



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Sistema Biomecánico a Tracción Animal (SIBIOTA) para la Labranza Agrícola en el Altiplano CundiBoyacense.

Hugo Samuel Sanhueza Leal

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2020

Sistema Biomecánico a Tracción Animal (SIBIOTA) para la Labranza Agrícola en el Altiplano CundiBoyacense.

Hugo Samuel Sanhueza Leal

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Agrícola

Director:

Ingeniero Agrícola, MSc. Oscar Leonardo García Navarrete

Codirector:

Ingeniero Agrícola, MSc, Ph.D. Hugo A. González Sánchez

Línea de Investigación:

Manejo sostenible de suelo y agua (TT)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2020

*“Este trabajo se dedica a todos los agricultores que aspiran
a un mejor bienestar”*

Agradecimientos

“Para todos aquellos quienes brindaron su apoyo incondicional para la realización de este proyecto, y aportaron con su valioso tiempo e ideas para el logro de los objetivos, en nombre de los pequeños y medianos agricultores de la región andina Cundi-Boyacense, quedamos infinitamente agradecidos”.

Especial agradecimiento para los Profesores Oscar García, director de la tesis, UNAL sede Bogotá y Hugo González, Codirector de la tesis, UNAL sede Medellín, por sus invaluable contribuciones al desarrollo de la presente tesis.

Colaboradores:

- Ingeniero Elkin Cortés, Profesor Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de Ingeniería Agrícola.
- Doctor Medicina Veterinaria Jorge Mario Cruz A., Profesor Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Docente Departamento de Producción Animal.
- Ingeniero Jairo Caballero, MSc, Ingeniero Electrónico.
- Ingeniero Robinson Osorio, PhD, Profesor Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ingeniería Civil y Agrícola, Departamento de Ingeniería Agrícola.
- Ingeniero José Dörner, PhD, Departamento de Suelos, Universidad Austral de Chile.
- Ingeniero Jorge Riquelme, Ingeniero Agrónomo, PhD.
- Álvaro McAllister, Agricultor.
- Andrés Cantillo, Agricultor.
- Nelson Díaz Rodríguez, Pequeño ganadero.
- María Beatriz Duque Zúñiga, Diseñadora Industrial.
- Andres Linares Velandia, Operador/Palafrenero.

Derechos de Autoría

Yo, Hugo Samuel Sanhueza Leal, mayor de edad y con cédula de extranjería número 307315 de Bogotá, declara bajo juramento que las máquinas a tracción animal utilizadas durante el estudio son de mi propio diseño, fabricación y propiedad.

A través de la presente declaración es mi intención no ceder los derechos de propiedad intelectual a la Universidad Nacional de Colombia – Bogotá, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual y su reglamento.

NOTA DEL AUTOR

Calificaciones educacionales y laborales de Hugo Sanhueza Leal:

Ingeniero agrónomo y productor agrícola, con vasta experiencia laboral y múltiples calificaciones en áreas de: desarrollo agrícola y rural, diseño y fabricación de maquinaria agrícola a tracción animal, producción equina de tiro pesado, producción orgánica de frutas y hortalizas, producción lechera y porcina, y asesorías a pequeños y medianos agricultores. Especialista en transferencia y difusión de la tecnología de mecanización agrícola a tracción animal para pequeños y medianos agricultores. Graduado del sistema educacional vocacional agrícola de la República de Chile y del programa de agronomía de la Universidad de Nebraska-Lincoln (USA). Graduado del programa de maestría en Estudios Latinoamericanos de la Universidad de Arizona–Tucson (USA). Agricultor y productor de hortalizas y frutas orgánicas. Posee vasta experiencia en el uso y promoción de la tracción animal con caballos de tiro pesado, crianza de equinos de tiro pesado y diseño de implementos y maquinaria agrícola para uso con equinos.

Resumen

La finalidad de la investigación fue determinar si el uso de caballos de tiro pesado es viable agronómica, socioeconómica, energética y ambientalmente, en la región oriental de los Andes Colombianos. Se eligió el rayado de praderas como una práctica de labranza preferencial, por su potencial para mejorar la porosidad del suelo y la producción de forrajes de mayor calidad. Durante el estudio, se utilizó un Sistema Biomecánico de Labranza a Tracción Animal (SIBIOTA) compuesto de caballos de tiro, carro de enganche y herramienta de labranza. Para el registro y medición de la fuerza de tiro y profundidad de trabajo de la herramienta, se utilizó un sistema de medición electrónica en tiempo real (datalogger-SMETR), diseñado y fabricado a medida para este estudio. Para medir el ritmo cardíaco y la velocidad de trabajo de los animales durante la labranza, se utilizó un sistema de registro integrado por un reloj POLAR y una cinta equina. Las pruebas se realizaron en diferentes condiciones de suelo y altitudes (msnm) y se determinó el porcentaje de humedad del suelo al momento de comenzar los trabajos de labranza y se utilizó una veleta de cizalla para determinar la resistencia al corte, para relacionarlo con el comportamiento de las herramientas y el rendimiento de los animales. El resultado de medición más óptimo fue U.E. #2, donde los caballos de tiro registraron un peso medio combinado de 12552,51 N (1.280 kgf), y jalaban una carga de 7639,38 N (779 kgf) (SIBIOTA); aproximadamente el 17% del peso vivo de cada uno, generando una fuerza media de tiro de 2.260,1 N para una potencia de 2519,4 W (3,4 HP). El SIBIOTA, puede desempeñarse eficazmente en suelos pesados y altitudes de 2560 a 3400 msnm, demostrando su capacidad para labrar suelos de alta resistencia a la penetración/corte a profundidades de 15cm. El peso del SIBIOTA causó un impacto menor de compactación, contribuyendo al empleo de prácticas de labranza de conservación. En resumen, el uso de sistemas como el SIBIOTA, son una fuente confiable y económica de energía (animal) para desempeñar múltiples tareas agrícolas con mínimo impacto ambiental en la región andina de Colombia.

Palabras clave: caballos o equinos de tiro, tracción animal, labranza, medición electrónica de fuerza, maquinaria e implementos a tracción animal, agricultura familiar.

Abstract

The purpose of the present study was to determine if the use of the draft horses is agriculturally, socio-economically, energetically and environmentally, viable in the oriental region of the Colombian Andes. Light (surface) tilling of pastures was selected as a good farming practice for increasing the porosity of the soil and stimulating greater and better-quality forage. A mechanical prototype of an Animal Drawn Biomechanical System for tilling the soil (ADBIS), composed of a work-cart, draft horses and horse drawn implements, was used for the study. To register and measure draft force, speed and the animals heart rate, an electronic measuring system (datalogger) was designed and built for this study. To measure heart rate and animal speed during tillage, a registering integrated system composed by a Polar sport watch with equine band, was used for this purpose. The tests were conducted under different soil conditions and altitude (a.s.l.), an on-farm soil sampling were taken to determine the level of soil humidity present in the soil prior to begin tilling the land, and a vane shear tool was used to determine soil shear resistance at various depths, to compare tool and animal performance. The most optimum measurements result was obtained in E.U. #2, where draft horses registered a combined body weight of 12552,51 N (1.280 kg) and pulled a weight of 7639,38 N (779 kgf) (ADBIS), corresponding to a 17% of their body weight and registering a draft power of approximately 2260,1 N with a potency of 2519,4 W (3,4 HP). The ADBIS can effectively perform in heavy soils and altitudes between 2560 and 3400 meters (a.s.l.), demonstrating the capacity to till in highly compacted and shear resistance soil at a depth of 15cm. The ADBIS lighter weight (compared to a tractor) caused a reduced soil compaction and contributed to the employment of soil conservation practices. In conclusion, the use of systems like ADBIS are a reliable and economical source of animal energy that can perform multiple agricultural tasks with a minimal environmental impact in the Andean region of Colombia.

