidad total del suelo (PT%) mediante el método del Hidrómetro tomando un total de 15 muestras que posteriormente se llevaron al laboratorio de suelos del INIA Salcedo.

La porosidad está íntimamente ligado a la densidad aparente (Da) por tanto

Para determinar la densidad real o de partícula (Dp) se utilizó el método del cilindro cuya fórmula es:

$$Dp = \frac{MS}{VS}$$

Donde:

Dp : Densidad de partícula ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

MS : Masa de suelo seco (g)

VS : Volumen del mismo suelo ( $\text{cm}^3$ ) (Porta *et al.*, 2014).

Para determinar el porcentaje de porosidad total del suelo (%PT) se realizará con las siguientes fórmulas:

$$\%PT = \frac{Dp - Da}{Dp} \times 100$$

**Donde:**

% PT: Porcentaje de porosidad total

Dp: Densidad de partícula ( $2,65\text{g/cm}^3$ ) única para todo el experimento.

Da: Densidad aparente

### **3.5.3. Evaluación de la potencia de tractores agrícolas, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre resistencia a la penetración del suelo (Rp).**

Para evaluar el efecto de las tres potencias (masas) de tractores siendo el mínimo de 25 hp y el máximo de 98 hp se realizó pruebas de campo en un Mollisol serie Titicaca en rotación de cultivo, se tuvo 3 parcelas experimentales cada una de 20m<sup>2</sup> (2mx10m), para cada tractor y de éstas, una para cada presión de inflado 15(-1) y 35(+1) libras por pulgada cuadrada (psi) y velocidades 2 y 5 km/h donde se realizaron las lecturas directas con el penetrometro Spectrum Technologies en libras por pulgada cuadrada (psi) que posteriormente se transformaron kPa, la forma de realizar fue justo en la huella del tractor posterior a su desplazamiento realizando un total de 3 lecturas a cada metro.



*Figura 3.* Forma de medir la resistencia a la penetración en libras por pulgada cuadrada (psi) con penetrometro



*Figura 4.* Escalas de compactación del suelo en el penetrometro Spectrum Technologies

#### **3.5.4. Relación de la potencia de tractores agrícolas, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la cantidad de microorganismos del suelo (UFC).**

Para relacionar los efectos de las tres potencias (masas) de tractores siendo el mínimo de 25 hp y el máximo de 98 hp se realizó pruebas de campo en un Mollisol serie Titicaca en rotación de cultivo de avena , Se colectaron 500 g a partir de 5 puntos de muestreo en forma de X por cada parcela de  $5 \times 5$  m, con una profundidad de 15 cm (para el análisis microbiológico) y las muestras compuestas así obtenidas se uniformizaron para representar al campo inicial, luego se enfrascaron herméticamente y se transportaron, hasta el laboratorio de análisis. Para contrarrestar el efecto de la heterogeneidad del suelo, se marcó cada punto de muestreo inicial para la colecta final después de 5 meses tomando 15 sub muestras para su análisis final y conteo de microorganismos en unidades formadoras de colonias (UFC) presentes en el suelo después de haber sido compactado por las tres potencias (masas) de tractores haciendo un total de 15 submuestras, los cuales se llevaron al Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNA Puno y los resultados se muestran en el Anexo Tabla 25 .los que representan a cada potencia de tractor, presión de inflado de neumático y velocidad de avance. En cada muestra se realizó el recuento de bacterias, hongos y actinomicetos usando la técnica de diluciones seriadas y siembra en profundidad con 20 ml de medio agarizado en

placa de Petri. Se expresaron en unidades formadoras de colonia por gramo de suelo seco (UFC/g de suelo) (Tofiño *et al.*, 2020).



Figura 5. Muestra de suelo envasado para análisis microbiológico en laboratorio

### Observaciones:

Determinación de área de contacto rueda-suelo

“Para la determinación de la presión media específica sobre el suelo del sistema de rodaje de los tractores, se calculó el área de contacto de las ruedas delanteras y traseras para todas las variantes estudiadas”, conforme a la metodología propuesta por. (Alfonso *et al.*, 2009).

El área de contacto de cada neumático con el suelo es aproximadamente de forma elíptica y se calcula por medio de la ecuación 1:

$$A \approx 0.78 * a * b$$

Donde: A= área de contacto del neumático sobre el suelo;

a= ancho del área de contacto del neumático;

b= largo del área de contacto del neumático;

0.78= coeficiente de corrección.

A fin de conocer la masa por unidad de área que descansa sobre el suelo a medida que pasa el tractor por el campo de cultivo, se utilizó la ecuación 2:

$P_{trac} = W / (A_t \cdot 2)$  Donde:

$P_{trac}$  = presión media específica del tractor sobre el suelo durante el tránsito rodado;

$W$  = masa del tractor con contrapesos y líquido en los neumáticos;

$A_t$  = superficie total de apoyo sobre el suelo de cultivo, de las ruedas delanteras y traseras calculada con ayuda de la ecuación 1.

En la Tabla 24 en el anexo se muestra las marcas, características técnicas de los 3 tractores en estudio, según su ficha técnica con sus contrapesos originales sin lastre adicional (agua), así como la masa de los implementos utilizados en el experimento.

Humedad del suelo

La humedad promedio del suelo al inicio del experimento fue del 22%. Determinado en el laboratorio de suelos del INIA Salcedo-Puno.

### 3.5.5. Diseño experimental

El tipo de investigación es aplicada con enfoque cuantitativo a nivel experimental en el presente trabajo de investigación, se usó el diseño de superficies de respuesta modelo Box-Behnken de tres factores (F1 Potencia, F2 presión de inflado y F3 velocidad de avance), y las variables dependientes (densidad aparente, porosidad, resistencia a la Penetración y microorganismos), cuyo modelo de regresión de segundo grado, se expresa como sigue:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \beta_4 X_{i1}^2 + \beta_5 X_{i2}^2 + \beta_6 X_{i3}^2 + \beta_7 X_{i1} X_{i2} + \beta_8 X_{i1} X_{i3} + \beta_9 X_{i2} X_{i3}$$

**Donde:**

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_9$  son parámetros estimados del modelo.

$X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{i3}$  son variables independientes o factores en estudio.

$Y_i$  es la variable de respuesta, con un  $\alpha$  0.05

Variabes en Estudio

Variabes Independientes

### **Potencias de Tractor.**

T1 – Tractor Mitsubishi de 25 hp baja (25.0 hp)

T2 – Tractor New Holland de 65 hp media (61.5 hp)

T3 – Tractor New Holland de 98 hp alto (98.0 hp)

### **Presión de Inflado de neumáticos del tractor.**

P1 – Presión baja 15.0 psi

P2 – Presión media 25.0 psi

P3 – Presión alta 35.0 psi

### **Velocidad de operación del tractor.**

V1 – Velocidad baja 2,0 km/h.

V2 – Velocidad media 3.5 km/h.

V3 – Velocidad alta 5,0 km/h.

### **VARIABLES DEPENDIENTES**

Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )

Porosidad (%) Transformado a valores angulares

Resistencia a la penetración Libra por pulgada cuadrada (PSI, kilo pascales: kPa; y  $\text{kg/cm}^2$ )

Microorganismos (UFC)

Variables de intervinientes:

Humedad del suelo. 22%

$D_p$  :  $2,65 \text{ g/cm}^3$ .

Clase textural del suelo. Franco limoso

Presión atmosférica. 1020 mbar en Puno

Tabla de recolección de datos.

NOTA: ver Anexo Tabla 22 detalle de toma de datos.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Efecto de la potencia, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la densidad aparente del suelo agrícola

Tabla 3  
*Análisis de Varianza para densidad aparente*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Potencia	0,03645	1	0,03645	273,37	<b>0,0036</b>
B:Presion de inflado	0,0105125	1	0,0105125	78,84	<b>0,0124</b>
C:Velocidad de avance	0,0120125	1	0,0120125	90,09	<b>0,0109</b>
AA	0,00065641	1	0,00065641	4,92	0,1567
AB	0,000025	1	0,000025	0,19	0,7072
AC	0,060025	1	0,060025	450,19	<b>0,0022</b>
BB	0,0293564	1	0,0293564	220,17	<b>0,0045</b>
BC	0,0441	1	0,0441	330,75	<b>0,0030</b>
CC	0,0129256	1	0,0129256	96,94	<b>0,0102</b>
Falta de ajuste	0,019325	3	0,00644167	48,31	0,0203
Error puro	0,000266667	2	0,000133333		
Total (corr.)	0,224373	14			

Densidad aparente se analizó en piezas separadas para cada uno de los efectos. Donde se comparó su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 7 efectos tienen un valor-P < 0,05 indicando que son significativamente  $\neq$  de 0 con un nivel de confianza del 95,0%. Siendo el factor individual de mayor importancia los caballos de potencia (hp) siendo el tractor de 98 hp como el que causa el mayor incremento de la densidad aparente (Da) en el suelo y el de menor es el tractor de 25 hp, en cuanto a las presiones de inflado vemos que ocupa el segundo lugar de importancia interactuando con la velocidad donde 16,9 libras por pulgada cuadrada de presión (psi) con 2,0 km/h como

el valor óptimo para la conservación de la Da del suelo. Según tabla 3 ANOVA y figura 06.

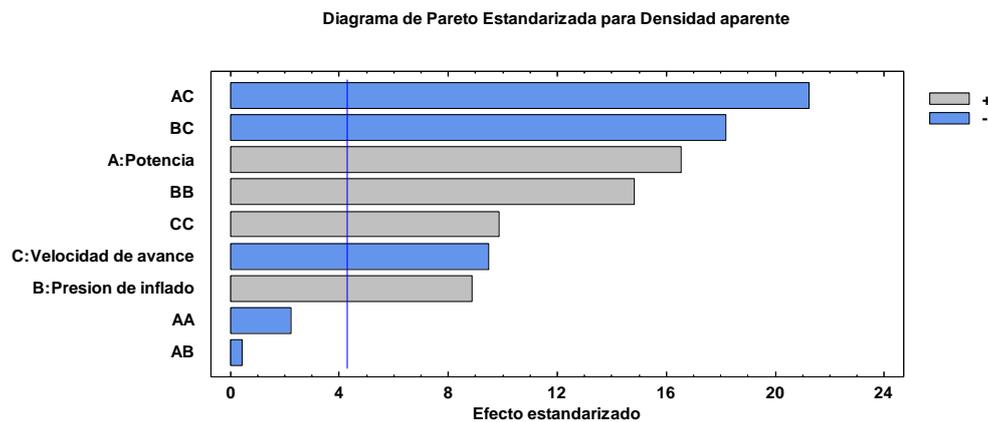


Figura 6. Diagrama de Pareto para densidad aparente.

En el diagrama de Pareto podemos observar que la interacción potencia-velocidad tienen el mayor efecto estandarizado sobre la Da del suelo considerando su mayor incidencia sobre el suelo, además de poder apreciar que la presión de inflado tuvo un menor efecto sobre la Da donde se tuvo valores de 1,99 y 1,93 g/cm<sup>3</sup> como máximos de la Da para las potencias 65 y 98 hp, mientras que la Da más baja se registró con el tractor de 25 hp más una presión de inflado de neumático de 25 psi con 1,54 g/cm<sup>3</sup> y una velocidad promedio de 3,5 km/h siendo esta la más baja, en cuanto a las potencias 65 y 98 hp técnicamente se mayor efecto se debe al peso o masa del tractor que ejerce una presión sobre el suelo, teniendo este una humedad promedio de 22% siendo el tractor de 98 hp el más propenso a la compactación del suelo, sin embargo la masa de los tractores de 65 hp fue de 2 300 kg y de 98 hp de 4 200 kg. Además de estos resultados según Rubio (2010) los límites críticos para la Da pueden ser de 1,65 g/cm<sup>3</sup> para un suelo franco limoso, en la presente investigación se registró valores de Da para un tractor de 98 hp de 1,93 g/cm<sup>3</sup> superando el valor crítico que impediría un normal crecimiento radicular de las plantas figura 6.

Al respecto Gil (2016), menciona que la presión externa originada por la acción mecánica de las máquinas que transitan sobre el terreno ocasionan un aumento de la densidad aparente del suelo.

Sheludchenko *et al.* (2022), manifiesta que durante los últimos años se han incrementado el tamaño de los tractores y sus usos en la agricultura, ocasionando alteraciones en las propiedades físicas del suelo como la  $D_a$  que no es otra cosa que la relación del peso del suelo respecto a su volumen, relación aire-suelo, estas alteraciones se producen por el efecto de la rueda contra el suelo reduciendo el espacio poroso y bajando su productividad.

González *et al.* (2012), señala que los primeros 15 cm del suelo son los que se compactan con mayor rapidez con la carga del tractor y tiene mucho que ver la presión de inflado en este proceso que no es uniforme, lo que explicaría también lo encontrado en el presente trabajo donde la  $D_a$  es también diferente significativamente para los tratamientos con niveles de presión de inflado expresado en libras por pulgada cuadrada (psi) donde podemos ver que el valor máximo observado para el tratamiento de 35 psi como (+1) registró  $1,99 \text{ g/cm}^3$  donde podemos inferir que a mayor rigidez del neumático es mayor la presión que ejerce sobre el suelo, también podemos atribuir a un menor área de contacto del neumático.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo son corroborados por Peralta quien reporto haber encontrado que la densidad aparente del suelo hasta una profundidad de 0 – 0,20 m. puede ser influenciada por el uso de la maquinaria agrícola en sus diversas formas los cuales afectan con una probabilidad;  $P < 0,0001$ ; reduciendo en un -4,3 % en promedio es decir  $0,06 \text{ Mg/m}^3$  menos, llegando hasta  $0,19 \text{ Mg/m}^3$  (Peralta *et al.*, 2021).

Las zonas de giro o cabeceras en los campos de cultivo presentaron los más altos valores de  $D_a$   $1,33 \text{ g/cm}^3$  y las áreas dentro del campo tenían  $D_a$  bajas con  $1,27 \text{ g/cm}^3$  ocasionadas por el tráfico de un tractor a una profundidad de suelo de 0–250 mm (Ward *et al.*, 2021), estos resultados corroboran la hipótesis de que el peso o masa del tractor influye en la  $D_a$  del suelo ya que el experimento en mención se trabajó con un tractor que tenía una carga por eje de 50 kN y que posteriormente se incrementó desde 90 hasta 120 kN por eje y rueda durante los últimos 6 años, los resultados de  $D_a$  que se obtuvo en el presente trabajo confirma el efecto de la masa del tractor expresado en hp donde el tractor de 98 hp con 4300 kg de masa (42,16 kN) ( $1,93 \text{ g/cm}^3$ ) ejerce una presión estática de  $1,487 \text{ kg/cm}^2$  el cual es superior al de 65 hp y mucho más que el de 25 hp con solo  $1,247 \text{ kg/cm}^2$ .

Según los datos de densidad aparente del suelo mostraron por varios autores quienes señalan a la carga sobre los ejes del tractor como causante principal de una severa degradación física del suelo con grados de compactación del 94 % y 99 %, lo que produciría un entorno físico del suelo deficiente para el desarrollo de las raíces del cultivo (Rucks *et al.*, 2004).

No obstante Phakdee y Suvanjumrat (2023), manifiestan que “el neumático del tractor que tenga la banda de rodadura más superficial y el área de contacto más amplia 200 mm, produjo los valores más bajos de densidad aparente del suelo en las capas superficiales y subterráneas. En la prueba de tracción, produjo la densidad aparente del suelo más baja en ambas áreas de muestreo al principio y al final de las huellas de los neumáticos”. Estos hacen suponer que la interface rueda-suelo es favorecida al tener más grande la superficie de contacto, similar a los datos técnicos del tractor de 25 hp que tenía un ancho de banda de rodadura de 280 mm.

Tabla 4

*Coefficiente de regresión para densidad aparente*

<b>Coefficiente</b>	<b>Estimado</b>
Constante	1,29965
A:Potencia	0,0110826
B:Presion de inflado	-0,0160371
C:Velocidad de avance	0,102695
AA	-0,0000100081
AB	-0,00000684932
AC	-0,00223744
BB	0,000891667
BC	-0,007
CC	0,0262963

Los coeficientes de regresión muestran que existe una correlación ligera positiva entre la potencia y la densidad aparente donde a medida que se aumenta la potencia (masa del tractor) la densidad aparente se incrementa, por el contrario al subir o aumentar la presión de inflado de los neumáticos del tractor la Da ligeramente decrece (-0,01604) mientras que velocidad de avance del tractor aumenta la Da también se incrementa, corroborado por, Moinfar *et al.* (2022) donde menciona que si aumentamos la velocidad aumenta el deslizamiento, que está relacionado con el modo four well drive (FWD), el aumento de la velocidad no puede evitar la compactación del suelo. Debido a que la velocidad de

desplazamiento no puede aumentar sin un aumento del deslizamiento, aumentar la velocidad conduce a un mayor deslizamiento y compactación del suelo, según tabla 4.

Los resultados de Cerda *et al.* (2021) corroboran nuestros resultados donde menciona a la densidad aparente del suelo como uno de los factores más importantes para indicador la degradación de la tierra, desde 2007 al 2020 observo en cítricos en España un aumento en la densidad aparente del suelo de 1,05 g cm<sup>-3</sup> a 1,33 g cm<sup>-3</sup>. Los cambios en la densidad aparente del suelo fueron más en el centro de la banda de rodadura como resultado de la compactación debido al paso de la maquinaria.

Finalmente para este objetivo podemos decir que la densidad aparente es un factor importantísimo y confiable para medir la compactación del suelo causado por el tráfico del tractor, los valores que se muestran para el tractor de 25 hp están muy por debajo de los límites máximos que perjudicarían drásticamente el desarrollo radicular de las plantas (Lamichhane *et al.*, 2021).

Tabla 5  
*Optimizar Respuesta densidad aparente*

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
Potencia	25,0	98,0	25,001
Presión Inflado	15,0	35,0	16,934
Velocidad	2,0	5,0	2,0

Meta: minimizar densidad aparente

Valor óptimo = 1,513

Según lo que podemos observar en la optimización se muestra el valor óptimo para densidad aparente con un valor 1,513 g/cm<sup>3</sup> que se lograría con una potencia de 25,001 hp con una presión de inflado de neumático de 16,454 libras por pulgada cuadrada (psi) y una velocidad de avance de 2 km/h, estos nos sugieren que para reducir al máximo la compactación del suelo se debe de evitar el uso excesivo de maquinaria agrícola pesada ya que los reportes sobre el tema el 99% manifiesta que la carga sobre los ejes es la principal causa de deterioro de la estructura del suelo principalmente de la densidad aparente (Da), estas afirmaciones son corroboradas por Tamirat *et al.* (2022), quien manifiesta que se debe buscar maquinaria liviana, practica y efectiva energéticamente, el

tractor que cumpliría estos requisitos sería el de 25 hp con una masa de 1000 kg que es especialmente diseñado para fincas pequeñas de hasta 25 hectáreas según la FAO índice de mecanización para el Perú como país emergente 1 hp/ha, tabla 5.

Tabla 6

*Camino de máximo ascenso para densidad aparente (Da)*

Potencia (hp)	Presión (psi)Inflado	Velocidad (km/h)	Predicción densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
61,5	22,5	3,5	1,67667
68,1615	23,5	3,26303	1,70824
72,728	24,5	3,01783	1,75165
76,5158	25,5	2,77641	1,80757
79,8943	26,5	2,53927	1,87582
83,0186	27,5	2,30582	1,95621

Los estimados según el trayecto de máximo ascenso, desde el centro de la región experimental (61,5 hp, 25,0 psi y 3,5 km/h), a través del cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales en este caso la presión de inflado que aumentamos en un punto, nos proporciona valores con buenas características para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo fuese reducir la densidad aparente. Actualmente, 6 puntos se han generado cambiando presión inflado en incrementos de 1,0 psi. Puede verse que la relación es directa a mayor presión el neumático presiona con más rigidez el suelo sobre todo en la parte central ocasionando una compactación del suelo, según la tabla 6.

Tabla 7

*Camino de máximo ascenso para densidad aparente cambiando la potencia en 10 puntos (10hp)*

Potencia (hp)	Presión Inflado (psi)	Velocidad (km/h)	Predicción densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
61,5	22,5	3,5	1,67667
71,5	24,2096	3,09012	1,73762
81,5	27,01	2,42201	1,91489
91,5	30,5012	1,62479	2,26792
101,5	34,4026	0,761791	2,82954
111,5	38,5657	-0,139076	3,6186

En el camino de máximo ascenso desde el centro de la región experimental actual (61,5 hp, 22,5 psi y 3,5 km/h), a través del cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales indicando buenas características

para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo fuese incrementar la densidad aparente. Se han proyectado 6 puntos cambiando potencia en incrementos de 10,0 hp. Puede verse claramente el incremento de la Da del suelo es grave superando valores de la densidad real de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , observado en la tabla 7.

Tabla 8

*Camino de máximo descenso para densidad aparente cambiando velocidad en 0,5 km/h*

Potencia (hp)	Presión Inflado (psi)	Velocidad (km/h)	Predicción densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )
61,5	22,5	3,5	1,677
81,168	21,931	4,0	1,681
83,696	23,029	4,5	1,662
96,733	24,272	5,0	1,619
113,367	25,349	5,5	1,539
130,984	26,364	6,0	1,417

En el camino de máximo descenso este es el trayecto desde el centro de la región experimental (61,5 hp, 22,5 psi y 3,5 km/h), donde la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio mayor en los factores experimentales de velocidad de avance en un incremento de 0,5 km/h indicando buenas características para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo fuese decrementar la densidad aparente del suelo. Se han estimado 6 puntos cambiando velocidad en incrementos de 0,5 km/h, donde podemos apreciar que con un tractor 131 hp a una presión de inflado de 26 libras por pulgada cuadrada (psi) y una velocidad de 6 km/h se lograría un decremento de  $1,41 \text{ g/cm}^3$  siendo la reducción en  $0,26 \text{ g/cm}^3$ , observado en la tabla 8.

En la actualidad la agricultura moderna fabrica tractores de más 130 hp con una masa que superan los 10 000 kg sin embargo trabajan a velocidades mayores de 6 km/h y con neumáticos con muy baja presión de inflado 15 libras (psi) lo que conseguiría mantener los valores de Da bajos y no poner en riesgo el suelo.

La densidad aparente del suelo (Da) está íntimamente ligado a la porosidad total y a la resistencia a la penetración (Domínguez *et al.*, 2018).

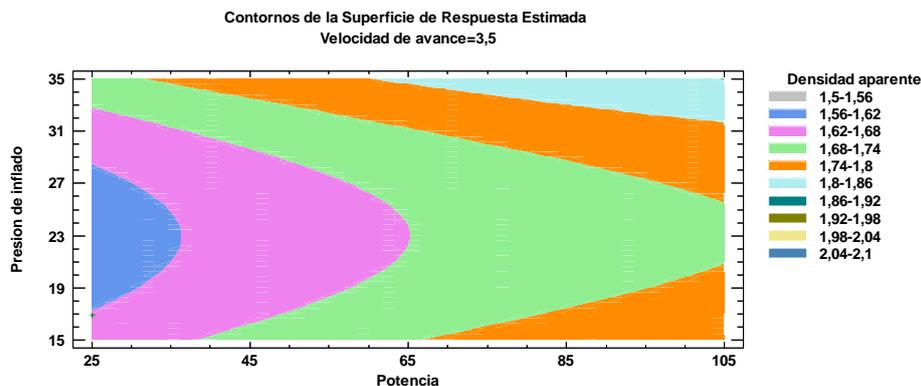


Figura 7. Contornos de la superficie de respuesta estimada con una velocidad de avance de 3,5 km/h

En el gráfico de contornos superficie de respuesta podemos apreciar las curvas de densidad aparente estimada ( $D_a$ ) como valores más bajos a  $1,62 \text{ g/cm}^3$  que corresponde a un tractor de 25 hp y  $1,8 \text{ g/cm}^3$  para tractores que superen 85 hp podemos inferir que mayores potencias y presiones de inflado la  $D_a$  se incrementa acercándose a la densidad real o de partícula que es de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  como valor máximo del suelo, figura 7.

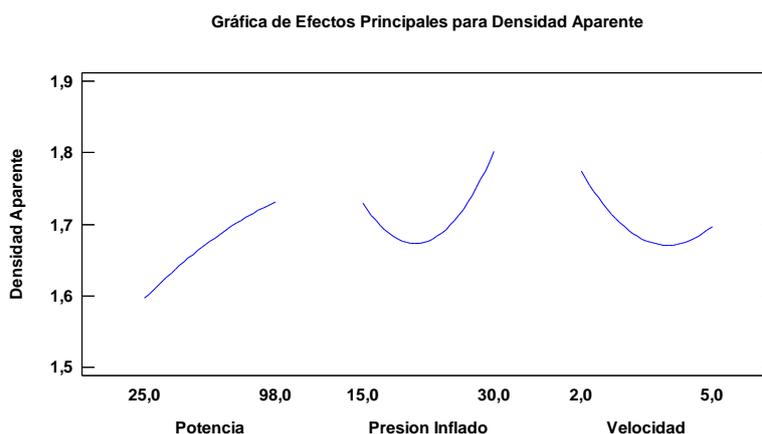


Figura 8. Efectos principales para densidad aparente del suelo

En la gráfica de efectos principales para densidad aparente podemos observar el efecto de los tres factores en estudio potencia del tractor, presión de inflado del neumático y velocidad de avance del tractor sobre la densidad aparente del suelo ( $D_a$ ) vemos el efecto lineal que tiene la potencia que se traduce en masa o peso del tractor y el efecto que tiene

sobre la densidad aparente siendo el principal factor para compactar el suelo y reducir la densidad teniendo un incremento desde  $1,6 \text{ g/cm}^3$  tractor 25 hp, hasta llegar a valore de  $1,7 \text{ g/cm}^3$  para tractores de 98 a más hp de potencia, la presión de inflado tiene un comportamiento inverso es decir una curva donde la Da inicial  $1,7 \text{ g/cm}^3$  con un ligero descenso cuando la presión de inflado esta entre 20 PSI, pasada esta presión la Da se eleva a valores superiores a  $1,8 \text{ g/cm}^3$  lo cual concuerda con lo reportado por Raper (2005) donde evaluó presiones de inflado( 41 a 121 kPa) donde ha mayor presión de inflado las alteraciones negativas se dan en el centro de la huella y a menores presiones de inflado en los contornos, figura 8.

De similar manera para el efecto de la velocidad podemos ver como la Da inicia con un valor de  $1,7 \text{ g/cm}^3$  para 2 km/h, teniendo un descenso en la Da a medida que se aumenta la velocidad 3,5 km/h pasado este valor la Da tiene un ligero ascenso básicamente al efecto del deslizamiento que ocasiona una mayor compactación del suelo.

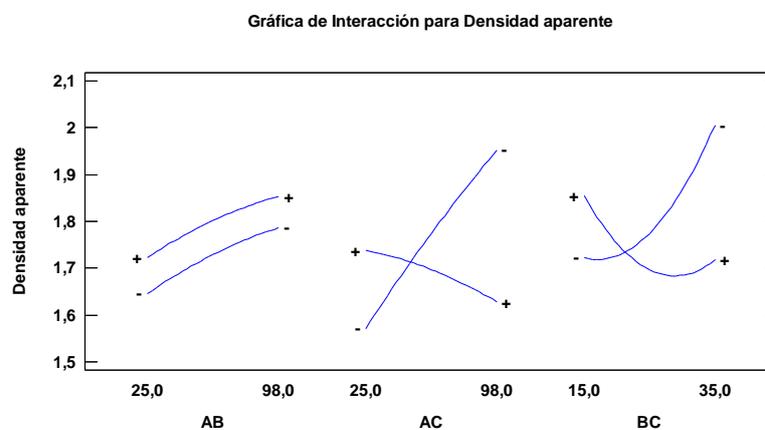


Figura 9. Interacciones de los factores sobre la densidad aparente del suelo

En la gráfica de interacciones podemos observar el comportamiento de la potencia-presión de inflado donde se confirma el efecto que tienen sobre la densidad aparente (Da) donde la potencia que es la masa del tractor y la presión de inflado que es el área de contacto y rigidez del neumático relación rueda-suelo es positivo es decir que entre ambos factores afectan de manera más significativa la Da del suelo acercándolos a valores que restringirían el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Sivarajan *et al.*, 2018), figura 9.

Los resultados hallados en el presente trabajo concuerdan con lo manifestado por González *et al.* (2012) donde manifiesta que la presión de inflado y la presión sobre el suelo (masa del tractor) influyen sólo en los primeros 15 cm de la capa superficial, a partir de esta profundidad las presiones verticales son resultado sólo de la carga sobre el eje.

En cuanto a la interacción potencia-velocidad podemos observar que a mayores potencias implica mayores cargas sobre los ejes del tractor el hecho de tener más potencia significa mayor tamaño, masa o peso, carga sobre los ejes y estos sobre los neumáticos los cuales deterioran la estructura del suelo principalmente en aquellos de textura fina.

La interacción presión de inflado-velocidad según la figura 1 es el segundo en el orden de relevancia sobre la  $D_a$  la presión de inflado es un factor sumamente importante por que determina el área de contacto en la relación rueda-suelo y la rigidez de este como único elemento de unión del tractor con el suelo, al respecto Taghavifar y Mardani (2014), manifiesta que el mayor hundimiento del suelo obtenido fue de 62,91 mm para carga por rueda de 3 kN, (305,91 kg) a 0,5 m/s (1,8 km/h) y en el tercer paso de la rueda, estos datos son similares es decir la velocidad más baja en el presente estudio fue de 2 km/h y una presión de inflado alta 35 libras por pulgada cuadrada (psi) tienen un efecto directo sobre la  $D_a$  incrementándolo de manera significativa.

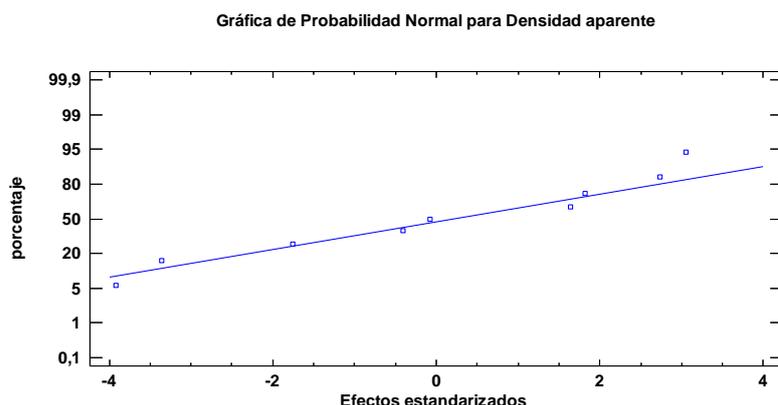


Figura 10. Probabilidad Normal para densidad aparente.