Keywords: draft horses, animal traction, animal tillage, datalogger, draft force, animal drawn machinery, horse-farming

Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	23
General.....	23
Problema principal	24
Importancia de la investigación	25
1 CAPÍTULO: ANTECEDENTES	26
1.1 General.....	26
1.2 La agricultura andina.....	26
1.2.1 Implicaciones socioculturales	28
1.2.2 Futuro y la competitividad de la agricultura Cundi-Boyacense	30
1.3 Tecnología de la Tracción Animal.....	31
1.4 Mecanización agrícola con caballos de tiro	34
1.5 Caballar de tiro	35
1.5.1 Alimentación, cuidados y manejo	39
1.5.2 Reproducción del caballar de tiro	41
1.6 Labranza agrícola con caballos de tiro pesado	43
1.6.1 Dinámica del tiro caballar	44
1.6.1.1 Fuerza de Tiro.....	44
1.6.1.2 Potencia de tiro	45
1.6.1.3 Angulo de tiro.....	50
1.6.1.4 Angulo de ataque	51
1.6.1.5 Línea de tiro	51
1.6.1.6 Centro de resistencia al tiro	51
1.6.2 Capacidad y rendimiento del caballo de tiro	52
1.6.3 Tracción animal con caballos de tiro	54
1.6.4 Capacidad Teórica vs Capacidad Efectiva vs Eficiencia de Campo	56
1.6.4.1 Capacidad teórica.....	56
1.6.4.2 Capacidad efectiva	57
1.6.4.3 Eficiencia de campo.....	57
1.6.5 Caballos de tiro como generadores de energía	57
1.6.6 Capacidad y rendimiento del caballo de tiro pesado.....	62
1.7 Factores que influyen en la labranza agrícola con tracción animal.	64
1.7.1 Suelo.....	64
1.7.2 Calidad del suelo	66
1.7.3 Indicadores de calidad	67

1.7.3.1	Indicadores físicos.....	67
1.7.3.2	Indicadores Químicos.....	72
1.7.3.3	Indicadores Biológicos	73
1.7.4	Fertilidad del suelo.....	75
1.7.5	Resistencia al corte/penetración	76
1.8	Herramienta(s) de labranza primaria.....	77
1.8.1	Cinzel parabólico.....	77
1.8.2	El disco de corte	78
1.9	Labranza agrícola en laderas.....	79
1.10	Costos asociados con el uso de caballos de tiro	80
1.10.1	General.....	80
1.10.2	Costos.....	81
1.10.3	Costos adicionales.....	82
1.11	Capacidad artesanal y semi-industrial para fabricación y reparaciones de herramientas agrícolas.....	86
1.12	Transferencia y adopción de la tecnológica a tracción animal	87
2	CAPITULO: OBJETIVOS	89
2.1	Objetivo principal.....	89
2.2	Objetivos específicos.....	89
2.3	Hipótesis.....	89
3	CAPITULO: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	91
3.1	Pruebas de Fuerza.....	91
3.2	Pruebas de penetración/resistencia al corte con tracción animal	95
3.3	Costos de mecanización con caballos de tiro	96
3.4	Labranza en los suelos del altiplano con tracción animal.....	97
3.5	Evaluación de Implementos agrícolas.....	97
3.6	Pruebas de evaluación energética e impacto medio ambiental.....	98
4	CAPITULO: MATERIALES Y METODOS	101
4.1	Ubicación.....	101
4.1.1	Unidad experimental N°1. Finca La Represa.....	101
4.1.2	Unidad experimental N°2. Finca Garda.....	102
4.1.3	Unidad experimental N°3. Finca Doña Luna	102
4.1.4	Unidad experimental N°4. Centro Agropecuario "MARENGO" (CAM), Lotes 1 y 2... ..	102
4.2	Componentes y Materiales del Sistema de Medición Electrónica en Tiempo Real (SMETR).....	103
4.3	Componentes y Materiales del Sistema Biomecánico de Labranza a Tracción Animal (SIBIOTA)	105
4.4	Pesajes y mediciones	107
4.5	Variables e instrumentación de evaluación.....	108
4.6	Metodología.....	111
4.6.1	Diseño experimental	111
4.6.2	Pruebas de campo.....	112
4.6.3	Evaluación de Potencia de tiro, Efectividad y Eficiencia de campo e Impacto tecnológico del SIBIOTA en el altiplano Cundi-Boyacense	114
4.6.4	Análisis estadístico	116

4.6.4.1	Pruebas estadísticas	116
4.6.4.2	Normalización de los datos para la construcción de las Gráficas	117
5	CAPITULO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	118
5.1	Construcción de un dispositivo electrónico	118
5.2	Instalación del SMETR	119
5.3	Pruebas de calibración del SMETR: Resultados y visualización	125
5.4	Visualización de la información con Polar Flow	127
5.5	Funcionamiento del SIBIOTA y sus componentes.....	128
5.6	Resultados de las mediciones de campo	130
5.6.1	U.E. No 1. Finca “La Represa”- Ganadería Grajales.....	130
5.6.2	U.E. No 2. Finca Garda (Criadero Los Brabantes).....	134
5.6.3	U.E. No 3. Finca “Doña Luna”	137
5.6.4	U.E. No 5. Centro Agropecuario “Marengo”	140
5.7	RESUMEN Tabla 5-6	148
5.8	Evaluación del concepto SIBIOTA.....	157
5.8.1	Carro de enganche con cincel parabólico	158
5.8.2	Cinzel parabólico con disco de corte	159
5.9	Desempeño y rendimiento de los caballos de tiro pesado.....	160
5.10	Evaluación de la compactación/resistencia al corte y/o penetración	163
5.11	Factor “Kikuyo”	164
5.12	Correlación velocidad – fuerza – potencia.....	164
5.13	Impacto de la tecnología de mecanización a tracción animal	165
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	174
6.1	CONCLUSIONES	174
6.1.1	General.....	174
6.2	RECOMENDACIONES.....	178
	BIBLIOGRAFÍA.....	209

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Trabajadores agrícolas fumigando un cultivo de papa con el sistema “Maruyama”	30
Figura 1-2: Productividad vs. Nivel de tecnología vs. Trabajo manual.....	33
Figura 1-3: a) siembra de papa con un caballo de tiro liviano en una ladera cerca del valle de Ubaté; b) transporte de pasto de corte; c) transporte de flores desde las áreas de producción al galpón de empaque; y d) transporte de leche.....	34
Figura 1-4: Avenir d’ Herse, famoso reproductor Brabante y Campeón Nacional Belga 1925	36
Figura 1-5: Caballo de tiro ligero (reproductor de tiro pesado X yegua criolla).....	37
Figura 1-6: Caballo $\frac{3}{4}$ percherón.....	38
Figura 1-7: Reproductor joven de la raza “Brabante” de tiro pesado	38
Figura 1-8: Famoso reproductor de tiro de la raza Belga, “Farceur” 7332 (72924)	42
Figura 1-9: a) Sembradora de granos y b) arados diseñados por Jethro Tull-1718.....	43
Figura 1-10: Arado múltiple de rastrojo	48
Figura 1-11: Principales fuerzas que actúan en el tiro animal.....	50
Figura 1-12: Fuerzas externas que impactan en el caballo durante su esfuerzo tractivo	55
Figura 1-13: Caballos utilizando arneses de pechera	59
Figura 1-14: Caballo de la raza Brabante con arnés de collar y yugos de tubo metálico	59
Figura 1-15: a) Angulo natural del hombro; b) Collar montado sobre los hombros	60
Figura 1-16: Reproductor de la raza italiana de caballo de tiro	61
Figura 1-17: Capa arable del suelo (cama de siembra) y horizontes A, B y C.....	66
Figura 1-18: Relación contenido de humedad del suelo vs. resistencia al corte. En un suelo friable entre LC y LIP la resistencia al corte es menor y facilita el laboreo	70
Figura 1-19: Zona “pie de arado”	71
Figura 1-20: a) Rayado de potrero en ladera con un cincel pequeño b) aporcando un cultivo en hilera en ladera	79
Figura 1-21: Modelo Multisectorial de Transferencia y Fomento a la Tracción Animal.....	88
Figura 3-1: Dinamómetro pequeño para medir la fuerza de tiro de dos animales con cargas normales	92
Figura 3-2: Dinamómetro móvil montado sobre chasis de un camión Ford	92
Figura 3-3: Dinamómetro Integrador de Tracción Iowa	93
Figura 3-4: ” Dinamómetro Integrador de Tracción Animal - Iowa” acoplado a un implemento agrícola.....	93
Figura 4-1: Ubicación de las Unidades experimentales	101

Figura 4-2: Celda de carga tipo S	104
Figura 4-3: Polar M400 con cinta equina y dispositivo BT	104
Figura 4-4: Apero de trabajo tipo “Amish”	107
Figura 4-5: a) Pesaje de caballos y b) maquinaria.....	108
Figura 4-6: Veletas: tamaño pequeña, mediana y grande.....	108
Figura 4-7: Prueba “organoléptica” de textura y tipo de suelo	109
Figura 5-1: El sistema de medición SMETR, instalado en el sistema biomecánico a tracción animal (SIBIOTA): Sensor “Sharp” para la medición de profundidad/distancia; celda de carga, para la medición de fuerza/carga; banda equina -“POLAR”, para la medición del ritmo cardiaco, velocidad y dirección de trabajo y altura del terreno (GPS); reloj – POLAR; y caja con sistema para registro de datos.....	119
Figura 5-2: a) y b) Celda de carga posicionada entre el carro de enganche y los balancines.....	120
Figura 5-3: Componentes del dispositivo electrónico para registro de variables	121
Figura 5-4: Prototipo de medición para operación en campo.....	121
Figura 5-5: Prensa hidráulica automática (Shimadzu, Japón) usada en la calibración de la celda de carga.....	122
Figura 5-6: Sensor de distancia montado en el cincel parabólico a profundidad máxima de trabajo.	124
Figura 5-7: Visualización de la ruta de los animales registrada por el sistema de monitoreo equino. Finca Garda, Guasca.....	127
Figura 5-8: Visualización de los datos del animal registrada por el sistema de monitoreo equino	127
Figura 5-9: Herramienta de cincel para “romper” o roturar el suelo	129
Figura 5-10: Ubicación de la parcela de ensayo en Zipaquirá	131
Figura 5-11: Ubicación de la parcela de ensayo, Guasca, Cundinamarca	136
Figura 5-12: Ubicación de la parcela de ensayo	138
Figura 5-13: Ubicación de la parcela de ensayo, Marengo (sector A)	141
Figura 5-14: Acabado de la labranza muy irregular (accidentado) en Marengo sector B, debido a que el cincel solo logró profundizarse en el suelo entre 6 y 8 cm, produciendo pedazos de cespedones.	145
Figura 5-15: Imagen térmica de un equino tomada con el sistema FLIR.....	154
Figura 5-16: Cincel parabólico con disco de corte y servo hidráulico.....	160