En la gráfica de probabilidad normal podemos observar donde los datos son muestras aleatorias de una distribución normal, donde están muy cerca de la línea recta. Aceptando la hipótesis donde los factores en estudio afectan la densidad aparente del suelo, figura 10.

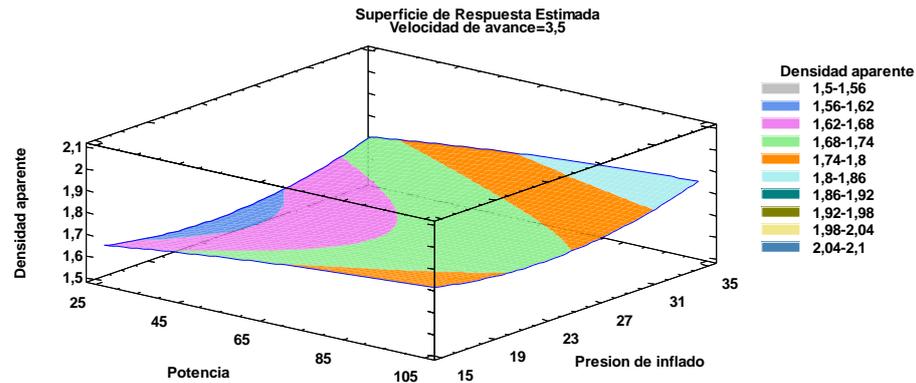


Figura 11. Superficie de respuesta estimada a una velocidad media de 3,5 km/h

En la gráfica de superficie de respuesta podemos observar el comportamiento de la densidad aparente ( $D_a$ ) del suelo frente a los tres factores en estudio existiendo curvatura donde la potencia que se traduce a la masa del tractor ejerce un impacto directo sobre el suelo a través de una curva muy ligera positiva donde a mayor presión estática del tractor es mayor el incremento de la  $D_a$ , sin embargo en presión de inflado se puede apreciar una curva donde a mayores presiones de inflado 35 psi la  $D_a$  del suelo puede incrementarse hasta  $2,1 \text{ g/cm}^3$ , figura 11.

#### 4.2. Evaluación de la potencia, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la porosidad del suelo agrícola

De acuerdo al ANVA de evaluación de la porosidad podemos observar que 7 efectos tienen un valor- $P < 0.05$  los cuales son significativamente  $\neq 0$  con un nivel de confianza del 95,0%. Donde apreciamos que el valor  $P$  más bajo es el de potencia con **0,0018** que es estadísticamente diferente y superior a las demás corridas, la potencia alta del tractor (+1) 98 hp es de similar manera que en la  $D_a$  es el factor que más deterioro o redujo la porosidad en el suelo, comparándose con el tractor de 25 hp (-1), la falta de ajuste resulto significativo lo que nos indica que el modelo no es el más adecuado para evaluar la porosidad del suelo, tabla 9.

Tabla 9  
*Análisis de varianza para porosidad*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Potencia	36,5085	1	36,5085	540,87	<b>0,0018</b>
B:Presion inflado	0,577813	1	0,577813	8,56	0,0997
C:Velocidad	6,9192	1	6,9192	102,51	<b>0,0096</b>
AA	0,302544	1	0,302544	4,48	0,1685
AB	5,78402	1	5,78402	85,69	<b>0,0115</b>
AC	31,2481	1	31,2481	462,93	<b>0,0022</b>
BB	25,6609	1	25,6609	380,16	<b>0,0026</b>
BC	24,3049	1	24,3049	360,07	<b>0,0028</b>
CC	2,41505	1	2,41505	35,78	<b>0,0268</b>
Falta de ajuste	5,49992	3	1,83331	27,16	<b>0,0357</b>
Error puro	0,135	2	0,0675		
Total (corr.)	138,008	14			

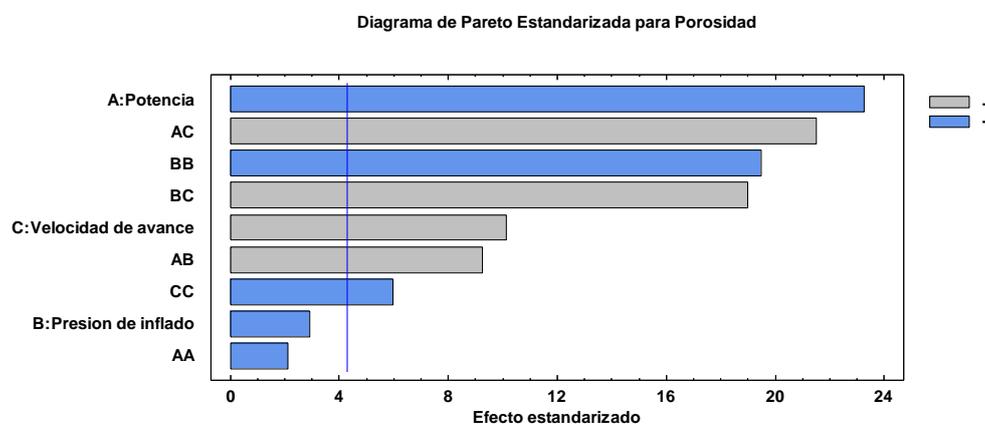


Figura 12. Diagrama de Pareto estandarizado para porosidad

En el diagrama de Pareto podemos observar que la potencia del tractor sigue siendo el factor más relevante para la porosidad del suelo y el factor presión de inflado por sí solo ocupa el quinto lugar en importancia y significancia a un nivel del 5% de confianza, mientras que la interacción potencia-velocidad ocupa el segundo lugar de importancia seguido de la interacción presión-velocidad, figura 12.

La pérdida de porosidad del suelo no solo se da por la acción de las máquinas, el simple pisoteo del ganado puede compactar el suelo cuando este está en condiciones húmedas

superiores 30% afectando el normal movimiento del agua y presencia de aire hasta un punto de cero porosidad.

En la tabla 10 podemos observar la diferencia mínima en cuanto a la presión estática de un tractor cuando está parado, donde debido al ancho mayor del neumático del tractor de 98 hp 48cm y el de 25 hp con 17 cm lo que hace que sean diferentes en cuanto a la presión estática 1,487 kg/cm<sup>2</sup> versus 1,246 g/cm<sup>2</sup> para el tractor de 25 hp.

Tabla 10  
*Datos técnicos de los tractores en estudio.*

Datos técnicos	98hp	65hp	25hp
Tipo	4X4 NHTD95PLUS	4X4 TT65	4X4 MT25
Masa total	5226 kg.	3032 kg.	1160 kg
Presión estática del tractor	1,487 kg/cm <sup>2</sup>	1,289 kg/cm <sup>2</sup>	1,246 kg/cm <sup>2</sup>

Al respecto de la porosidad Domínguez *et al.* (2018) manifiesta que la densidad aparente del suelo (Da) está íntimamente ligado a la porosidad total observando esto en dos tipos de suelos los resultados muestran una correlación lineal altamente significativa entre el método de densidad volumétrica y resistencia a la penetración, así como, entre la resistencia a la penetración y la porosidad total para ambos tipos de suelos. Por lo que podemos inferir que la porosidad total del suelo es afectada directamente por la potencia del tractor, que en este caso es la masa del tractor que ejerce una presión al suelo a través de sus neumáticos, la potencia de 98 hp (+1) como valor máximo presento una masa de 4300 kg. Más un arado de 4 discos con una masa de 926 kg. Haciendo una masa total de 5226kg. Según la tabla 24 las cargas están repartidas por ejes, 60% eje posterior y 40% eje frontal típico para un tractor estándar doble tracción, hace que el eje posterior tenga una carga de 3135 kg. Y una presión estática de rueda posterior de 1,361 kg/cm<sup>2</sup> que es muy superior al del tractor de 25 hp que tiene una presión estática de rueda posterior de 0,88 kg/cm<sup>2</sup>, con estos datos técnicos considerando que se trabajó con neumáticos radiales al 70 y 95% de vida útil (semi-nuevo) el área de contacto del neumático que apoya en el suelo es la interfaz neumático-suelo fue de 2 304 cm<sup>2</sup> para 98 hp, 1 764 cm<sup>2</sup> para 61,5 hp y 784 cm<sup>2</sup> para 25 hp con lo que originó una presión estática diferente para cada tractor siendo mayor el de 98 hp y menor el de 25 hp. Esto justificaría que el tamaño de los neumáticos determina el área de contacto, tal como lo manifiesta Gil, (2016) que la compactación es el resultado de la acción mecánica de las máquinas y se traduce por

una reducción de la porosidad (o por un aumento de la densidad) bajo el efecto de una presión exterior.

El paso de la maquinaria agrícola altera muy especialmente la estructura del suelo, se interrumpe la relación agua-aire del suelo con cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo y por eso se busca mejorar el funcionamiento de la maquinaria agrícola con ruedas (Sheludchenko *et al.*, 2022).

De similar manera en Colombia se realizó el trabajo de compactación como causa más comunes de la degradación del suelo, donde se observó un incremento potencial de los niveles de compactación del suelo debido al elevado peso de los tractores y maquinaria utilizada en forma imprudente causando altas presiones superficial sobre el suelo, los que redujeron los macroporos del suelo (Torres *et al.*, 2017).

En un estudio realizado en China sobre la macroporosidad y sus cambios a consecuencia del paso de la maquinaria pesada mostró una tendencia decreciente con el aumento del grado de compactación, la densidad aparente cambio de 1,30 g·cm<sup>-3</sup> a 1,70 g·cm<sup>-3</sup>, aumentando el grado de compactación y los poros del suelo se volvieron más regulares, además los macroporos del suelo disminuyó de 2,80 a 2,32 % con el aumento de la densidad aparente (Liu *et al.*, 2023).

Como se puede ver en la gráfica de efectos principales la correlación es inversamente proporcional, a mayores masas o pesos sobre los ejes y ruedas de la maquinaria es menor la porosidad, de ahí la preocupación en los profesionales en reducir estos impactos sobre esta propiedad que es tan importante en el suelo, ya que gracias a ella existe la humedad e infiltración. “Se considera que la compactación por tránsito está asociada con un serio deterioro de la estructura de los suelos debido a la pérdida de su porosidad”, figura 13.

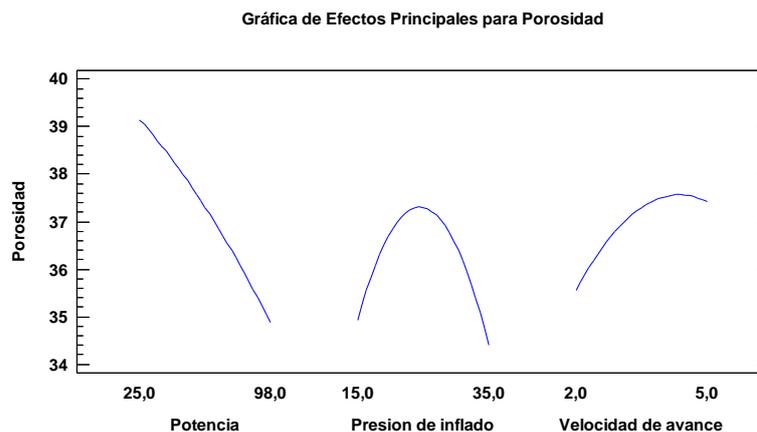


Figura 13. Grafica de efectos principales para porosidad

Tanto la densidad aparente y la porosidad son considerados como un factor confiable para evaluar la compactación, donde el peso de los equipos utilizados 6,5–8 Mg (6500 kg a 8000kg) y ancho de neumático (0,70 m), anchuras de trabajo (3 m) y presión de inflado 70 kPa, - 10,15 libras por pulgada cuadrada (psi) cosechadoras con masas de 15 Mg. ( 15000 kg.) con una alta presión de inflado 200-300 kPa,(29 – 44 psi) representan datos muy interesantes donde la disminución es considerable en la porosidad del suelo y pueden ser utilizados a futuro (Lamichhane *et al.*, 2021).

“La densidad aparente de  $1,4 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$  era un punto crítico que afectaba las propiedades de los macroporos y luego afectaba las propiedades hidráulicas del suelo, y se deben llevar a cabo algunas medidas de recuperación del suelo para hacer que la densidad aparente sea  $< 1,4 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$ ”(Liu *et al.*, 2023).

En la caso de la presión de inflado podemos ver que la curva que se origina en un inicio es negativa es decir cuando incrementamos las libras de presión (psi) de los neumáticos el porcentaje de porosidad disminuye acercándose a valores críticos que podrían perjudicar el desarrollo de las plantas, el análisis de suelo para el presente trabajo nos muestra los valores expresados en porcentaje (%) Anexo tabla 22 donde podemos ver que el resultado del suelo sin perturbar tiene una porosidad de 49% muy cercano al suelo ideal según la FAO (2023), sin embargo podemos apreciar que a medida que es sometido a estas cargas externas la porosidad, espacios vacíos que son los macroporos se pierden entonces los valores registrados para la presión de inflado 15(-) 35(+1) psi muestran diferencias significativas donde la presión de inflado por si sola está en el quinto lugar pero en interacción si es importante, se ha registrado con las presiones (psi) de 15 a 22,5

los valores más altos de porosidad (40,33 %), mientras que la presión de 35 PSI tiene los valores más bajos de porosidad expresado en porcentaje (29,93 %), a lo que podríamos señalar que una baja presión inflado garantizaría un correcto funcionamiento del equipo y se necesario saber el peso del tractor e implemento para poder determinar la presión adecuada, no solo reducir la compactación si no evitar el exceso de patinamiento y si fuese el caso lastrar con agua para alcanzar el valor óptimo.

En China se estudió la labranza cero (NT) y labranza convencional (LC) para poder observar cambios en la porosidad total del suelo, donde se trabajó con una cosechadora de 10000 kg de masa (10 Mg.) a una presión de inflado de neumáticos de 420 kPa (60,916 psi) en un Mollisol franco arcilloso donde los suelos con y sin tráfico bajo el tratamiento NT tenían valores total 60 similares, mientras que el suelo LC perdió significativamente 22%-23%  $\epsilon$  total y 71%-77%  $\epsilon$  a60 después del tráfico de la cosechadora (Tian *et al.*, 2023).

Por otro lado respecto a la velocidad de avance del tractor teóricamente se dice que mientras más corto sea el tiempo de contacto neumático-suelo menor debería ser la compactación lo que podría explicar que para las velocidades altas superiores a 5 km/h la porosidad debe mantenerse sin mayores perturbaciones negativas es decir perder volumen. Balsari probó distintas velocidades del tractor (3, 6, 9 y 12 km/h), profundidad de trabajo nominal (6, 9 y 15 cm) y velocidad del rotor (285 y 411 rpm) a una velocidad de toma de fuerza de 1000 rpm para evaluar las diferencias en el rendimiento del sistema tractor, es decir rendimiento de maquina mas no así características físicas del suelo, sin embargo se puede deducir en que el poco tiempo de contacto neumático-suelo favorece a la conservación de la porosidad y de una manera indirecta al medio ambiente ya que los resultados son muy alentadores en cuanto al consumo de combustible (Balsari *et al.*, 2020).

En la tabla 11 se muestra los coeficientes de regresión donde la potencia tiene un valor negativo por lo que podemos decir la correlación es inversa explicando que a mayor potencia (masa del tractor) la porosidad descende, en caso de la presión de inflado con 0,51 lo que explicaría que la correlación según la gráfica de presión de inflado por si solo presenta una curva es decir llega a un punto donde la porosidad no baja más a un que se incrementa más la presión de inflado.

Tabla 11  
*Coefficiente de regresión para porosidad del suelo*

<b>Coefficiente</b>	<b>Estimado</b>
Constante	48,1419
A:Potencia	-0,293138
B:Presion de inflado	0,51347
C:Velocidad de avance	-4,11181
AA	-0,000214862
AB	0,00329452
AC	0,0510502
BB	-0,0263625
BC	0,164333
CC	-0,359444

Tabla 12  
*Camino de máximo descenso para porosidad*

<b>Potencia (hp)</b>	<b>Presión de inflado (psi)</b>	<b>Velocidad de avance (km/h)</b>	<b>Predicción para porosidad (%)</b>
61,5	25,0	3,5	37,3
71,5	25,4589	3,24941	36,3657
81,5	26,268	2,88452	34,7762
91,5	27,5371	2,43868	32,2328
101,5	29,3007	1,9304	28,4055
111,5	31,5617	1,37017	22,9219

En la tabla de predicciones para porosidad podemos apreciar el trayecto de máximo descenso, en este trayecto, desde el centro de la región experimental (61,5 hp, 25 psi y 3,5 km/h) donde vemos la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales el cual serviría para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo es incrementar la porosidad. Actualmente, 6 puntos se han generado cambiando potencia en incrementos de 10,0 hp donde podemos ver como la porosidad del suelo decrece lo que justificaría la hipótesis del objetivo aceptándola, además de buscar a través de los otros factores la forma de conservar la porosidad o reducir al mínimo sus efectos, según la tabla 12.

Tabla 13  
*Optimización de respuesta para porosidad*

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
Potencia	25,0	98,0	25,000
Presión inflado	15,0	30,0	16,895
Velocidad	2,0	5,0	2,000

Meta: maximizar Porosidad

Valor óptimo = 41,675 %

En la tabla de optimización se muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Porosidad sobre la región indicada siendo el valor óptimo 41,675% lo que se podría conseguir con la potencia de 25 hp con una presión de inflado de neumático de 16,89 libras por pulgada cuadrada (psi) y una velocidad de 2 km/h. por lo que podríamos suponer que una presión de inflado de 16 libras (psi) podría mantener una porosidad adecuada cercana al ideal como valor óptimo.

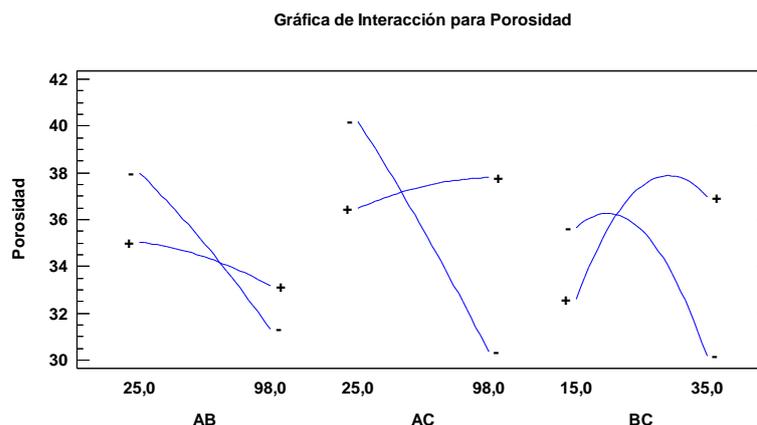


Figura 14. Grafica de las interacciones para porosidad

En la gráfica de interacciones figura 14 podemos evaluar el efecto combinado de los factores sobre la porosidad del suelo donde el de mayor relevancia es el de potencia-velocidad (AC) donde se registró las mejores porcentajes de porosidad (37 %) y en segundo lugar presión de inflado-velocidad (BC), la potencia del tractor como valor máximo de 98 hp (+1) demostró tener efecto sobre la porosidad, la masa de los tractores o equipos agrícolas de ruedas que tienen la interfaz neumático-suelo como un aspecto

sumamente importante. Para poder mantener la porosidad del suelo dentro de sus valores normales cercanos al ideal 50% (FAO, 2023), estos resultados pueden ser corroborados por lo manifestado por Tamirat *et al.* (2022) quien sostiene que el futuro de agricultura sostenible está en el uso de tractores livianos y versátiles económicamente rentables y prácticos, otra alternativa es el uso de la senda controlada donde se debe restringir el tráfico del tractor por todo el campo a solo lugares específicos dentro de ella.

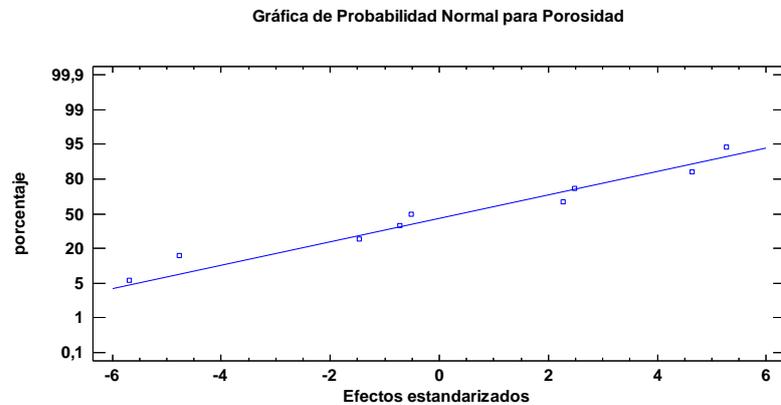


Figura 15. Probabilidad normal para porosidad del suelo.

En la gráfica de probabilidad normal para porosidad podemos ver un resumen de los factores en estudio y sus efectos estandarizados donde los datos están cerca de la línea de lo normal, figura 15.

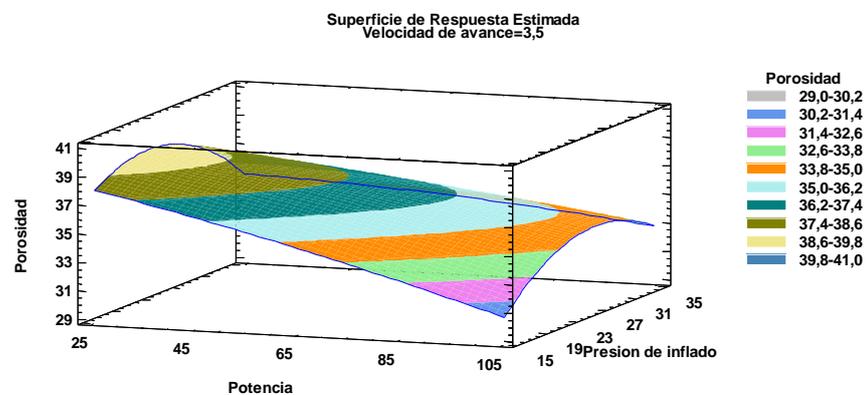


Figura 16. Gráfica de superficie de respuesta estimada a una velocidad media 3,5 km/h.

En la gráfica de superficies de respuesta podemos observar el comportamiento en conjunto de los tres factores en estudio donde la potencia que esta de la mano con la masa

del tractor y la carga sobre los ejes y estos sobre las ruedas a su vez la presión de inflado que al inicio o presiones bajas pueden mantener la porosidad sin embargo llegado un punto de 22 psi ya no muestran incremento al contrario baja, estos resultados explicarían que una excesiva presión de inflado presenta un pico máximo y el cual ya no tiene efecto y los valores pueden ser comparados al de la densidad aparente por estar directamente relacionado, figura 16.

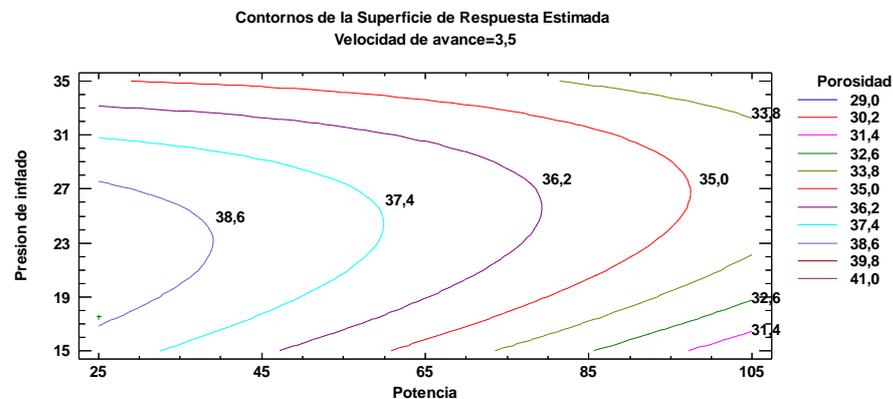


Figura 17. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada a una velocidad de 3,5 km/h

En la gráfica de contornos podemos observar como el efecto de la potencia hace que la porosidad se aleje más del centro comenzando en 38,6% reduciéndose a media que se incrementa la potencia traducida en masa del tractor 31,4% para potencia de 98 hp. Estos datos son similares a lo reportado por Oh *et al.* (2019) quien reporta que el uso de maquinaria pesada que transita sobre el terreno puede reducir drásticamente los macroporos y su distribución en el perfil del suelo afectando no solo la porosidad si no también la infiltración del agua, figura 17.

#### 4.3. Comparación de la potencia, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la resistencia a la penetración del suelo agrícola

Los datos mostrados en el ANOVA para ver la variabilidad de resistencia a la penetración fueron evaluados en partes separadas para cada uno de los efectos. Donde se probó la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P < 0.05 indicando que son significativamente  $\neq 0$  con un nivel de confianza del 95,0%.

La prueba de falta de ajuste nos indica, la prueba se realizó comparando la variabilidad de los residuos del modelo actual con la variabilidad entre observaciones obtenidas en condiciones repetidas de los factores. Dado que el valor-P para la falta de ajuste en la tabla ANOVA es  $> 0,05$  siendo el modelo adecuado para los datos de resistencia a la penetración en kPa observados al nivel de confianza del 95,0%. Donde claramente el factor potencia sigue siendo el más importante en comparación a los demás, según tabla 14.

Tabla 14

*Análisis de varianza para resistencia a la penetración*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Potencia	4,70716E6	1	4,70716E6	2970,37	<b>0,0003</b>
B:Presion de inflado	85573,8	1	85573,8	54,00	<b>0,0180</b>
C:Velocidad de avance	594,263	1	594,263	0,37	0,6026
AA	173715,	1	173715,	109,62	<b>0,0090</b>
AB	14559,4	1	14559,4	9,19	0,0938
AC	297,131	1	297,131	0,19	0,7072
BB	6407,37	1	6407,37	4,04	0,1820
BC	2674,18	1	2674,18	1,69	0,3235
CC	2201,82	1	2201,82	1,39	0,3597
Falta de ajuste	71905,8	3	23968,6	15,12	0,0627
Error puro	3169,4	2	1584,7		
Total (corr.)	5,07738E6	14			

En el diagrama de Pareto podemos comparar los tres factores donde el de mayor relevancia es el factor caballos de potencia (hp) tienen un valor-P  $< 0,05$  (**0,0003**) indicando que son significativamente  $\neq$  de 0 con un nivel de confianza del 95,0%.

En la figura 18 del diagrama de Pareto podemos observar que la potencia del tractor, potencia al cuadrado y presión de inflado, son los factores más relevantes para la resistencia a la penetración, sobre todo la potencia del tractor como el factor de mayor importancia sobre la resistencia a la penetración en comparación a los demás, donde el tractor de más potencia 98 hp (1330 kPa) es muy diferente al efecto del tractor de 25 hp (670 kPa).

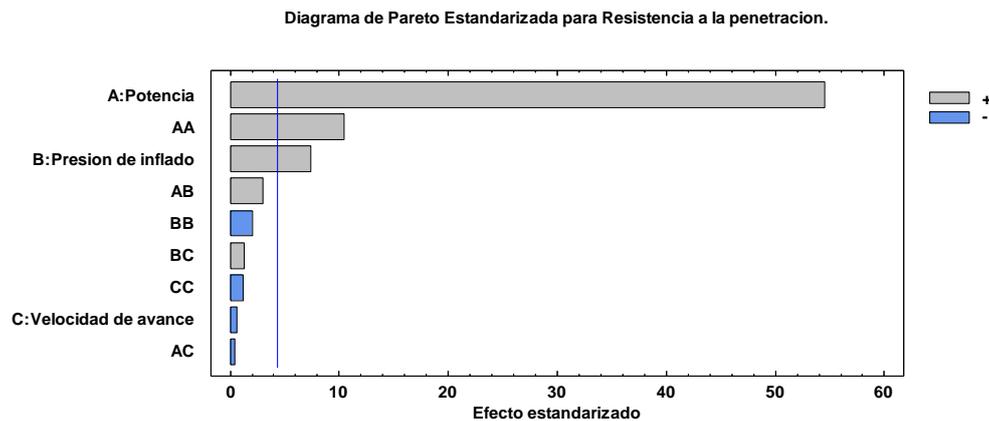


Figura 18. Diagrama de Pareto estandarizado para resistencia a la penetración

En general, la relación peso/potencia (cociente entre el peso del tractor y su potencia) sin utilización de lastres, es del orden de 50 kg/hp para tractores de tracción doble y 60 kg/hp para los modelos de oruga, mientras que los datos para el presente estudio fueron 53,33 kg/hp para el tractor de 98 hp mientras que para el de 25 hp fue de 46,40 kg/hp. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que a mayor potencia o masa del tractor mayor es la compactación medida en resistencia a la penetración.

Gutiérrez *et al.* (2017), manifiesta que la relación peso-potencia en los últimos años ha bajado sin embargo los efectos podrían ser permanentes sobre el suelo, así mismos de las vibraciones, los altos valores de presión del aire del neumático más los patinamientos son perjudiciales para el suelo.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo concuerdan con lo manifestado por Hernández quien encontró una correlación positiva significativa entre la  $R_p$  y  $D_a$  cuando este es trabajado con maquinaria y sin mecanización. La resistencia a la penetración ( $R_p$ ) presentó diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre los tres tratamientos en las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm (Hernández *et al.*, 2017).

En Irlanda también se estudió los patrones de tráfico de máquinas donde encontraron que el mayor grado de compactación se da en los bordes de los campos de cultivo donde el tractor gira, llegando a valores de 2,04 y 1,83 Mpa (2040 y 1830 kPa) y a mayor profundidad 250-400 mm 3,56 y 1,83 Mpa (3560 y 1830 kPa) trabajando con un tractor con una masa 5,88 t donde la tendencia general es de aumento de la resistencia a la penetración (Ward *et al.*, 2021).

Los resultados obtenidos en el presente estudio mostro como un tractor de 98 hp y una masa superior a 5 000 kg puede ser capaz de compactar en 2 758 kPa que está dentro de los valores máximo reportados por Ward.

“El suelo compactado puede arruinar la estructura del suelo , limitar la infiltración de aire y agua , disminuir la porosidad y aumentar la densidad aparente y la resistencia del suelo si el volumen del suelo supera la resistencia del penetrómetro de 2,5 MPa” (Nisha *et al.*, 2023).