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Contribución Proporcional Total de Fuerza Utilizada en Selectas Regiones - (%).....	29
Tabla 1-2: Requerimientos de Potencia Animal en HP con Arado de Rastrojo en Suelo de Mediana Textura.....	47
Tabla 1-3: Potencia estimada del caballo de tiro	49
Tabla 1-4: Resultados de Pruebas de Fuerza de Tiro con Varios Implementos Agrícolas.....	63
Tabla 5-1: Correlación de Pearson para U.E. #1	132
Tabla 5-2: Correlación de Pearson para U.E. #2	135
Tabla 5-3: Correlaciones de las Variable Medidas para la U.E. #3	139
Tabla 5-4: Correlación de variables medidas para U.E. #4 ^a (Sector A).....	143
Tabla 5-5: Correlaciones de las variables medidas para U.E. #4B (lote 2).....	144
Tabla 5-6: Mediciones (promedio) de Potencia para un Cincel Parabólico con 2 Caballos de Tiro de 640 kg.....	148

Lista de gráficas

Gráfica 5-1: a) Curva característica de la celda de carga, b) Incertidumbre en la medición de fuerza	123
Gráfica 5-2: a) Curva característica profundidad de trabajo, b) Incertidumbre en la profundidad de trabajo.....	124
Gráfica 5-3: Datos de fuerza [N], profundidad de trabajo [cm] y ritmo cardiaco (RC en ppm) en un recorrido de 905 [m], en 15 minutos de operación.....	126
Gráfica 5-4: Datos de fuerza (línea continua) y profundidad de trabajo del cincel parabólico (línea punteada) durante un recorrido típico.	126
Gráfica 5-5: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca La Represa.....	132
Gráfica 5-6: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca Garda.....	135
Gráfica 5-7: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca Doña Luna	139
Gráfica 5-8: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca Marengo (sector A)	142
Gráfica 5-9: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca Marengo (sector B)	144
Gráfica 5-10: Diagrama de caja para la Fuerza de tiro (N) para todas las unidades experimentales	152
Gráfica 5-11: Diagrama de caja para la Velocidad (km/h) para todas las unidades experimentales	153
Gráfica 5-12: Diagrama de caja para el Ritmo Cardiaco (ppm) para todas las unidades experimentales.....	155
Gráfica 5-13: Diagrama de caja para la Potencia (kW) para todas las unidades experimentales .	157

INTRODUCCIÓN

General

El uso de animales de tiro es cada vez más apropiado en el contexto del desarrollo sostenible y respetuoso del medio ambiente. Frente a la creciente necesidad por producir más y mejores alimentos, es necesario considerar fuentes de energías alternativas, cuya capacidad se base en el uso eficiente de recursos locales renovables. La integración de la tracción animal con caballos de tiro en la agricultura local y nacional puede generar oportunidades de desarrollo sostenible a menor costo, reducido consumo de combustibles fósiles y creación de oportunidades de empleo para la fuerza laboral rural, no-calificada.

La agricultura familiar del pequeño productor del altiplano Cundi-Boyacense podría describirse como muy tradicional y utiliza mínimamente tecnologías modernas que le permitan realizar sus trabajos de manera oportuna y eficiente. Este tipo de agricultura se caracteriza por ser de minifundio, con alta dependencia en mano de obra no calificada, con uso generalizado de herramientas manuales tradicionales, tales como, el azadón, de recursos extremadamente limitados con la carencia de capital en efectivo para la compra de insumos y servicios agrícolas, tales como, arriendo de servicio de tractor con su implemento, una educación formal limitada, y posee un fuerte arraigo a conocimientos ancestrales. La gran mayoría de los pequeños agricultores de la región, se dedican a la producción de papa y ganadería de doble propósito en pequeñas propiedades, como vehículo de subsistencia. Según Juan Pablo Díaz Granados, presidente de la Agencia de Desarrollo Rural de Colombia: “No puede olvidarse que más del 86% de los productores del país son de economía campesina” (Revista Semana, 2018a) y en la región Cundi-Boyacense particularmente, reside aproximadamente el 37% de la población rural nacional (DANE, 2014, p. 7).

La productividad del pequeño productor está directamente asociada a su capacidad física para realizar el trabajo agrícola y/o ganadero, el cual se limita a 8-10 horas diarias, como mínimo. Para aumentar su productividad, el pequeño productor agropecuario necesitaría de herramientas que le permitan utilizar su tiempo disponible más eficientemente “El rendimiento por área puede ser un indicador de la producción y su constancia de la producción, pero la productividad también puede ser medida por unidad de labor o trabajo, por unidad de inversión de dinero, en relación con necesidades o en una forma de coeficientes energéticos” (Altieri & Nicholls, 2000, p. 26).

En promedio, las fincas pequeñas tienen aproximadamente 2,3 fanegadas (1,472 ha.) (DANE, 2014, p. 67). Dicha información indica que el minifundio define el mosaico de la tenencia de la tierra en la región andina Cundi-Boyacense (IGAC, 2005).

A pesar de que el actual sistema de tenencia de la tierra permite que un significativo porcentaje de la población nacional resida y labore en el sector rural, el pequeño tamaño de sus fincas/terrenos en términos actuales, se consideran un obstáculo o impedimento a las oportunidades de desarrollo agropecuario, ya que no facilitan el empleo de modernos esquemas de sistemas productivos y limitan la adopción de tecnologías modernas de mecanización agrícola (Cruz León, 1997; IGAC, 2005, p. 39).

Problema principal

Los pequeños y medianos productores (y trabajadores agrícolas) muestran una baja eficiencia productiva debido a la carencia, entre otras cosas, de tecnologías de mecanización agrícola, que les permita un uso multifuncional en la producción de cultivos, pastos, etc. y que facilite técnicas de conservación para contrarrestar el creciente deterioro físico de los suelos andinos, especialmente de aquellos ubicados en laderas.

Esto lo confirma el reciente Censo Agropecuario realizado por el DANE, en 2014, quien encontró que solo el 16% de las unidades productivas agrícolas, utilizan tecnologías de mecanización.

Hoy en día, la oferta tecnológica en mecanización agrícola se limita al uso de tractores con su asociada maquinaria e implementos. El uso de la tracción animal para realizar la labranza para la

siembra de pastos y cultivos como la papa, está limitado al uso de bueyes y en menor importancia a los caballos de tiro. En gran proporción, la agricultura regional es altamente dependiente de la mano de obra no calificada, la cual utiliza herramientas manuales, como el azadón, gambias, picas, etc. para todas las fases de la producción agrícola.

Como preocupación adicional al tema de la baja productividad es el creciente problema del éxodo de los jóvenes hacia los centros urbanos en busca de mejores oportunidades de empleo y calidad de vida. Las oportunidades de progreso en los sectores rurales a nivel nacional son muy escasas y se aspira a que la tecnología a tracción animal pueda estimular oportunidades de empleo en el sector rural local y así limitar el éxodo de jóvenes hacia los grandes centros urbanos y ofrezca oportunidades de aprendizaje y capacitación en el área de la mecanización agrícola con animales de tiro.

Importancia de la investigación

A través de la investigación se trató de resolver las siguientes interrogantes acerca de la tracción animal con caballos de tiro: primero, desmitificar el uso de equinos como una práctica anticuada de mecanización agrícola y presentarla como una tecnología de mecanización “renovada” y de gran utilidad para el pequeño (y mediano) agricultor y/o trabajador agrícola; segundo, promoverla como el tipo de tecnología apropiada de bajo costo y de un nivel tecnológico más acorde con las habilidades y educación de los pequeños y medianos agricultores y trabajadores rurales; tercero, acreditarla como una plataforma tecnológica para mejorar la productividad laboral y de fomento al empleo agrícola; cuarto, como una tecnología apropiada de fomento al desarrollo económico rural y para reducir el éxodo de jóvenes hacia los centros urbanos; quinto, justificarla con el empleo de prácticas de labranza de conservación para recuperar, mejorar y proteger los suelos agrícolas de la región; y sexto, identificarla como una excelente fuente de energía alternativa de bajo costo con capacidad para reducir significativamente el uso de combustibles fósiles, la contaminación ambiental y el tráfico de maquinaria pesada sobre los suelos agrícolas y, así reducir la compactación.