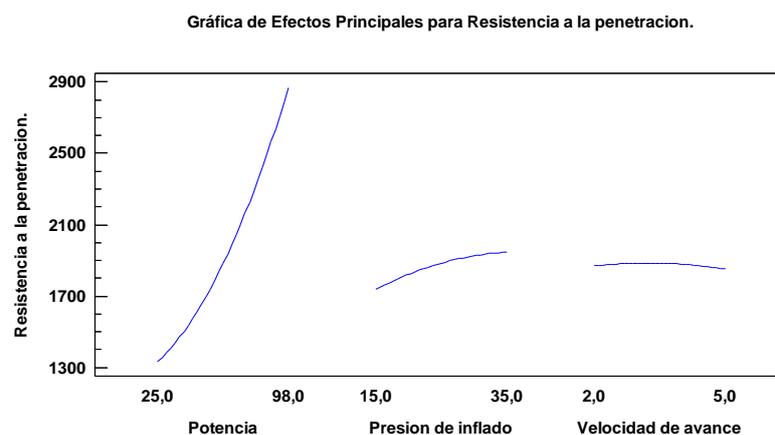


Figura 19. Efectos principales para resistencia a la penetración (kPa)

Los efectos principales según la gráfica se aprecia a la potencia como factor de mayor relevancia que tiene un comportamiento casi lineal positivo a más caballos de potencia (hp) es mayor la resistencia a la penetración ( $R_p$ ), de similar forma la presión de inflado a mayor presión en libras por pulgada cuadrada (psi) del neumático la  $R_p$  aumenta ligeramente, mientras que la velocidad de avance tiene comportamiento inverso muy débil a mayor velocidad ligeramente se reduce  $R_p$ . Pero aun así es importante dentro de la resistencia a la penetración o también llamado índice de cono ( $I_c$ ), sin embargo otros autores como García *et al.*, (2020) manifiesta que el índice de cono ( $I_c$ ) en la labranza con arado de discos después de la siembra supero los 3 Mpa (3000 kPa) después de la profundidad de 12.5 cm mientras que con multiarado en 80% de los datos están por debajo de los mismos 3 Mpa, coincidiendo con el  $I_c$  después de la cosecha en ambos casos trabajando con un tractor agrícola (4X4) con neumático radial con una masa de 5 872 kg. A una presión de inflado de neumático de 140 kPa. (20 psi) siendo estos resultados similares a lo encontrado en la presente investigación.

Los datos sobre resistencia a la penetración encontrados en el presente trabajo de investigación no superan los límites máximos mencionados por Kirkegaard y Troedson (1993) quien manifiesta que el endurecimiento del suelo causa en la raíz una reducción en su crecimiento hasta en un 50%, cuando el índice de cono ( $I_c$ ) se encuentra de 0.7 a 1.5 MPa y se limita completamente a valores mayores de 4 MPa. Los valores encontrados en la presente investigación no superan los 2,9 MPa para el tractor de 98 hp sin embargo por encima de 1.5 MPa el cual restringiría el crecimiento de las raíces.

De similar manera ocurre con la velocidad no tuvo una mayor efecto sobre la resistencia a la penetración sin embargo Balsari probó distintas velocidades del tractor (3, 6, 9 y 12 km/h), profundidad de trabajo nominal (6, 9 y 15 cm) y velocidad del rotor (285 y 411 rpm) mas no así los efectos sobre el suelo, no obstante los resultados son alentadores para un uso más eficiente de la maquinaria (Balsari *et al.*, 2020), no existiendo a la fecha un dato sobre este efecto directamente relacionado con la compactación del suelo.

Peralta *et al.* (2021) señala sobre la compactación superficial del suelo a causa del tráfico de maquinaria agrícola, donde la labranza profunda sin inversión disminuyó significativamente la resistencia a la penetración del suelo en el 0 – 0.20 m en 44 % en promedio se redujo en -0.86 MPa. Estos sugieren que el uso de un arado de sub suelo se debe realizar con gran potencia y a bajas velocidades a lo que podría corroborar el trabajo de Gomez *et al.* (2019) en donde manifiesta que la compactación se debe en gran medida a la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas, donde se incrementa con el uso de implementos suspendidos como el que se utilizó en presente estudio.

En la tabla 15 se despliega el trayecto de máximo ascenso para la resistencia a la penetración en kPa este es el trayecto, desde el centro de la región experimental, a través del cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales. Indica buenas características para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo es observar y evaluar el incremento de la resistencia a la penetración a causa de la potencia de los tractores agrícolas, podemos ver que a mayor potencia mayor es la masa y el daño puede generar al suelo. Actualmente, 8 puntos se han generado cambiando Potencia en incrementos de 10,0 hp, donde podemos apreciar que para un tractor de 130 hp el daño causado al suelo sería por encima del umbral que es de 4 MPa equivalente a 4000 kPa (Kirkegaard y Troedson, 1993).

Tabla 15

*Camino de máximo ascenso para resistencia a la penetración. kPa*

Potencia (hp)	Presión de Inflado (psi)	Velocidad de avance (km/h)	Predicción para resistencia a la penetración. (kPa.)
61,5	25,0	3,5	1884,63
71,5	25,3641	3,49538	2115,41
81,5	25,7205	3,49079	2379,76
91,5	26,0712	3,48622	2677,66
101,5	26,4174	3,48166	3009,12
111,5	26,7601	3,47711	3374,14
121,5	27,0999	3,47256	3772,7
131,5	27,4372	3,46801	4204,82

En la grafica de probabilidad figura 20 podemos observar que los datos no muestran una distribución normal. Es posible que la gran variabilidad del suelo en un area pequeña haya influido, tambien podria suponerse el encontrar estratos por debajo de 20 cm muy compactos o talvez piedras menudas que hacen lecturar erroneamente.

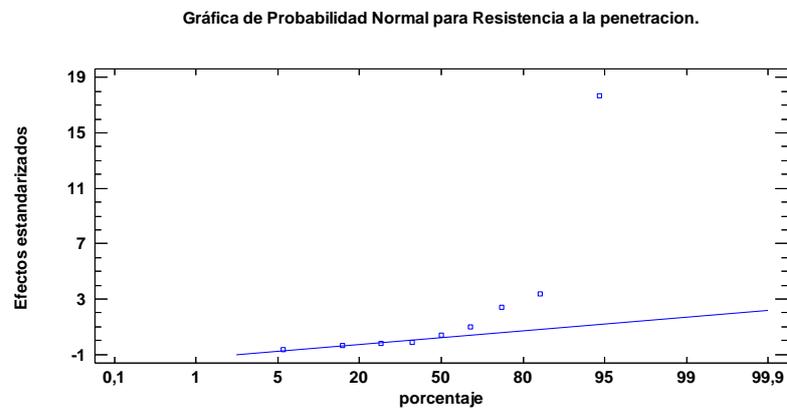


Figura 20. Grafica de probabilidad normal para resistencia a la penetración

Tabla 16  
*Optimización de respuesta resistencia a la penetración*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Potencia	25,0	98,0	25,0549
Presión de inflado	15,0	35,0	15,0
Velocidad de avance	2,0	5,0	5,0

Meta: minimizar resistencia a la penetración.

Valor óptimo = 1199,84

En la tabla de optimización se muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual minimiza la resistencia a la penetración, sobre la región indicada. Donde lo óptimo sería de 1199,84 kPa utilizando el tractor de menos potencia es decir 25,05 hp como (-) el beneficio de usar maquinaria liviana, eficiente y amigable con el suelo es posible actualmente en el mercado mundial existen tractores de diferentes potencias y tipos que se ajustan para cada necesidad del agricultor, pudiendo ser una alternativa para la conservación del recurso suelo el uso de estas máquinas.

En la figura 21 podemos ver claramente los efectos de los factores importantes para la resistencia a la penetración que es la potencia y presión de inflado mas no así la velocidad donde la potencia es la masa del tractor y este a su vez es la carga sobre los ejes y finalmente la interfaz neumático-suelo, tal como lo manifiesta Raper (2005), donde el

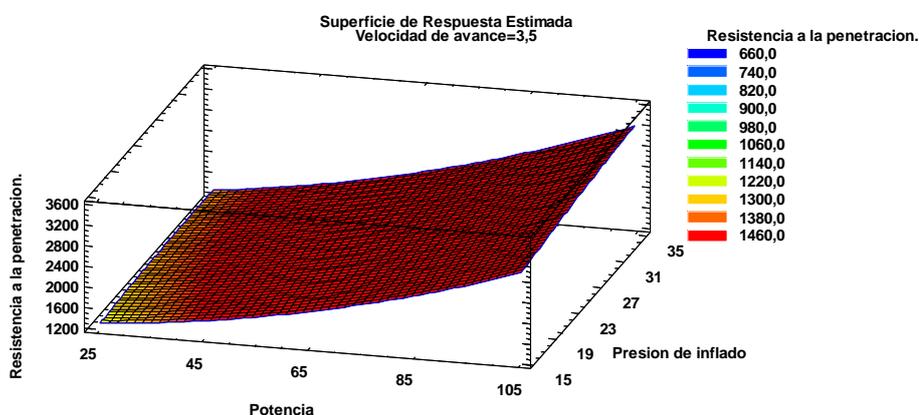


Figura 21. Grafica de superficie de respuesta estimada para resistencia a la penetración a una velocidad de 3,5 km/h

mismo propone reducir el tamaño de los vehículos, controlar el tráfico, minimizar el contacto entre los elementos de tracción y el suelo, los resultados obtenidos en el presente

estudio pueden ser corroborados por Torres *et al.*, (2017), quien manifiesta haber superado la lectura en el penetrometro indice de cono (Ic) de 3 Mpa cuando trabajo con un tractor a una presion de inflado de 30 psi y a una velocidad promedio de 4 km/h con una masa de 4 094 kg sin considerar el implemento.

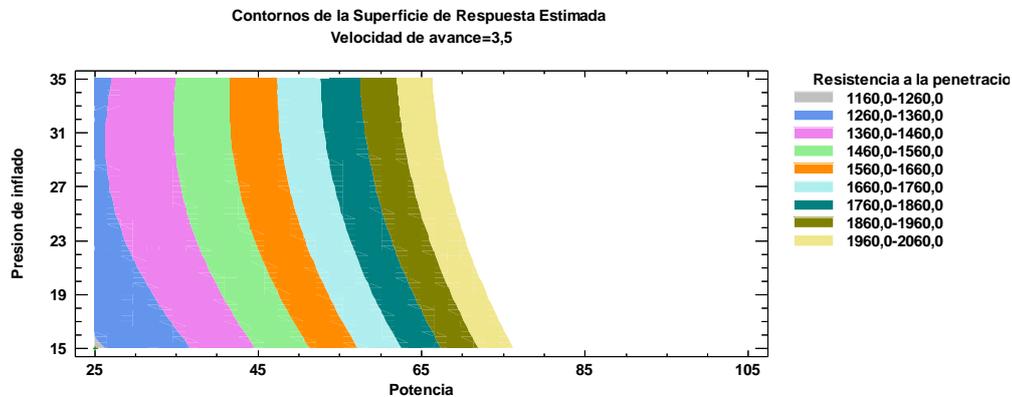


Figura 22. Grafica de contornos de la superficie de respuesta estimada para resistencia a la penetración

En la grafica de contornos podemos de ver una vista superior de la superficie de respuesta donde los factores potencia y presion de inflado tienen efecto sobre la resistencia a la penetración en kPa donde ambos estadísticamente son distintos para el factor potencia a un nivel de 0.05%, figura 22.

Según Fenta *et al.* (2022) manifiesta que la Rp puede variar a lo largo de la campaña agrícola, es decir de una lectura inicial a 40 y 60 cm de profundidad manteniéndose cerca a los 2 Mpa incrementándose en época lluviosa hasta a 0,15 Mpa con solo el accionar de la lluvia y el paso del tiempo, sin embargo el que mejor resultado mostro fue un tratamiento con el uso de un arado mejorado para tiro animal denominado arado Berken que mantuvo la Rp en menos de 2 Mpa. Estos datos sugieren que no solo los tractores pueden ocasionar un deterioro al suelo si no también todo aquello que este en contacto con el suelo incluso la lluvia y presión atmosférica.

#### 4.4. Relación de la potencia, presión de inflado de neumáticos y velocidad de avance sobre la cantidad de microorganismos del suelo agrícola

Tabla 17  
*Análisis de varianza para microorganismos*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:POTENCIA	1,92821E7	1	1,92821E7	36153,84	<b>0,0000</b>
B:PRESION DE INFLAD	11250,0	1	11250,0	21,09	<b>0,0443</b>
C:VELOCIDAD	200,0	1	200,0	0,37	0,6026
AA	438416,	1	438416,	822,03	<b>0,0012</b>
AB	7225,0	1	7225,0	13,55	0,0665
AC	4225,0	1	4225,0	7,92	0,1065
BB	877,564	1	877,564	1,65	0,3282
BC	2025,0	1	2025,0	3,80	0,1907
CC	2385,26	1	2385,26	4,47	0,1687
Falta de ajuste	4450,0	3	1483,33	2,78	0,2755
Error puro	1066,67	2	533,333		
Total (corr.)	1,97664E7	14			

Para poder relacionar la potencia, presión de inflado de neumático y velocidad del tractor se realizó la tabla ANOVA para estudiar la variabilidad de Microorganismos en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P < 0.05 indicando que son significativamente  $\neq$  de 0 con un nivel de confianza del 95,0%. Siendo esta potencia, presión de inflado y potencia al cuadrado. Donde nuevamente podemos ver que el factor de mayor relevancia es la potencia del tractor (98 hp) siendo muy visible su efecto sobre la cantidad de microorganismos (UFCs) por gramo de suelo seco. Dado que el valor-P para la falta de ajuste en la tabla ANOVA es > 0.05 el modelo parece ser adecuado para los datos observados a un nivel de confianza del 95,0%.

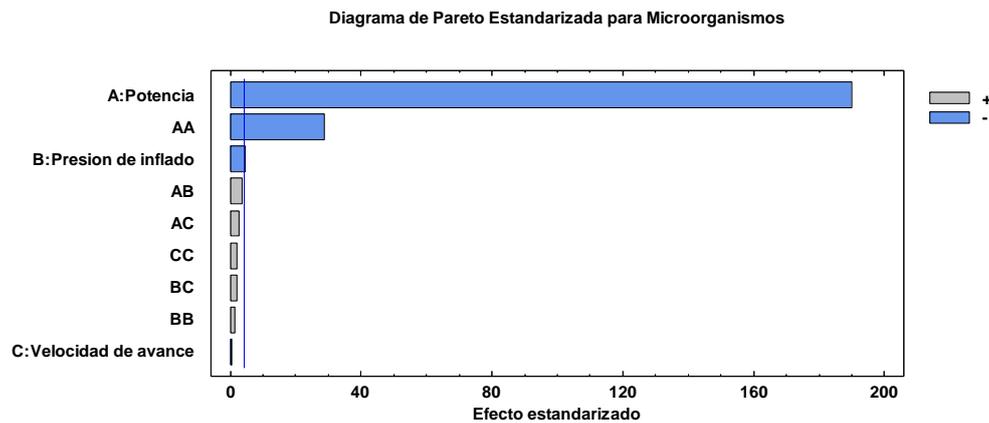


Figura 23. Diagrama de Pareto estandarizado para microorganismos del suelo

En el diagrama de Pareto podemos observar a un nivel de confianza del 95% que son estadísticamente significativos y  $\neq$  a 0 la potencia con un valor de efecto estandarizado 190 mientras que el valor de presión de inflado con 5, superiores y distintos a 0 estos resultados no hacen otra cosa más que confirmar el efecto de la masa del tractor expresado en potencia en hp donde podríamos concluir y decir que el peso elevado de una máquina que ejerce presión al suelo a través de sus ruedas cambia las condiciones físicas del suelo principalmente en la Da y porosidad afectando directamente a la actividad microbiana expresado en unidades formadoras de colonias (UFC) por gramo de suelo seco. Según McCormack *et al.* (2019) “manifiesta que las alteraciones o modificaciones en los factores abióticos también pueden causar cambios no deseados en la biota del suelo y los procesos del mismo”. En la presente investigación el suelo transitado por el tractor de 98 hp presenta una menor cantidad con 4200 UFC’s por gramo de suelo seco mientras que el tractor de menos potencia y masa es decir 25 hp y 1 000 kg presenta una cantidad de 7 300 UFC’s de microorganismos.