1 CAPÍTULO: ANTECEDENTES

1.1 General

Históricamente, el uso de la tracción animal con caballos de tiro en la agricultura latinoamericana no ha sido muy importante. Agricultores de Europa central y oriental que llegaron al Cono Sur a colonizar vastas tierras sureñas a finales de 1800s y principios de 1900s, trajeron consigo la experiencia y tecnología (tracción animal), para abrir el monte virgen y desarrollar sus campos agrícolas, como fuente de expresión cultural agraria. A diferencia del resto de la región Latinoamericana, en donde se continuó con el uso de bueyes como parte de nuestra herencia agraria ibérica, esta manifestación cultural se refleja aún en el panorama actual de la agricultura familiar del altiplano regional, pero con una apreciación menos valorizada e identificada aún más con una “agricultura de pobreza”, que con una actividad agraria de respetable significancia cultural, social y económica.

1.2 La agricultura andina

La agricultura andina contemporánea, podría describirse como muy tradicional, pero con un sector semi-moderno, siendo este último asociado con el uso del tractor y otras prácticas agrícolas modernas como la producción en invernaderos. Se caracteriza por el uso intensivo de mano de obra y una significativa disminución en el empleo de bueyes (y su asociada fuerza laboral), presentando un panorama de estancamiento en su evolución. Un factor muy relevante en la problemática del campo es la visión (o falta de) que se tiene para su desarrollo. El sector rural andino por lo general carece de una planificación con proyección a futuro y objetivos claros alcanzables. El campo es un sector de la economía nacional actualmente descapitalizada, que posee un sector laboral no-calificado, con un nivel tecnológico muy inadecuado para las condiciones locales de terreno y las necesidades de apoyo técnico y una masiva presencia de minifundios (Galindez, 1981, p. 1,3; IGAC, 2014).

Mientras tanto, el campesinado continúa con sus prácticas agrícolas de subsistencia, en pequeñas parcelas y en terrenos escarpados. Muchas de las prácticas agrícolas de los pequeños agricultores son de origen milenario, las cuales se han transmitido entre generaciones y con pocas posibilidades de cambio debido al fuerte arraigo cultural y a la falta de alternativas apropiadas y opciones económicas viables. *“La cultura (rural) y el conocimiento tradicional, por su parte, determinan la manera como el hombre hace uso de sus recursos naturales”* (Valbuena López, 2006, p. 11).

La agricultura Cundi-Boyacense se desarrolla en diferentes pisos térmicos, pero el enfoque de este estudio se limita a alturas entre 2,700 y 3,000 msnm. El clima se define como muy frío, frío, muy húmedo y húmedo, y el entorno se considera más apropiado para la práctica de una agricultura de “secano”, debido a que su ciclo biológico y productivo ésta supeditado a la temporada de lluvias, con temporadas relativamente bien definidas. La práctica exitosa de la agricultura de secano depende principalmente del manejo y la conservación de la humedad, por lo que es muy necesario contar con la maquinaria e implementos que faciliten las labores de labranza oportuna, rápida y eficientemente, para captar las aguas-lluvias y preservarla en el suelo (MacDonald, 1909, pp. 62–162). Sin embargo, se carece de prácticas de labranza dirigidas a la protección y conservación de los suelos agrícolas para garantizar una continua producción de alimentos, para una creciente población urbana y un desarrollo económico rural sostenible. Las terrazas y otras adecuaciones de infraestructura agrícola ancestral han desaparecido, dando lugar a terrenos más amplios permitiendo el uso de la mecanización con animales de tiro (ej. bueyes) y el tractor, creando las condiciones de deterioro del suelo que hoy conocemos. No obstante, la práctica de una agricultura contemporánea tipo europea (latifundio vs. minifundio, alto nivel tecnológico; alto uso de insumos agrícolas; altos rendimientos de las cosechas; producción especializada, cultivos vs ganadería, etc.) persiste a pesar de sus elevados costos tecnológicos y sociales. Las tierras más productivas de carácter comercial, por lo general, se ubican en terrenos más productivos y planos (valles); con suelos muy ricos en materia orgánica debido a la translocación de nutrientes a través de la erosión hídrica (lluvias) que afectan a los suelos en laderas.

La agricultura andina aún no ha dado indicios de una planificación hacia el futuro con el empleo de tecnologías que demanden de un menor consumo de energía fósil para reducir la dependencia en recursos no-renovables y disminuir la polución de origen automotriz (Huerga et al., 2011, p. 2).

1.2.1 Implicaciones socioculturales

El nuevo paradigma de la agricultura andina, es el empoderamiento del pequeño productor para incluirlo en el proceso de desarrollo socioeconómico de la economía rural, como un actor activo en la producción de alimentos, por sus rasgos ancestrales asociados con los amplios conocimientos sobre la agricultura tradicional, la cual se enfocaría en la producción diversificada de alimentos“ *...la mayoría de los campesinos poseen una gran pericia técnica para la utilización integral, intensiva y sostenida del espacio disponible para fines agropecuarios; sus sistemas tradicionales de clasificación de suelos y variedades, así como sistemas de predicción del clima, se basan en indicadores naturales*” (Altieri & Nicholls, 2000, p. 48).

Los pequeños y medianos agricultores de la región Cundi-Boyacense poseen una rica experiencia y amplio conocimiento en materia agrícola tradicional, la cual han heredado de generaciones anteriores. Sin embargo, parte de este conocimiento no se adecúa a las necesidades de una agricultura moderna y exigente, requisito esencial para transformar una agricultura de subsistencia a una comercial. El limitado acceso a la información y la carencia de conocimientos formales (educación-capacitación) acentúan el problema del pequeño agricultor (campesino). La vinculación con las UMATAS, quienes brindan servicios de extensión y preparación de manera ocasional y limitada, no genera una mejor capacitación que facilite la adquisición de habilidades y competencias muy necesarias para el buen desempeño en el mercado laboral actual. Según lo mencionado por Valbuena López (2006, p. 24), el DANE ha reportado que el sector agropecuario emplea el 71,4% de la mano de obra rural disponible, una cifra que no podemos ignorar y a la vez, es indicativo de una agricultura altamente dependiente de la mano de obra.

Como lo señala Makudih (2016, p. 11), la fuerza laboral es una importante fuente de energía en gran parte del mundo en desarrollo... *“contribuyendo más del 70% de los requerimientos de fuerza”*

citando a Mazvimavi and Twomlow (2009). Tal como lo indica la **Tabla 1-1**, los animales de tiro contribuyen aproximadamente un cuarto (23%) de la fuerza (potencia) requerida y los tractores un 6%.

Tabla 1-1: Contribución Proporcional Total de Fuerza Utilizada en Selectas Regiones - (%)

<i>Región</i>	<i>Humano</i>	<i>Animal</i>	<i>Tractor</i>
África del Norte	16	17	14
África Sub-Sahariana	89	10	1
Asia (excluye China)	68	28	4
América Latina	59	19	22
Total (%):	71	23	6

Fuente: (Makudih, 2016)

La fuerza laboral rural representa un recurso humano estratégicamente importante para el desarrollo del campo, pero la carencia de un apropiado nivel de educación y capacitación limita su adecuado desempeño en un entorno agropecuario cada día más sofisticado, obstaculizando la transferencia y adopción de tecnologías agrícolas modernas que ayudarían a incrementar la productividad laboral y la producción agropecuaria. La educación rural considerada de baja calidad, con un analfabetismo del 23.0%, sumado a una educación de bajo logro del 82.4% y una inasistencia escolar del 10.2% entre la población rural, representa un cuadro preocupante y muy complejo a la vez. (DANE, 2014). Sin embargo, la importancia de la fuerza laboral del altiplano Cundi-Boyacense, como fuente de energía barata, refleja el panorama regional latinoamericano en donde ésta prevalece sobre el uso de la tracción animal y el tractor.

El desafío sociocultural que merita una inmediata atención puede resumirse en las siguientes áreas:

a. La baja productividad laboral asociada en cierta manera con las diversas estrategias de desarrollo agrícola y rural, han afectado severamente las condiciones locales tradicionales con nuevas condiciones, propuestas, ideas y tecnologías, con el propósito de superar las condiciones de

pobreza. Desafortunadamente, estos procesos han permitido que se inicien nuevos ciclos de incertidumbre perpetuando la pobreza.

b. La eficiencia laboral, se mide en rendimiento y éste con la producción generada durante un día de trabajo (Morlon, 1992, p. 37). El empleo de herramientas manuales, tales como, el azadón y el sistema de fumigación “Maruyama”, no permiten un mayor rendimiento por persona/hora e influyen en la ineficiencia del sector laboral rural en forma negativa (Ver

Figura 1-1).

Figura 1-1: Trabajadores agrícolas fumigando un cultivo de papa con el sistema “Maruyama”.



Fuente: (Autor, 2018)

c. El éxodo de la fuerza laboral rural, se ha constituido como factor preocupante para la continuidad y prosperidad de los sistemas agrícolas de la región. La migración de jóvenes hacia los centros urbanos causa que la oferta de mano de obra (calificada y no-calificada) sea limitada, creando incertidumbre entre los productores, amenazando la prosperidad del sector rural por falta de ésta.

1.2.2 Futuro y la competitividad de la agricultura Cundi-Boyacense

El futuro y competitividad de la agricultura regional se debate entre la pobreza y la necesidad por revitalizar el sector rural por medio de mejoras en la calidad de la educación y la capacitación, y enfocar esfuerzos y recursos limitados a transferir tecnologías útiles. La agricultura con carácter andino es única debido al arraigo cultural, cómo también comprende un gran desafío debido a la naturaleza de su ubicación geográfica, clima, suelos, etc. Una nueva propuesta tecnológica debería permitir el desarrollo de habilidades que permitan un aumento de los estándares productivos en el sector agrícola y una disminución del trabajo arduo. Nuevas propuestas siempre generan incertidumbre con la posibilidad de impactar adversa o positivamente en las condiciones socioeconómicas de la familia rural. Nuevas propuestas en mecanización deberían reflejar las necesidades y capacidades de quienes la utilizarían, especialmente, con un enfoque a cerrar el espacio generacional con la nueva generación de agricultores (jóvenes), quienes deberán ser estimulados a permanecer en el campo para jugar un rol activo en el desarrollo agrícola y rural.

El desarrollo agrícola de la región está supeditado en gran parte a resolver tres problemas puntuales anteriormente mencionados. Estos factores afectan directa y muy negativamente el potencial agrícola, ganadero y forestal de la región. La clave para generar un efecto positivo en cualquier plan de desarrollo cuyo efecto sea un desarrollo integral y sostenible es la educación. Es muy necesario fortalecer la educación del sector rural en general, para transformarla en una fuerza más moderna que permita suplir las necesidades de una agricultura en transición.

El gran desafío de la agricultura andina colombiana será producir alimentos entre 2.500 a 3.000 msnm, de manera sostenible y para lograrlo se requerirá de nuevos conocimientos y nuevas tecnologías.

1.3 Tecnología de la Tracción Animal

La tecnología actualizada de tracción animal representa innovación en mecanización agrícola y autosuficiencia para la agricultura familiar. Utiliza energías renovables a base de pastos, granos y maderas, apoyando la economía circular rural. El diseño y producción de maquinaria e implementos agrícolas para uso con caballos de tiro es extremadamente limitada.

Los beneficios asociados con la transferencia y adopción de la tecnología de mecanización agrícola con caballos de tiro son múltiples. Entre ellos: **a)** mejora en la eficiencia laboral del agricultor y la mano de obra rural; **b)** estimula el empleo en el sector rural al promover nuevas fuentes de trabajo; **c)** revalida el uso de la tracción animal como una opción tecnológica y económicamente viable de mecanización agrícola; **d)** fomenta el cambio tecnológico, económico, social y cultural (versus uso de bueyes) y el desarrollo de una capacidad semi-industrial y artesanal regional para la fabricación y reparación de maquinaria e implementos agrícolas; **e)** utiliza recursos locales, tales como, animales de tiro, talleres artesanales, fuerza laboral local, alimentación para los equinos y otros; **f)** estimula el desarrollo socioeconómico del sector rural al crear nuevas oportunidades de empleo, servicios profesionales y artesanales; **g)** protege y/o minimiza el daño al suelo y el medio ambiente; **h)** reduce la huella de carbono (emisiones de CO₂ y uso de combustibles fósiles); y, **i)** utiliza menos energía y puede reproducirse (desarrollarse) a un menor costo.

Desde mediados del siglo XVIII, la mecanización agrícola con caballos de tiro se ha considerado un evento de innovación tecnológica de gran trascendencia para el desarrollo de la agricultura moderna. Hoy en día, su resurgimiento entre los practicantes de la agricultura familiar ha estimulado la fabricación de nueva maquinaria e implementos, técnicas y procedimientos, y como una tecnología “innovadora” en mecanización y fuente de energía económica, principalmente en Norteamérica y Europa.

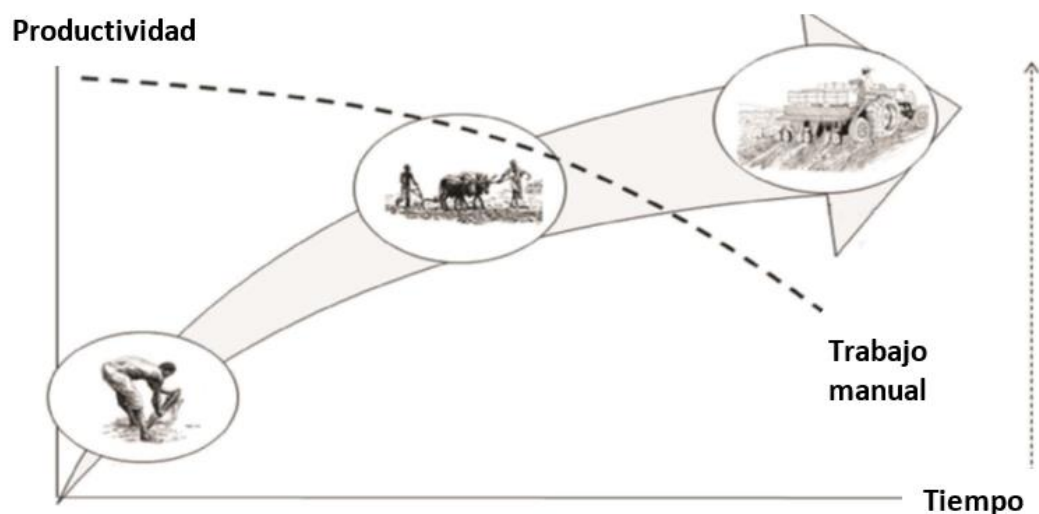
En la región Andina existe un fuerte arraigo cultural con el uso de bueyes a diferencia de los caballos de tiro. El arado de palo es el implemento popular asociado a la labranza tradicional con bueyes, desconociendo otras opciones de implementos agrícolas, por desconocimiento, idiosincrasia local y falta de una oferta de mercado. Actualmente, la oferta en maquinaria e implementos agrícolas a tracción animal es nula, debido a que no existe un mercado importante que estimule la fabricación y la importación de dichas herramientas agrícolas a nivel local, nacional y regional. Sin embargo, la región Cundi-Boyacense posee la capacidad semi-industrial y artesanal para la fabricación de maquinaria e implementos agrícolas para uso con tracción animal. La ubicación de dichos talleres próximos a las áreas de influencia (o interés) en la aplicación de la tracción animal sería una

estrategia que permitiría una pronta disponibilidad de maquinaria e implementos agrícolas inmediatamente y a costos reducidos, lo cual facilitaría los trabajos de labranza a tiempo para evitar que los cultivos se vean afectados por la demora que se causaría por la dependencia de talleres distantes.

Por medio de una mecanización agrícola apropiada, se empoderaría a pequeños y medianos agricultores, lo que generaría un alto grado de autosuficiencia y autonomía en mecanización. La adquisición de nuevos conocimientos agrícolas y el manejo de tecnologías como la tracción animal son determinantes para mejorar la eficiencia productiva de la mano de obra y, la reducción de la fatiga y los trabajos riesgosos de los operarios/trabajadores agrícolas. Los animales de tiro son conocidos por su capacidad de producir energía local y barata. A través de la mecanización a caballos de tiro, se puede aliviar el rigor del trabajo manual, mejorar la calidad de vida y la productividad laboral. A medida que se incorpore una mayor tecnificación menor será el trabajo manual (duro) del agricultor y el trabajador agrícola, tal como se representa en la (Ver **Figura 1-2**).

Aquí vale resaltar, que entre los objetivos de la incorporación de modelos tecnológicos de mecanización agropecuaria están: incrementar la productividad de la mano de obra y, reducir la fatiga y los trabajos riesgosos de los operarios.

Figura 1-2: Productividad vs. Nivel de tecnología vs. Trabajo manual.



Fuente: (FAO, 2013, p. 37)

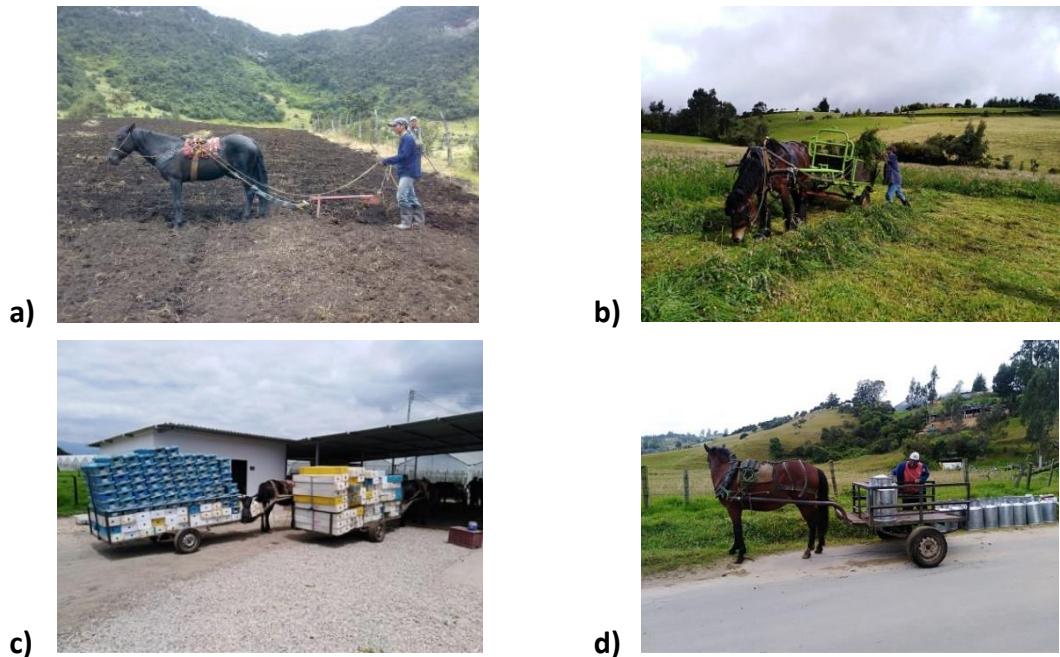
1.4 Mecanización agrícola con caballos de tiro

La reincorporación de la tracción animal en los sistemas productivos locales y nacionales se está constituyendo en una opción tecnológica con mayores probabilidades de éxito. La tecnología de la tracción animal justifica su importante rol en la agricultura contemporánea por su reducido uso de energía fósil y su inmediata disponibilidad a menor costo que la tecnología de la tracción mecánica.