“Sin embargo, el efecto combinado de la compactación y el estrés por humedad sobre la respiración microbiana dentro de los tratamientos de cada tipo de suelo estuvo regulado principalmente por la densidad aparente (Da) y humedad de cada tratamiento. Para ser específicos, un ligero aumento en la densidad aparente o la humedad del suelo aumentaría la actividad y la biomasa microbiana del suelo” (Liu *et al.*, 2023).

En un estudio realizado en Bolivia donde se investigó el efecto del tipo de uso del suelo sobre las cantidades de unidades formadoras de colonias (UFC). “Donde un suelo con cultivo presenta mayor UFC’s con  $7.96 \times 10^4$  y forma el primer grupo. Siendo distinto

estadísticamente a un nivel de significancia del 5%, en segundo lugar el suelos en descanso y suelos naturales que son similares estadísticamente con  $6.6 \times 10^4$  y  $5.97 \times 10^4$  UFC's, finalmente el suelo sin cobertura con solo  $5.66 \times 10^4$  (Gregorio *et al.*, 2017).

Al respecto McCormack sostiene que a medida que al suelo se añade estimulantes como el biocarbón puede aumentar de manera positiva la relación hongos-bacterias y estas interactúan con las raíces y mejoran la actividad microbiana, además de mencionar el efecto negativo del pH y Da alterados por los arados y sus consecuencias abióticas (McCormack *et al.*, 2019).

El efecto de la potencia del tractor consecuentemente su masa reduce las reservas de C biodisponibles del suelo a causa del deterioro de los agregados del suelo, “mientras que el anegamiento baja la actividad y la biomasa microbiana del suelo al crear una condición anaeróbica en el perfil del suelo o aumentar el efecto del estrés osmótico en los microorganismos sensibles al estrés” (Liu *et al.*, 2023).

Al respecto no se encontró antecedentes puntuales sobre esta relación potencia de máquinas y su efecto en la actividad microbiana, sin embargo podemos mencionar que de acuerdo a lo reportado Sánchez *et al.* (2019), en donde se buscó relacionar el número potencial de cianobacterias con la rotación de cultivos donde fue menor los recuentos en la plantación y mayor en el de panojamiento y embuchado del arroz, sin embargo no hubo diferencia significativa el efecto de las rotaciones sobre el número de cianobacterias, aunque una rotación de arroz-arroz presentó la mayor abundancia. Se reconocieron un total de 13 géneros de cianobacterias Lyngbya, Oscillatoria, Plectonema, Spirulina, Anabaena, Nostoc, Aulosira, Calothrix, Gloeotrichia, Aphanocapsa, Croococcus, Myrocystis y Gloeocapsa .

En la tabla 18 podemos apreciar el recuento total en unidades formadoras de colonias (UFC) del suelo experimental donde se extrajo las muestras representativas y se analizaron, donde las cantidades promedio se registran como sigue:

La cantidad inicial del suelo fue de 12 100 UFCs en el mes de noviembre 2022 donde representa la cantidad que tenía el suelo antes del ingreso de los tractores, pasado los tratamientos de potencias de tractor se tomaron muestraran nuevamente en el mes de abril

Tabla 18  
*Microorganismos observados en el presente experimento*

Genero	Rhizopus sp.	Verticilium	Bacillus sp.	Recuento total	
M0	5040	510	5670	12100	INICIO
M1	4410	350	2620	7300	25HP
M2	1950	1820	1890	6100	65HP
M3	1260	2630	420	4200	98HP

Fuente: Laboratorio de Microbiología FMVZ.UNA-PUNO

del 2023 donde claramente podemos ver que las diferencias no solo son matemáticas sino más bien estadísticamente diferentes, al respecto podemos suponer que el suelo presenta factores abióticos y bióticos para el normal desarrollo de los microorganismos, como hemos podido observar anteriormente tanto la Da y la porosidad fueron afectados por el paso de la maquinaria, es de suponer que la reducción del oxígeno en el suelo afecto a los microorganismos que son aeróbicos impidiendo su proliferación e interacción con los cultivos.

Los datos que se muestran en la tabla 21 podrían señalar o mostrar la tendencia actual de la agricultura moderna en condiciones del altiplano, ya que con el uso de los tractores de potencias altas 90 a 130 hp que es la potencia que se adquiere en mayor porcentaje a nivel Nacional podría representar un peligro potencial para la salud del suelo.

Según la figura 24 podemos ver la relación que es inversamente proporcional de la potencia sobre la población de microorganismos del suelo en unidades formadoras de colonias (UFC), estos resultados concuerdan con McCormack quien manifiesta que un mal equilibrio entre los factores abióticos del suelo como pH y Da originaria una alta degradación de la comunidad biótica del suelo (McCormack *et al.*, 2019), los cuales fueron seriamente afectados con la potencia del tractor, sobre todo con aquel que tenía 98 hp con una carga sobre el suelo de más 5398 kg que altero la Da aumentándolo y bajando la porosidad total en 31 y 32%, los macroporos son los espacios vacíos del suelo por donde se oxigena el suelo y microporos son espacios donde se retiene el agua, al ser estos perturbados se rompe el equilibrio que debe existir para óptimo desarrollo de los microorganismos y puedan estos cumplir sus funciones en el frágil ecosistema de la rizosfera.

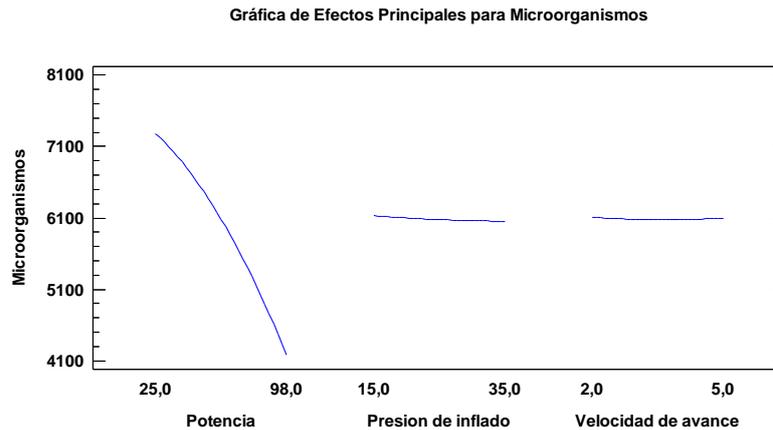


Figura 24. Grafica de efectos principales para microorganismos del suelo

Tabla 19

Coefficiente de regresión para microorganismos del suelo

Coefficiente	Estimado
Constante	8492,45
A:POTENCIA	-15,7092
B:PRESION DE INFLADO	-23,8693
C:VELOCIDAD	-156,414
AA	-0,258648
AB	0,116438
AC	0,593607
BB	0,154167
BC	1,5
CC	11,2963

En la tabla 19 de coeficiente de regresión que se ha ajustado a los datos. En donde los valores de correlación fueron negativas para potencia son fuertes e inversamente proporcionales es decir a mayor potencia (masa del tractor) menor es la población de microorganismos después de 5 meses de realizado los muestreos, también podría ser que el efecto no solo sea de la masa de los tractores sino también de la profundidad con la que se realizó las labranzas, Una labranza intensiva con tractores de gran potencia y arado de 4 discos de 28 pulgadas son capaces de degradar el suelo, al momento de realizar la roturación e inversión por la forma del casquete del disco la parte más baja del perfil entre 25 a 30 cm es expuesto en mayor grado ocasionando una pérdida de los microorganismos por acción del sol y de otros depredadores, mientras que con una roturación más superficial entre 10 a 20 cm no sería tan perjudicial para el suelo y su micro fauna.

En la tabla 20 podemos ver el despliegue y trayecto de máximo descenso. Este es el trayecto, desde el centro de la región experimental actual, a través del cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales. Indica buenas características para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo es observar la reducción de microorganismos del suelo en UFC para poder prevenir y buscar un uso eficiente de la maquinaria con más de 98 hp, que pongan en riesgo el equilibrio de los factores bióticos y abióticos del suelo propios de una agricultura convencional altamente mecanizada.

Tabla 20  
*Camino de máximo descenso para microorganismos*

Potencia (hp)	Presión de inflado (psi)	Velocidad de avance (km/h)	Predicción para microorganismos (UFC)
61,5	25,0	3,5	6076,67
71,5	25,0528	3,50013	5625,32
81,5	25,0826	3,49824	5122,39
91,5	25,0938	3,49473	4567,76
101,5	25,0897	3,48988	3961,34
111,5	25,0727	3,48393	3303,06
121,5	25,0449	3,47704	2592,89
131,5	25,0076	3,46935	1830,77
141,5	24,9622	3,46096	1016,67
151,5	24,9097	3,45198	150,559

No se debe olvidar que no es el único que transita por el campo de cultivo es el tractor, muchas veces ingresan camiones, cargando las cosechas y superan los 5 000 kg. El riesgo es grande ya que estos vehículos pueden ocasionar un daño mayor si no son debidamente dirigidos o controlados. Se ha simulado 10 puntos se han generado cambiando Potencia en incrementos de 10,0 hp. Donde el punto central tiene 6076,67 UFC y podría llegar con un tractor de 151 hp a valores críticos de tan solo 150,56 UFC perjudicando enormemente el equilibrio del ecosistema de la rizosfera.

Tabla 21  
*Optimizar respuesta para microorganismos*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Potencia	25,0	98,0	25,000
Presión de inflado	15,0	35,0	15,269
Velocidad	2,0	5,0	2,000

Meta: maximizar microorganismos

Valor óptimo = 7461,83 UFC

En la tabla 21 se muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Microorganismos sobre la región indicada. Donde lo óptimo sería trabajar con un tractor 25 hp ya que este es el que menos daño causa al suelo principalmente por su bajo peso y relación peso-potencia menor que los tractores de 98 y 65 hp, el tractor de 25 hp por sus características no perturba en un mayor grado el suelo como si lo hacen los de gran potencia que son propios de la agricultura convencional altamente mecanizada, el uso de un tractor liviano, eficiente y amigable con el suelo es posible encontrarlo, actualmente la tendencia es justamente maquinas medianas a pequeñas que trabajen sin mayor inconveniente y combinadas con sistemas de labranza reducida o cero como lo reportado por Balota *et al.* (2014) quien sostiene que “La labranza cero tuvo mayor biomasa microbiana, polisacáridos, proteína del suelo relacionada con la glomalina y actividad enzimática del suelo que la labranza convencional”, donde se expone al sol muchos microorganismos benéficos como hongos y bacterias que mueren.

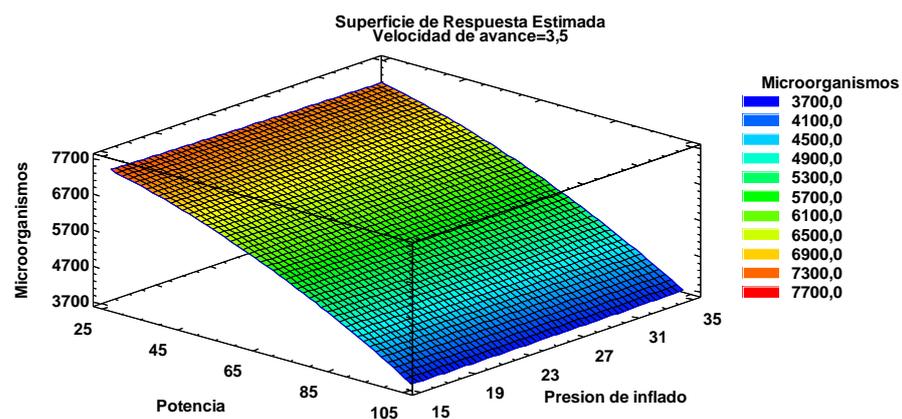


Figura 25. Grafica de superficies de respuesta estimada para microorganismos del suelo

En la figura de superficies de respuesta se puede apreciar una relación de causa y efecto de la potencia de los tractores sobre la cantidad de unidades formadora de colonias (UFC) en los hongos del género *Rhizopus* sp., *Verticilium* y bacterias de genero *Bacillus* sp. El efecto de la potencia (masa) del tractor, y el mínimo efecto que tuvo la presión de inflado trabajando a una velocidad media de 3,5 km/h, figura 26.

Los datos obtenidos son promisorios y sin precedentes, la gran diversidad biótica del suelo hace difícil sostener una conclusión porque son varios los factores que afectan la biomasa microbiana del suelo, al respecto en un trabajo se reportó una disminución en la actividad microbiana con gramíneas, posiblemente por la duración del ensayo (5 meses) que son también los meses que se tomó la muestra final, donde también se sugiere que en una región semiárida son necesarios períodos de tiempo mayores que un año para ver los efectos de los cultivos de coberturas sobre la comunidad microbiana del suelo (Morales *et al.*, 2021).

En la figura 26 podemos observar como la potencia afecta de una manera directa a la cantidad de unidades formadoras de colonias así mismo la presión de inflado de una forma menos directa afecta la cantidad de UFC en el suelo. Que posiblemente tengan mucho que ver también con el pH del suelo y la humedad ya que son factores que afectan directamente la actividad microbiana (Zhou *et al.*, 2012).

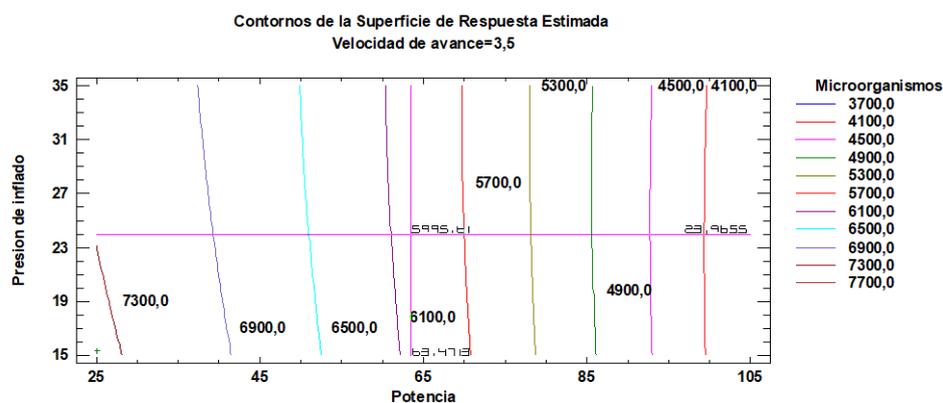


Figura 26. Grafica de contornos de la superficie de respuesta estimada a una velocidad de avance de 3,5 km/h

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la presente investigación llegamos a las siguientes conclusiones:

- La densidad aparente del suelo ( $D_a$ ) se incrementa por una mayor potencia del tractor (98 hp), la presión de inflado bajas (15 psi) de los neumáticos causa un menor efecto sobre la  $D_a$  y velocidad de avance media (3,5 km/h) del tractor, en un menor grado, siendo los resultados significativamente diferentes.
- La porosidad total del suelo está íntimamente ligado a la densidad aparente ( $D_a$ ) en ese sentido la porosidad disminuye cuando la  $D_a$  aumenta a causa de la mayor potencia de tractor (98 hp) y menor velocidad (2 km/h), que reduce el porcentaje de espacios porosos con más intensidad que un tractor de baja potencia (25 hp),
- La resistencia a la penetración se incrementa en una mayor magnitud con el uso del tractor de alta potencia (98 hp) que comprime con mayor intensidad el suelo debido a su mayor masa, seguido de la presión de inflado alta como los factores de mayor importancia sobre el incremento de la resistencia a la penetración.
- Existe una correlación negativa directa entre la potencia del tractor y el número de unidades formadoras de colonias (UFC) donde a mayor potencia y presión de inflado de neumático menor es la cantidad de microorganismos en el suelo.