Según la FAO (2020), el nuevo enfoque para una agricultura sustentable y amigable con el medio ambiente, se basa en un planteamiento de mitigación de tres puntos críticos: **a)** reducir el consumo de combustibles y lubricantes de origen fósil, para controlar/disminuir la polución ambiental por CO₂; **b)** reducir la compactación del suelo para mejorar/recuperar su calidad productiva; y **c)** aumentar el secuestro de carbono (CO₂) en el suelo mediante la rehabilitación de suelos degradados y adopción de prácticas de conservación.

El conocimiento sobre el uso del caballo de tiro en la agricultura colombiana es incipiente y la falta de educación y entrenamiento de los agricultores y trabajadores agrícolas sobre el tema, permite que los animales se utilicen con posibilidades muy limitadas, lo que da paso a malas prácticas en su empleo y abuso. Los caballos por lo general son de porte pequeño (cruzados), producto del cruzamiento entre yeguas criollas y reproductores puros de tiro pesado de las razas Belga y Percherón, pero relativamente de buena calidad para el trabajo agrícola. Sin embargo, se observa un lento desarrollo con la utilización en faenas agrícolas, tales como, el transporte de leche, flores y la siembra y aporque de papa. Ver **Figura 1-3**.

Figura 1-3: **a)** siembra de papa con un caballo de tiro liviano en una ladera cerca del valle de Ubaté; **b)** transporte de pasto de corte; **c)** transporte de flores desde las áreas de producción al galpón de empaque; y **d)** transporte de leche.



Fuentes: a) Germán López, 2015 b), c), d) (Autor, 2018)

La mecanización agrícola con caballos de tiro permite que pequeños y medianos agricultores sean más eficientes y productivos con su tiempo disponible, a la vez que pueden convertirse en pequeños empresarios de servicios de mecanización y generar oportunidades de empleo para el núcleo familiar y/o fuerza laboral externa (Fernández et al., 2002, p. 3).

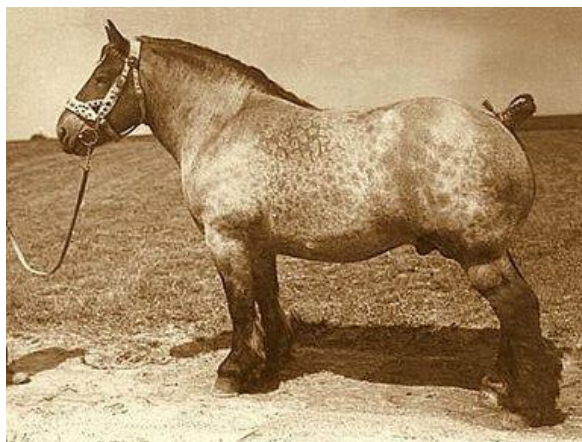
1.5 Caballar de tiro

El caballo de tiro pesado es multifuncional (Rydberg & Jansen, 2002, p. 14,15) y una de las especies equinas cuya popularidad no ha crecido a nivel nacional, debido a la falta de una “cultura” asociada con su uso en la agricultura. Una excepción sería su utilización en los sistemas productivos lecheros de la Sabana de Bogotá, Laguna de Fuquene y los valles de Sopo y Chiquinquirá.

La producción caballar de tiro de la región Cundi-Boyacense, se ubica específicamente en los valles de Sopo y Ubaté y en Boyacá, en los valles de Chiquinquirá y San Miguel de Sema (Laguna de Fuquene). Los reproductores actualmente utilizados en la reproducción caballar son en su mayoría segunda y tercera generación de padres importados y son utilizados en cruces con yeguas “locales”.

La importación de reproductores puros no ocurre con mucha frecuencia. Interesantemente, la región Cundi-Boyacense posee un abundante capital genético en yeguas “criollas” y yeguas semi-pesadas (cruzadas), que podrían ser utilizadas en cruzamientos con selectos reproductores de tiro pesado puros, para producir animales de tiro de mejor calidad y que mejor representen las necesidades in-situ, en materia de mecanización de los sistemas productivos y las condiciones medio ambientales locales en donde operarían.

Figura 1-4: Avenir d' Herse, famoso reproductor Brabante y Campeón Nacional Belga 1925



Fuente: (Peerlings et al., 2007, p. 40)

El tipo de caballo de tiro útil para la región andina, debería ser un animal “funcional” de baja estatura (para el trabajo en laderas), robusto, de buen desarrollo óseo, pecho ancho, lomo corto y de cascos (proporcionalmente) de tamaño pequeño a mediano. Los caballos de tiro pesado nacidos en el altiplano Cundi-Boyacense tienden a ser de menor alzada en relación con sus padres importados y se sospecha que la causa sería el factor altura (msnm). Esta condición no debería ser de preocupación ya que, en principio, se desearía un animal de talla menor, no excesivamente alto, entre 1,53m y 1,58m para que facilite el trabajo de aperarlos. La mayoría de los caballos puros importados e introducidos en el altiplano Cundi-Boyacense provienen de lugares muy próximos al nivel del mar y de un entorno ambiental muy diferente. No obstante, la limitada experiencia local

indica que las crías de la primera generación se adaptan muy bien a la región altiplánica lo que les ha permitido conservar su fenotipo y cualidades de tiro, pero son de menor alzada (Ver **Figura 1-4**).

Los caballos de tiro pueden agruparse en tres diferentes grupos por tamaño o peso vivo: **livianos**:>400 kg; **semi-pesados**:>600 kg; y **pesados**:>800 kg.

1) Equino de tiro – liviano (>400 kg.)

Figura 1-5: Caballo de tiro ligero (reproductor de tiro pesado X yegua criolla)



Fuente: (Autor, 2019)

Los caballos de tiro liviano (criollos), son un recurso adecuado para el trabajo agrícola, desafortunadamente, su pequeño tamaño y menor peso corporal, acompañado de un temperamento nervioso que limita su capacidad de tiro y por ende carecen de la eficiencia para el trabajo en relación con los caballos de tiro pesado y semi-pesado. No obstante, son un recurso disponible en el entorno local rural, una vez adecuadamente entrenados pueden sumarse al esfuerzo regional total para mecanizar el agro del pequeño y mediano productor (Ver **Figura 1-5**).

2) Equino de tiro semi-pesado (>600 kg.)**Figura 1-6:** Caballo $\frac{3}{4}$ percherón**Fuente:** Anónimo

Los caballos semi-pesados, producto de los cruces entre equinos de tiro pesado y media sangre son muy utilitarios y los que en mayor número hacen presencia en el campo Cundi-Boyacense. Este tipo de animal es el más apropiado para la labranza agrícola, especialmente para los trabajos en laderas debido al menor tamaño de sus cascos (Ver **Figura 1-6**).

3) Equino de tiro pesado (>800 kg.)**Figura 1-7:** Reproductor joven de la raza “Brabante” de tiro pesado**Fuente:** Autor

Los caballos de tiro pesado sirven bien en terrenos planos y laderas suaves. Los reproductores “puros” de tiro pesado, son necesarios para la continua reproducción caballar y mular de tiro pesado y semi-pesado y el mejoramiento de la raza criolla o local, tanto para la región andina como para regiones de clima cálido, ya que estos aportarían la calidad genética en la que se destacan, cualidades deseables para el trabajo agrícola (Ver **Figura 1-7**).

1.5.1 Alimentación, cuidados y manejo

La capacidad de tiro está directamente ligada a la calidad y cantidad de alimentación que se brinde a los animales. Los caballos de tiro pesado comen en proporción a su peso vivo. Se recomienda alimentar diariamente el 2% de su peso en base seca. Por ejemplo, un caballo de 640 kg de peso vivo debería consumir aproximadamente 13 kg de pasto en base seca (Luce et al., 1982, p. 20). Para un caballo de 640 kg esta cantidad de pasto seco (heno) equivale aproximadamente a 70 kg de pasto recién cortado. A diferencia de los animales de menor tamaño y de sangre caliente, los caballos de tiro pesado tienen un bajo requerimiento de energía debido a su lento metabolismo y almacenan su energía en forma de grasa acumulada en el cuello, base de la cola, espalda y cuartos traseros, durante el descanso. La energía acumulada eventualmente la utilizará en los trabajos de labranza y transporte.

En consecuencia, la dieta del caballo de tiro está enfocada a suplir sus necesidades en base a su estado fisiológico (crecimiento, trabajo, reproducción, mantenimiento).

A. Mantenimiento: Para calcular los requisitos de Mega Caloría (MC) del caballo de tiro utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Energía Digestible de Mantenimiento (Mega Calorías/día)} = \text{peso} \times 0,030$$

B. Crecimiento: El crecimiento de los caballos de tiro se estima en 7 años hasta alcanzar completa madurez, aunque las hembras están en condiciones de aparearse y llevar una preñez a

término desde los 2 1/2 años (Goe & McDowell, 1980, p. 42). Los requerimientos de energía digestible para el crecimiento se calculan con la siguiente fórmula:

$$ED \text{ (MC/día): } (1.4 - 0.03 \times \text{peso}) + (4.81 + 1.7 \times \text{edad meses} - 0.023 \times 2) \times \text{GDP}$$

GDP: ganancia diaria de peso

C. Trabajo: El ritmo metabólico será influenciado por el nivel y la frecuencia de trabajo (Goe & McDowell, 1980, p. 46). Los requerimientos de mulares y asnales serán menores a los del caballo de tiro. Los requerimientos de energía digestible (ED) para el trabajo se estiman de acuerdo con la intensidad, el cual se puede clasificar en 4 categorías (leve, moderado, intenso y muy intenso):

Leve (MC/día): $0.0333 \times \text{peso} \times 1.2$

Moderado (Mc/día): $0.0333 \times \text{peso} \times 1.4$

Intenso (MC x día): $0.0333 \times \text{peso} \times 1.6$

Muy intenso (Mc/día): $0.0333 \times \text{peso} \times 1.9$

Notas:

1. *NRC: National Research Council (USA). Ultima revision, 2007.*
2. *TDN: carbohidratos + proteína + 2.25 (grasa) (Crampton & Harris, 1969) y 1 unidad de forraje (U.F.). Equivalente a 1 kg de cebada (VanSoest, 1981); entonces 1 F.U. equivale a 0.73 kg de TDN (Morrison, 1956)*
3. *Modificado de Goe & McDowell (1980)*

Ecuación 1-1

$$(\text{Ritmo metabólico relativo}) = \frac{\text{energía gastada en trabajo}}{\text{Energía gastada en descanso}}$$

La ración del caballo de tiro se limita principalmente a la ingestión de alimentos ricos en fibra (pastos). La ración de trabajo siempre será de mayor proporción, rica en fibra (carbohidratos) y

grasas, para generar la fuerza que el animal necesitará para desempeñarse en sus faenas. Se recomienda alimentarlos con pastos de muy buena calidad los que se complementarían con sales minerales, vitaminas, concentrado y granos de avena y/o cebada chancada y agua a plenitud. El uso de SEL-E-Cal (aditivo nutricional) es recomendable para incluirlo en la ración diaria, ya que influye en el desarrollo y el mantenimiento muscular del caballo. Sin embargo, su uso debe ser cuidadosamente manejado para evitar situaciones de intoxicación ya que el mineral Selenio tiende a almacenarse en el cuerpo y puede resultar altamente tóxico para el animal. Se recomienda consultar con un Médico Veterinario antes de usarlo.

El mantenimiento de los cascos es esencial para el buen funcionamiento y salud de los caballos en general. Es muy necesario disponer de un herrero con conocimientos en la herrería del caballo de tiro, para brindarles continua atención y monitoreo de sus cascos para corregirlos oportunamente y evitar graves deterioros. Y como dice el antiguo refrán: “Sin patas no hay caballo”.

Los cólicos son frecuentes en los equinos y es una condición que requiere de un constante monitoreo e inmediata respuesta, especialmente después de las comidas. Es muy necesario mantener un horario riguroso de alimentación ya que alimentarlos a deshora también podría ocasionarles cólico. Deben tener agua a discreción especialmente antes de cualquier trabajo, pero no se debería dar mucha agua inmediatamente después de un trabajo arduo o muy exigente. Se debería consultar con un Médico Veterinario sobre un protocolo para la prevención y tratamiento de cólicos.

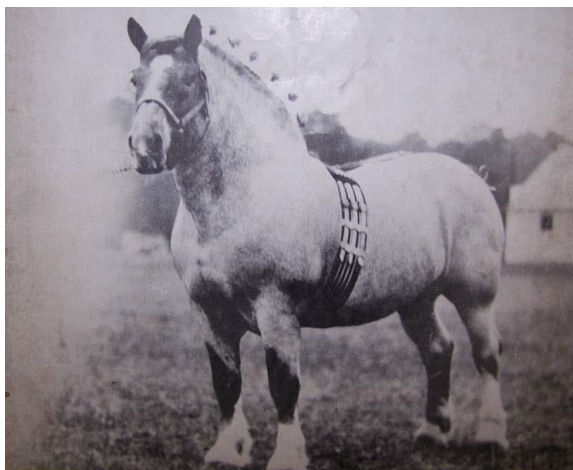
Las enfermedades más recurrentes y de mayor impacto económico para los dueños de equinos son: Encefalitis Equina Venezolana, Influenza Equina y Leptospirosis (y otros). Se recomienda consultar con un médico veterinario para vacunarlos regularmente.

1.5.2 Reproducción del caballar de tiro

La reproducción del caballar de tiro es un gran desafío debido a su relativa baja fertilidad (<70%). Nuevas técnicas y medicamentos utilizados para este fin han ayudado a mejorar las estadísticas.

Desafortunadamente, la población equina de tiro a nivel mundial es muy pequeña y la calidad de reproductores de algunas líneas sanguíneas es cuestionable por sospechas de alta consanguinidad. No obstante, aún se pueden identificar reproductores de tiro de líneas no comprometidas y de alta calidad genética en Europa y los EE. UU (Ver **Figura 1-8**).

Figura 1-8: Famoso reproductor de tiro de la raza Belga, “Farceur” 7332 (72924)



Fuente: Anónimo

Un Programa Nacional/Departamental de Remonta Equina, enfocado al mejoramiento de la raza caballar de tiro con el uso de reproductores importados de tiro pesado de alta calidad, necesariamente tendría que ser subvencionada por el gobierno nacional y/o departamental, para brindar a pequeños y medianos agricultores servicios de reproducción a bajo costo. Una experiencia regional válida para estudiar y considerar sería el programa de reproducción de caballos de tiro, administrado por el ejército de Chile y establecido por medio de un convenio formal entre el Ministerio de Defensa y el Ministerio de Agricultura. El “Plan Nacional de Fomento Equino para la Agricultura”, en coordinación con la Ley de Fomento Equino y Remonta, tuvo su origen a partir del año 1984, con un mandato no inferior a 15 años, y aún continúa vigente (Decreto con Fuerza de Ley 192: CREA LA DIRECCION GENERAL DE FOMENTO EQUINO Y REMONTA, DEPENDIENTE DEL MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL., 1953).

El programa de reproducción caballar de tiro pesado es fundamental para apoyar un programa de mecanización agrícola a tracción animal, con excelentes pies de cría y con producción de ejemplares de buena calidad para ser ofertados en el mercado local y nacional. La región Cundi-Boyacense cuenta con un excelente recurso genético a través de una vasta población de yeguas criollas y cruzadas. Estos animales podrían sumarse a un programa de remonta local y nacional, cuyos esfuerzos podrían ser encausados en la creación de una raza propia (local) de tiro, la que se sumaría a los esfuerzos regionales y nacionales, enfocados a brindar a pequeños y medianos agricultores un sistema de mecanización agrícola apropiado con caballos de tiro.

1.6 Labranza agrícola con caballos de tiro pesado

Desde hace más de 300 años, el transporte de carga, las cosechas y la posterior labranza del suelo agrícola han sido las razones principales para la utilización de caballos como gestores de energía animal vs motriz (Figura 1-9 a), b).) La labranza con caballos de tiro implica una serie de factores y/o limitaciones similares a aquellas consideradas para el uso del tractor, tales como, potencia, velocidad de trabajo, condiciones de suelo y sistemas productivos.

Figura 1-9: a) Sembradora de granos y b) arados diseñados por Jethro Tull-1718



Fuente: Riquelme Sanhueza (2017) y John Adams Library.