La potencia, presión de inflado y velocidad de avance del tractor afecta de forma directa a la densidad aparente, porosidad, resistencia a la penetración y cantidad de microorganismos del suelo, siendo la potencia (masa del tractor) como el factor más importante.

## RECOMENDACIONES

En base a las conclusiones arribadas podemos recomendar lo siguiente:

- Dada la relación directa entre la densidad aparente del suelo ( $D_a$ ) y la porosidad se recomienda en lo posible emplear tractores con relación peso-potencia baja (25 hp) en suelos de textura fina propensos a la compactación y no exceder de 53,3 kg/hp de relación peso-potencia, asegurarse de que los neumáticos se encuentren en buen estado y a la presión recomendada (16 psi), así mismo capacitar a los operadores sobre los riesgos de trabajar cuando el suelo está muy húmedo.
- Se recomienda identificar claramente el potencial de los suelos y su riesgo a la compactación superficial, así mismo restringir el uso de maquinaria pesada en suelos propensos a la compactación y no se incremente la resistencia a la penetración.
- Se recomienda estudiar a mayor detalle la actividad biológica del suelo y su relación con la compactación antrópica a un nivel macro, meso y microbiológico y poder establecer una estrategia para mantener o mejorar la actividad biológica en el suelo.

## BIBLIOGRAFIA

- Alfonso, C., Romero, H., & Botero, R. (2009). Presión estática ejercida al suelo por sistemas para transporte interno de racimos de fruta fresca en palma de aceite. *Revista Palmas*, 30(4), 33–41. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040098>
- Balota, E. L., Calegari, A., Nakatani, A. S., & Coyne, M. S. (2014). Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: A long-term study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 197, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.010>
- Balsari, P., Biglia, A., Comba, L., Sacco, D., Varani, M., Mattetti, M., ... Aimonino, D. R. (2020). *ScienceDirect Performance analysis of a tractor - power harrow system under different working conditions*. 202.(2021), 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.11.009>
- Bauer, F., Porteš, P., Polcar, A., Čupera, J., & Fajman, M. (2022). Differences in the wheel loads and contact pressure of the in-furrow and on-land rear tractor tyres with mounted and semi-mounted ploughs. *Soil and Tillage Research*, 215( 2021), 2-22. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105190>
- Becker, C., & Els, S. (2022). Agricultural tyre stiffness change as a function of tyre wear. *Journal of Terramechanics*, 102, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.04.001>
- Bennett, J. M., Roberton, S. D., Marchuk, S., Woodhouse, N. P., Antille, D. L., & Jensen, T. A. (2019). Soil & Tillage Research The soil structural cost of traffic from heavy machinery in Vertisols. *Soil & Tillage Research*, 185( 2018), 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.007>
- Botta, G. F., Antille, D. L., Nardon, G. F., Rivero, D., Bienvenido, F., Contessotto, E. E., ... Ressia, J. M. (2022). Soil & Tillage Research Zero and controlled traffic improved soil physical conditions and soybean yield under no-tillage. *Soil & Tillage Research*, 215(October 2021), 105235. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105235>
- Cerda, A., Novara, A., & Moradi, E. (2021). Long-term non-sustainable soil erosion rates and soil compaction in drip-irrigated citrus plantation in Eastern Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment*, 4 (2015), 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147549>
- Damme, L., Schj, P., Munkholm, L. J., Green, O., Nielsen, S. K., & Lamand, M. (2021). *Soil & Tillage Research Traction and repeated wheeling – effects on contact area characteristics and stresses in the upper subsoil*. 211(2020). 2-10

- <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105020>
- Devine, S. M., Dahlke, H. E., & Geen, A. T. O. (2022). Soil & Tillage Research Mapping time-to-trafficability for California agricultural soils after dormant season deep wetting. *Soil & Tillage Research*, 218, 105316. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105316>
- Domínguez, P. D., Pozo, G. C., & León-Sánchez, M. A. (2018). *Estimación de la densidad volumétrica y porosidad total usando el penetrómetro. Cultivos Tropicales*, 39(4), 34–41. Retrieved from <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Eduardo, L., Sanches, A., Jos, D., Secco, D., Fenner, P. T., & Reichert, M. (2022). *Soil Structure under Forest and Pasture Land-Uses Affecting Compressive Behavior and Air Permeability in a Subtropical Soil*. *Sistema de suelo 2022*, 6 (4), 98 <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040098>
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., ... dos Santos, W. N. L. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, 597(2), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>
- Fenta, H. M., Hussein, M. A., Tilahun, S. A., Nakawuka, P., Steenhuis, T. S., Barron, J., ... Schmitter, P. (2022). Geoderma Berken plow and intercropping with pigeon pea ameliorate degraded soils with a hardpan in the Ethiopian highlands. *Geoderma*, 407, 115523. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115523>
- García, R. E., Gutiérrez, R. F., Ramírez, D. F., González-Huerta, A., Pérez López, D. de J., & Serrato Cuevas, R. (2020). Evaluación de la intensidad del tráfico de tractores e implementos en un suelo agrícola. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 753–766. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2133>
- Gil, E. (2016). Maquinaria Agrícola, Tractor, preparación del suelo y siembra. *Escola Superior D'agricultura De Barcelona*, 1–50. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/189598/28064-3822.pdf>
- González, O., Herrera, M., Iglesias, C., Navas, F., Hernández-Gómez, L., & Urriolagoitia, G. (2012). Modelo en elementos finitos de la interacción neumático-suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(spe4), 664–671. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3nspe4/v3nspe4a8.pdf>

- Gómez, N., & Rodríguez, J. (2019). Degradación del suelo por compactación en función de la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas Soil degradation by compaction as a function of weight distribution on the axles of agricultural tractors. *Yulok*, 3, 44–50. <https://revistas.utn.ac.cr/index.php/yulok/article/view/221>
- Gregorio, M., Fernando, P., Gregorio, L. M., Alejandro, B., Lourdes, V., Teófilo, S., & Artículo, D. (2017). *Pacasa*.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=361349918002>
- Gutiérrez, R. F., Vaca García, V. M., Morales Rosales, E. J., González Huerta, A., Pérez López, D. de J., & Saldívar Iglesias, P. (2017). Compactación de un Vertisol debido al tránsito y diferentes masas de tractores agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(4), 803–813. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i4.620>
- Hernández, N. H., Méndez, V. D., Becerra, O. L., & Díaz, I. A., (2017). Efecto de la mecanización del suelo sobre sus propiedades físicas y la producción de papaya (Carga papaya L.). *Revista Alfa*, 1(3), 111–117. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v1i3.32>
- Ibáñez, A. S., Gisbert, B. J., & Moreno, R. H. (2011). *Mollisoles*. 6. Retrieved from <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/13609>
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Soil & Tillage Research Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil & Tillage Research*, 194(2018), 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Kirkegaard, J. A., So, H. B., & Troedson, R. J. (1993). Effect of compaction on the growth of pigeonpea on clay soils. III. Effect of soil type and water regime on plant response. *Soil and Tillage Research*, 26(2), 163–178. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90042-N](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90042-N)
- Lamichhane, J. R., Boizard, H., Dürr, C., Richard, G., & Boiffin, J. (2021). Effect of cropping systems and climate on soil physical characteristics, field crop emergence and yield: A dataset from a 19-year field experiment. *Data in Brief*, 39, 2-13. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107581>
- Lima, R. P. De, Rolim, M., Toledo, M. P. S., Tormena, C. A., Silva, A. R., Andrei, I., ... Pedrosa, E. M. R. (2022). Soil & Tillage Research Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. 215(October 2021). <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105215>

- Liu, B., Jing, Z., Wang, J., & Feng, Y. (2023). Effect of soil compaction on hydraulic properties and macropore structure : Evidence from opencast mines in the Loess Plateau of China. *Ecological Engineering*, 192(2022), 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106988>
- Liu, X., Rezaei Rashti, M., Van Zwieten, L., Esfandbod, M., Rose, M. T., & Chen, C. (2023). Microbial carbon functional responses to compaction and moisture stresses in two contrasting Australian soils. *Soil and Tillage Research*, 234(2022), 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105825>
- McCormack, S. A., Ostle, N., Bardgett, R. D., Hopkins, D. W., Pereira, M. G., & Vanbergen, A. J. (2019). Soil biota, carbon cycling and crop plant biomass responses to biochar in a temperate mesocosm experiment. *Plant and Soil*, 440(1–2), 341–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04062-5>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (MINAGRI). (2015). El Ministerio de Agricultura impulsa la mecanización y modernidad de nuestro agro. <https://www.midagri.gob.pe/portal/201-especiales/especiales/2190-programa-munitractor>
- Moinfar, A. M., Shahgholi, G., Gilandeh, Y. A., & Gundoshmian, T. M. (2020). The effect of the tractor driving system on its performance and fuel consumption. *Energy*, 202, 117803. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117803>
- Moinfar, A., Shahgholi, G., Gilandeh, Y. A., Kaveh, M., & Szymanek, M. (2022). Investigating the effect of the tractor driving system type on soil compaction using different methods of ANN, ANFIS and step wise regression. *Soil and Tillage Research*, 222(May), 105444. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105444>
- Morales, M. E., Iocoli, G. A., Villamil, M. B., & Zabaloy, M. C. (2021). Effect of winter cover crops on the soil microbiome: a systematic literature review. *Revista Argentina de Microbiología*, 54(1), 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2021.02.008>
- Nisha, K., Upadhyay, G., Patel, B., Choudhary, S., & Rani, V. (2023). A tractor hydraulic assisted embedded microprocessor-based penetrometer for soil compaction measurement. *Journal of Terramechanics*, 110, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.07.003>
- Núñez Ravelo, F. (2014). Effects of microbiotic crust on soil properties, South of the “Los Barrancos” creek, Quíbor Valley, Venezuela. *Investigaciones Geograficas*, 84(84), 9–19. <https://doi.org/10.14350/rig.33959>

- Oh, J., Nam, J., Kim, S., & Park, Y. (2019). Influence of tire inflation pressure on the estimation of rating cone index using wheel sinkage. *Journal of Terramechanics*, *84*, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.04.002>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (2023). Propiedades Físicas del Suelo. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es>
- Parvin, N., Coucheney, E., Gren, I.-M., Andersson, H., Elofsson, K., Jarvis, N., & Keller, T. (2022). On the relationships between the size of agricultural machinery, soil quality and net revenues for farmers and society. *Soil Security*, *6*, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100044>
- Peralta, G., Alvarez, C. R., & Taboada, M. Á. (2021). Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, *211*(2020). <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105022>
- Phakdee, S., & Suvanjumrat, C. (2023). Development of a tire testing machine for evaluating the performance of tractor tires based on the soil compaction. *Journal of Terramechanics*, *110*, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.07.002>
- Pulido-Moncada, M., Munkholm, L. J., & Schjønning, P. (2019). Soil & Tillage Research Wheel load , repeated wheeling , and traction effects on subsoil compaction in northern Europe. *Soil & Tillage Research*, *186*(April 2018), 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.005>
- Pupinis, G., & Kurkauskas, V. (2014). ScienceDirect How driving wheels of front-loaded tractor interact with the terrain depending on tire pressures. *53*, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.03.008>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, *314*(November 2017), 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Raper, R. L. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*. *42*, 259–280. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.010>
- Rubio, A. M. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales. 1–96. Sevilla, España. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>

- Sánchez, C. I., Benintende, M. C., & Benintende, S. M. (2019). Cyanobacteria populations in rice soils: rotation effects. *Revista Argentina de Microbiología*, *51*(1), 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2018.01.001>
- Shahgholi, G., & Abuali, M. (2015). Measuring soil compaction and soil behavior under the tractor tire using strain transducer. *Journal of Terramechanics*, *59*, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.007>
- Sheludchenko, B., Šarauskis, E., Kukharets, S., & Zabrodskyi, A. (2022). Graphic analytical optimization of design and operating parameters of tires for drive wheels of agricultural machinery. *Soil and Tillage Research*, *215*(2020). 2-6. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105227>
- Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S. G., & Nowatzki, J. (2018). Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil and Tillage Research*, *175*(2016), 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.001>
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014). Effect of velocity , wheel load and multipass on soil compaction. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *13*(1), 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.004>
- Tamirat, T. W., Pedersen, S. M., Farquharson, R. J., de Bruin, S., Forristal, P. D., Sørensen, C. G., ... Thomsen, M. N. (2022). Controlled traffic farming and field traffic management: Perceptions of farmers groups from Northern and Western European countries. *Soil and Tillage Research*, *217*(2021). 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105288>
- Tian, M., Whalley, W. R., Zhou, H., Ren, T., & Gao, W. (2023). Does no-tillage mitigate the negative effects of harvest compaction on soil pore characteristics in Northeast China? *Soil and Tillage Research*, *233*(2022), 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105787>
- Tofiño Rivera, A. P., Carbono Murgas, R. E., Melo Ríos, A. E., & Merini, L. J. (2020). Effect of glyphosate on microbiota, soil quality and biofortified bean crop in Codazzi, department of Cesar, Colombia. *Revista Argentina de Microbiología*, *52*(1), 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.01.006>

- Torres, J., Gutierrez, J. A., & Beltran, H. A. (2017). *Compactación , Una de las causas más comunes de la degradación del suelo* *Compaction , One of the most common causes of soil degradation.* (3), 18–22. [http://revistas.ucundinamarca.edu.co/index.php/Ciencias\\_agropecuarias/article/view/225](http://revistas.ucundinamarca.edu.co/index.php/Ciencias_agropecuarias/article/view/225)
- Van den Akker, J. J. H., & Hoogland, T. (2011). Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands. *Soil and Tillage Research*, 114(2), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.04.002>
- Vázquez, M. B., Amodeo, M. R., & Bianchinotti, M. V. (2016). Estimación de la biomasa fúngica en un suelo del sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) con una tinción directa con blanco de calcoflúor. *Revista Argentina de Microbiología*, 48(3), 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.05.006>
- Ward, M., McDonnell, K., Metzger, K., & Forristal, P. D. (2021). The effect of machine traffic zones associated with field headlands on soil structure in a survey of 41 tilled fields in a temperate maritime climate. *Soil and Tillage Research*, 210( 2019), 104938. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104938>
- Zabaloy, M. C. (2021). One Health: soil health and its link with human health. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(4), 275–276. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2021.11.001>
- Zhou, X., Wu, H., Koetz, E., Xu, Z., & Chen, C. (2012). Soil labile carbon and nitrogen pools and microbial metabolic diversity under winter crops in an arid environment. *Applied Soil Ecology*, 53(1), 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.11.002>