Existen tres componentes de gran importancia que influyen en la labranza agrícola: fuerza de la fuerza de tiro, tipo y condiciones de suelo, y tipo de implemento agrícola (Nkakini, 2015, p. 53). La capacidad de tiro o requerimientos de energía necesarios para operar las herramientas de labranza es determinada por el agricultor u operador agrícola utilizando criterios técnicos que les permita seleccionar la fuente y capacidad de energía requerida para operar el implemento en condiciones de suelos locales. Con el uso de tracción animal, la capacidad de los animales en promedio se establece de acuerdo con su peso vivo, y la herramienta a utilizar es seleccionada considerando el tipo de labranza que se desea realizar y su tamaño (peso). La labranza agrícola, representa un conjunto de fuerzas mecánicas dinámicas que, de manera directa e indirecta, influyen en la operación y los resultados de este tipo de trabajo. La resistencia mecánica del suelo a la penetración de las herramientas determina la fuerza de tiro requerida. Según Nkakini (2015, p. 53) ... *“la resistencia (al tiro) es el componente horizontal de la fuerza de tiro, se ubica paralelamente a la línea de movimiento, mientras que la resistencia lateral, es el componente horizontal del tiro, perpendicular a la línea de movimiento”*.

1.6.1 Dinámica del tiro caballar

La dinámica del tiro animal está asociada a la forma y el desarrollo físico del caballo, como tal, y a su inherente capacidad de trabajo. Tal como lo indica Miller (2004, p. 21) *“Las partes movibles del caballo son una masa de conexión de huesos, articulaciones, músculos, tendones y ligamentos trabajando juntos para alcanzar hasta el más mínimo movimiento”*. Y es por esta razón que Miller (2004, p. 21), también enfatiza:

“... primero, el animal debe estar “bien formado” (físicamente), sin problemas genéticos (que afecten el sistema locomotor y muscular) y heridas que podrían afectar su desempeño o rendimiento; segundo, el impacto de la dieta (alimentación) y el cuidado en general que afectaría la habilidad del caballo para trabajar”.

1.6.1.1 Fuerza de Tiro

Es la energía generada por el caballo para jalar la maquinaria o implementos agrícolas. Según lo explica Nkakini (2015, p. 53) la fuerza de tiro es *“la fuerza requerida para sobrepasar la resistencia*

del suelo y mover el implemento a la velocidad requerida se llama la fuerza de corte (penetración)". La fuerza (energía) producida por los animales se transmite a la herramienta por medio del punto de enganche (B) a través de los balancines/paloniles, ubicados en el área trasera del(os) animal(es) y la herramienta.

(Nkakini, 2015, p. 53); (Harrigan and Roosenberg, 2002: 9, 14), citados por Makudih (2016) definen la fuerza de tiro como:

"...el componente horizontal y paralelo a la dirección del movimiento (o desplazamiento), necesarios para superar la resistencia del suelo y mover implementos de labranza a la velocidad requerida. Es la suma de la resistencia causada por el suelo, el cultivo y el desplazamiento del implemento.". (p. 24)

La penetración o corte del suelo requiere de una fuerza tal que permita a la herramienta enterrarse, para "estallar" el suelo y vencer su resistencia al movimiento del implemento de labranza en la misma dirección de los animales (Carrasco et al., 2012, p. 24). La calidad del tiro (capacidad), es altamente influenciada por las condiciones físicas del suelo, el tipo y tamaño del implemento, la geometría de su diseño y la velocidad de trabajo de los animales.

La fuerza de tiro, combinada con la velocidad de trabajo son factores que determinan la eficiencia del conjunto: animal - herramienta durante la labranza del suelo. La fuerza de tiro se mide en el punto de enganche con el uso de una celda de carga conectada a un "datalogger" y los resultados se expresan en Newton **N**.

1.6.1.2 Potencia de tiro

Se define como el "vigor" o la capacidad de los animales para realizar el trabajo en un tiempo definido y se describe en caballos de potencia (HP) mencionada por primera vez por James Watt en Inglaterra a finales del siglo XVIII (Collins & Caine, 1926, p. 5; Yepes, 2019, p. 1).

Las mediciones de **potencia (W)** varían de acuerdo con las condiciones físicas de cada animal (muscultura, esqueleto, cascos, salud y nutrición), nobleza o aptitud para el trabajo y experiencia. Se suman, las condiciones físicas del suelo, el diseño y geometría de la herramienta y la geografía misma del terreno (ladera vs plano). Conocer la fuerza de tiro de cada animal es de sumo interés, porque establece los parámetros para el tipo y tamaño de la(s) herramienta(s) a utilizar. Según Venturelli et al. (2009, p. 4), la potencia neta instantánea se define como:

Ecuación 1-2

$$\text{Potencia neta}[W] = \text{Fuerza de tiro}[N] * \text{velocidad} [m/s]$$

Para obtener la **potencia de tiro efectiva**, se agrega el coseno del ángulo de ataque de la punta de la herramienta (α):

Ecuación 1-3

$$\text{Potencia de tiro}[W] = \text{Fuerza}[N] * \text{velocidad} \left[\frac{m}{s} \right] * \cos \alpha$$

La relación **potencia vs peso vivo** se utiliza para determinar la capacidad de trabajo de los animales de tiro. Ishizaki, et.al. (1954), citados por Hiraga & Sugano (2017, p. 3,4), condujeron ensayos en Japón para determinar la capacidad de tiro en caballos de 165 a 622 kg. Después de haber labrado una parcela con un arado japonés para la siembra de arroz, concluyeron que con menor peso vivo menor la velocidad de trabajo.

Según King (1901) en uno de sus trabajos de investigación para determinar el requerimiento de potencia para jalar un arado de rastrojo ¹(similar a un cincel), utilizó dos caballos de tiro con un

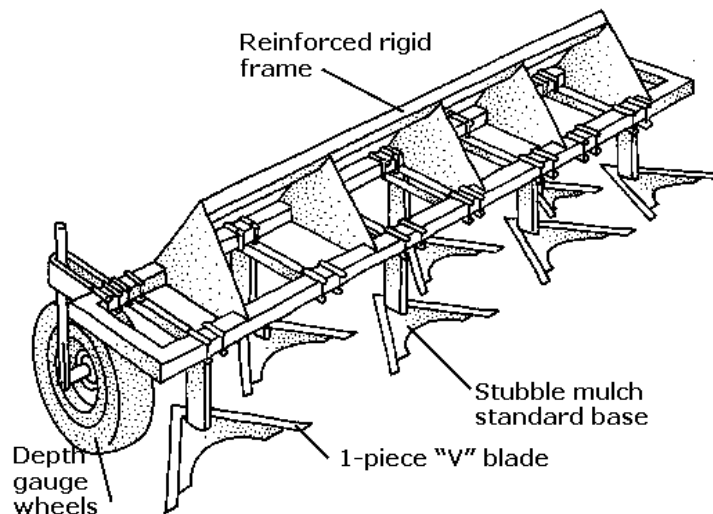
¹ **Nota:** El arado de rastrojo es algo similar a un arado de cincel, pero utiliza vástagos rectos en vez de vástagos semi curvo. (Ver **Figura 1-10**); durante las pruebas de campo se utilizaron tres tamaños de arados de rastrojo: 10", 12" y 14".

peso aproximado de 726 kg (1600 lb) cada uno, a una velocidad de 4 km/h con cinco diferentes profundidades y tamaños de corte, en un suelo de mediana textura. Los resultados se registraron en “caballos de potencia” (HP) y se presentan a continuación en la **Tabla 1-2**.

Tabla 1-2: Requerimientos de Potencia Animal en HP con Arado de Rastrojo en Suelo de Mediana Textura.

Profundidad de surco	10 cm / (4")	12.7 cm / (5")	15 cm / (6")	18 cm / (7")	20.3 / cm (8")
Ancho de corte	20.3 cm / (10")	20.3 cm / (10")	20.3 cm / (10")	20.3 cm / (10")	20.3 cm / (10")
Potencia de tiro (HP)	1.41	1.79	2.15	2.51	2.87
Ancho de corte	30.5 cm / (12")	30.5 cm / (12")	30.5 cm / (12")	30.5 cm / (12")	30.5 cm / (12")
Potencia de tiro (HP)	1.72	2.14	2.58	3.02	3.45
Ancho de corte	36 cm / (14")	36 cm / (14")	36 cm / (14")	36 cm / (14")	36 cm / (14")
Potencia de tiro (HP)	2.01	2.51	3.02	3.52	4.02

Fuente: (King, 1907)

Figura 1-10: Arado múltiple de rastrojo

Fuente: (SARE, 2001)

King (1901), concluyó que los dos caballos cada uno con peso de 726 kg, maximizaron su capacidad de tiro/potencia, con diferentes tamaños de “arado de rastrojo” operando en diferentes condiciones de trabajo, como se detalla a continuación:

1. Arado de rastrojo de 14 pulgadas (36 cm): operando a una profundidad entre 4” y 5” (10 y 13 cm);
2. Arado de rastrojo de 12 pulgadas (30 cm): operando a una profundidad entre 5” y 6” (13 y 15 cm);
3. Arado de rastrojo de 10 pulgadas (25 cm): operando a una profundidad entre 6” y 7” (15 y 18 cm)

Tal como lo sugieren los resultados de la **Tabla 1-2**, con menor ancho de corte es posible labrar a mayor profundidad.

La mayoría de las pruebas realizadas para registrar la potencia animal, ocurrieron después de que James Watts a finales de los años 1700s determinara que un caballo “minero” promedio, podía

jalar 33,000 ft-lb o levantar