## ANEXOS

Anexo 1. Figura de croquis experiemntal

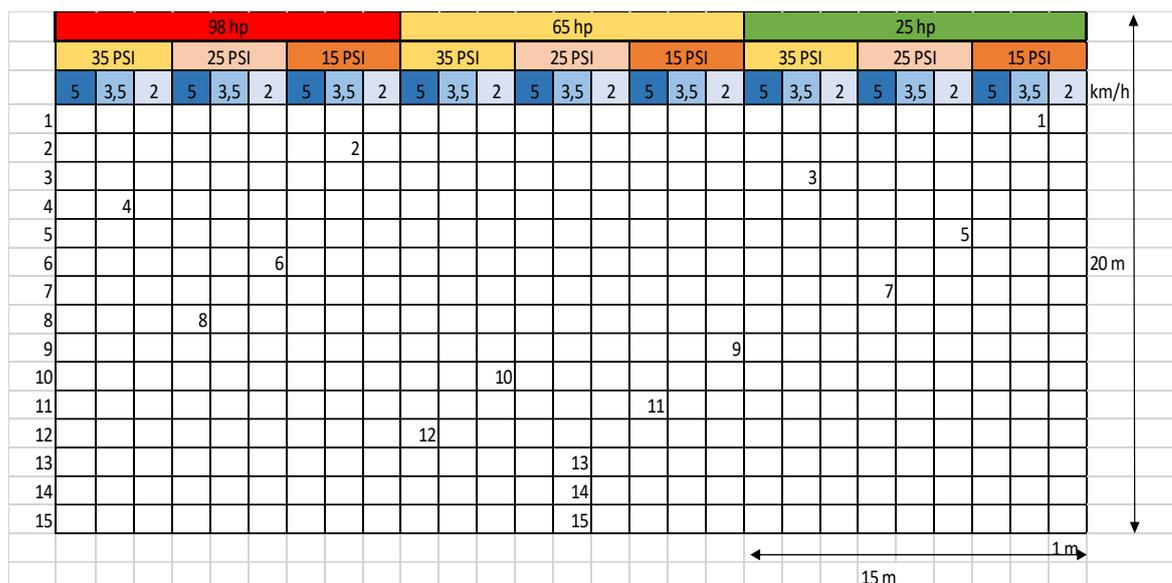


Figura 27. Croquis de distribución de tratamientos y su ubicación dentro del campo experimental

Anexo 2. Resultados de laboratorio

Tabla 22

Base de datos y distribución de tratamientos diseño Box Behnken 3 factores

Nº	Bloque	Potencia	Presión de inflado	Velocidad	Densidad aparente	Porosidad %	Resistencia a la penetración	Micro-organismos
		Hp	psi	km/h	g/cm <sup>3</sup>	V. Angular	kPa	UFC
1	1	25	15	3,5	1,61	38,79	680	7380
2	1	98	15	3,5	1,74	31,17	1250	4200
3	1	25	35	3,5	1,77	35,18	710	7210
4	1	98	35	3,5	1,89	32,37	1320	4200
5	1	25	25	2	1,54	40,33	730	7330
6	1	98	25	2	1,93	31,41	1330	4150
7	1	25	25	5	1,76	35,41	670	7300
8	1	98	25	5	1,66	37,67	1250	4250
9	1	61,5	15	2	1,79	34,73	1180	6200
10	1	61,5	35	2	1,99	29,93	1290	6090
11	1	61,5	15	5	1,87	32,85	1200	6100
12	1	61,5	35	5	1,65	37,91	1280	6080
13	1	61,5	25	3,5	1,69	37,00	1270	6050
14	1	61,5	25	3,5	1,67	37,45	1278	6090
15	1	61,5	25	3,5	1,67	37,45	1280	6090

En la tabla 23 se aprecia los resultados de las muestras fueron analizados en el laboratorio de Suelos del INIA Estación Salcedo que cuenta con certificación del

INACAL al margen de que en el diseño Box Behnken no contempla muestra testigo o inicial para el análisis, se tomó una muestra testigo antes del inicio del experimento, es decir una muestra no perturbada al costado del campo de cultivo donde se realizó el mismo procedimiento de análisis donde el resultado es como sigue:

Tabla 22

*Resultado de muestras testigo o inicial del suelo en campo no perturbado*

Nº	Potencia hp	Presión de inflado Psi	Velocidad km/h	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>	Densidad Real g/cm <sup>3</sup>	Porosidad %	Resistencia a la penetración kPa	Micro- organismos UFC
0	0	0	0	1,35	2,65	49,05	650	12 100



**INFORME DE ENSAYO**  
N° 12168-22/SU/ILLPA

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

Cliente : Dawes Ramos Alata.  
 Propietario / Productor : Reservado por el Cliente.  
 Dirección del cliente : Av. Juliaca N°931.  
 Solicitado por : Dawes Ramos Alata.  
 Muestreado por : Cliente.  
 Número de muestra(s) : 17 muestras.  
 Producto declarado : Suelo Agrícola.  
 Presentación de las muestras(s) : Cilindros metálicos con tapa de goma.  
 Referencia del muestreo : Reservado por el Cliente.  
 Procedencia de muestra(s) : Puno / Puno / Paucarcolla.  
 Fecha(s) de muestreo : 2022-11-25.  
 Fecha de recepción de muestra(s) : 2022-12-01  
 Lugar de ensayo : LABSAF Illpa.  
 Fecha(s) de análisis : 2022-12-01.  
 Cotización del servicio : 172-22-ILL  
 Fecha de emisión : 2022-12-15

**II. RESULTADO DE ANÁLISIS**

ITEM	1	2	3	4	5	6		
<b>Código de Laboratorio</b>	SU2557-ILL-22	SU2558-ILL-22	SU2559-ILL-22	SU2560-ILL-22	SU2561-ILL-22	SU2562-ILL-22		
<b>Matriz Analizada</b>	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
<b>Fecha de Muestreo</b>	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25		
<b>Hora de Inicio de Muestreo (h)</b>	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)		
<b>Condición de la muestra</b>	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
<b>Código/Identificación de la Muestra por el Cliente</b>	T1 LCV3R3	T1 DM=2	T1 DM=4	T1 DM=6	T1 DM=8	T2 LOV2R2		
<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>LC</b>	<b>Resultados</b>					
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	--	1,86	1,74	1,89	1,93	1,66	1,35
Porosidad	%	--	29,81	26,79	28,67	27,16	37,35	49,05
<b>Análisis de Textura</b>								
Arena	%	--	31	--	--	--	--	--
Limo	%	--	64	--	--	--	--	--
Arcilla	%	--	5	--	--	--	--	--
Clase Textural	--	--	Franco Limoso	--	--	--	--	--
ITEM	7	8	9	10	11	12		
<b>Código de Laboratorio</b>	SU2563-ILL-22	SU2564-ILL-22	SU2565-ILL-22	SU2566-ILL-22	SU2567-ILL-22	SU2568-ILL-22		
<b>Matriz Analizada</b>	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
<b>Fecha de Muestreo</b>	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25		
<b>Hora de Inicio de Muestreo (h)</b>	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)		
<b>Condición de la muestra</b>	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
<b>Código/Identificación de la Muestra por el Cliente</b>	T2 DM=9	T2 DM=10	T2 DM=11	T2 DM=12	T2 DM=13	T2 DM=14		
<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>LC</b>	<b>Resultados</b>					
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	--	1,79	1,99	1,87	1,65	1,69	1,67
Porosidad	%	--	32,45	24,90	29,43	37,75	36,22	36,98
<b>ITEM</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>		
<b>Código de Laboratorio</b>	SU2569-ILL-22	SU2570-ILL-22	SU2571-ILL-22	SU2572-ILL-22	SU2573-ILL-22	--		
<b>Matriz Analizada</b>	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	--		
<b>Fecha de Muestreo</b>	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25	2022-11-25	--		
<b>Hora de Inicio de Muestreo (h)</b>	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)	11:00 (*)	--		
<b>Condición de la muestra</b>	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	--		
<b>Código/Identificación de la Muestra por el Cliente</b>	T2 DM=15	T3 DM=1	T3 DM=3	T3 DM=5	T3 DM=7	--		
<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>LC</b>	<b>Resultados</b>					
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	--	1,67	1,61	1,77	1,54	1,76	--
Porosidad	%	--	36,98	39,24	33,20	41,88	33,58	--



**III. METODOLOGIA DE ENSAYO**

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Densidad aparente	Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, División of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, octubre 1988, 195p. método del hidrómetro

**V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO**

El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Jorge Cervantes Rojas, Representante del Laboratorio del LABSAF Sede Illpa

Freddy Lope Duesñas  
 Director de Estación Experimental Agraria Illpa  
 FIN DE INFORME DE ENSAYO

Figura 28. Resultados del análisis de suelo

Fuente: Laboratorio de Suelos INIA-Estación Salcedo

Tabla 23

*Resultados del análisis microbiológica del suelo según tratamientos*

<b>Bloque N°</b>	<b>Potencia Hp</b>	<b>Presión de inflado PSI</b>	<b>Velocidad km/h</b>	<b>Microorganismos UFCs</b>
1 1	25	15	3,5	7300
2 1	98	15	3,5	4200
3 1	25	35	3,5	7210
4 1	98	35	3,5	4200
5 1	25	25	2	7330
6 1	98	25	2	4150
7 1	25	25	5	7300
8 1	98	25	5	4250
9 1	61,5	15	2	6200
10 1	61,5	35	2	6090
11 1	61,5	15	5	6100
12 1	61,5	35	5	6080
13 1	61,5	25	3,5	6050
14 1	61,5	25	3,5	6090
15 1	61,5	25	3,5	6090

Fuente: Laboratorio de Microbiología FMVZ-UNA-PUNO



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO**  
**FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA**



**ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE SUELOS**

MUESTRA : Suelo agrícola  
PROCEDENCIA : Centro Experimental Illpa  
INTERESADO : Dawes Ramos Alata  
MOTIVO : Análisis microbiológico  
MUESTREO : 25 de abril 2023  
ANÁLISIS : 25 de abril 2023

**RESULTADOS**

Nº	<i>Rhizopus</i> sp.	<i>Verticilium</i>	<i>Bacillus</i> sp.	Recuento total
1	4410	350	2620	7300
2	1260	2530	410	4200
3	4300	350	2560	7210
4	1260	2530	410	4200
5	4410	350	2620	7380
6	1260	2530	410	4200
7	4410	350	2620	7380
8	1260	2630	420	4200
9	1950	1820	1890	6200
10	1950	1820	1890	6090
11	1940	1830	1900	6100
12	1950	1820	1890	6100
13	1950	1820	1890	6080
14	1960	1830	1900	6090
15	1950	1820	1890	6090
M0	5040	510	5670	12100

**MÉTODO.** Recuento total de microorganismos psicrófilos, Recuento de *Rhizopus* sp, Recuento de *Bacillus* sp  
Recuento de *Verticilium* sp

**Observaciones:** La muestra fue recepcionada en el laboratorio

Puno, 05 de mayo del 2023



Dr. Mg. MVZ Alberto Ccama Sulca

Jefe del laboratorio de Microbiología FMVZ

Figura 29. Imagen del análisis Microbiológico del suelo

Fuente: Laboratorio de Microbiología FMVZ-UNA-PUNO

Anexo 3. Figuras de instrumental y equipo utilizado



Figura 30. Imagen de un penetrometro actual analógico.



Figura 31. Muestreo del suelo en la parte central de la huella



*Figura 32.* Imagen de los microorganismos en el suelo sin perturbar

Fuente: Laboratorio de Microbiología FMVZ-UNA-Puno



*Figura 33.* Tractores utilizados de Izq. A Der Mitsubishi de 25 hp, New Holland TT65 de 65hp y New Holland TD 95D de 98hp

Tabla 24  
*Marcas, características técnicas de los 3 tractores en estudio*

DATOS TECNICOS	98HP	65HP	25HP
Marca	New Holland	New Holland	Mitsubishi
Procedencia	Turquía	India	Japon
TIPO	4X4	4X4	4X4
Modelo	NHTD95PLUS	TT65	MT25
Año de fabricación	2012	2012	2010
% de carga eje frontal	40 %	40 %	40 %
% de carga eje posterior	60 %	60 %	60 %
MASA	4300 Kg.	2300 Kg.	1000 Kg.
Masa del arado	926 kg.	732 kg.	160 kg.
Masa total	5226 kg.	3032 kg.	1160 Kg
Rueda frontal	360/70 R24 36cm.	280/70 R24 28cm.	170/70 R14 17cm.
Rueda posterior	480/70 R34 48cm.	420/70 R30 42cm.	280/85 R24 28cm.
Carga del eje delantero	2090,4 kg	1212,8 kg	464 Kg
Carga del eje posterior	3135,6 kg	1819,2 kg	696 Kg
Carga de rueda frontal	1045,2 kg.	606,4 kg.	232 kg.
Carga de rueda posterior	1567,8 kg.	909,6 kg.	348 kg.
Área de contacto rueda frontal	1296 cm <sup>2</sup>	784 cm <sup>2</sup>	289 cm <sup>2</sup>
Área de contacto rueda posterior	2304 cm <sup>2</sup>	1764 cm <sup>2</sup>	784 cm <sup>2</sup>
Presión del eje frontal	1,612 kg/cm <sup>2</sup>	1,547 kg/cm <sup>2</sup>	1,605 kg/cm <sup>2</sup>
Presión del eje posterior	1,361 kg/cm <sup>2</sup>	1,031 kg/cm <sup>2</sup>	0,888 kg/cm <sup>2</sup>
Presión estática del tractor	1,487 kg/cm <sup>2</sup>	1,289 kg/cm <sup>2</sup>	1,247 kg/cm <sup>2</sup>
Potencia en HP	98	65	25
Relación peso potencia kg/hp	53,33	46,65	46,40



Figura 34. Reparto de pesos estáticos en tractores de cuatro ruedas motrices desiguales



Figura 35. Horotacometro de tractor donde se regula según las rpm la velocidad de avance.



Figura 36. Instrumento de medición digital de presión de neumáticos en libras por pulgada cuadrada (psi)



*Figura 37.* Neumático posterior tractor de 65hp de 420mm de ancho por 85% de alto y radial de 30 pulgadas de diámetro interior



*Figura 38.* Lectura de la profundidad de huella del tractor de 98 hp



*Figura 39.* Imagen del ancho efectivo del neumático radial tractor de 98 hp



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Dawes RAMOS ALATA,  
identificado con DNI 01319362 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ EFFECTO DE LA MASA, VELOCIDAD DE AVANCE Y PRESIÓN DE INFLADO  
DE NEUMÁTICOS DEL TRACTOR SOBRE LA COMPACTACIÓN DEL  
SUELO AGRÍCOLA ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 17 de noviembre del 2023



FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Dawes Ramos Alata  
identificado con DNI 01319362 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ EFEECTO DE LA MASA, VELOCIDAD DE AVANCE Y PRESIÓN DE INFLADO DE NEUMÁTICOS DEL TRACTOR SOBRE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 17 de noviembre del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella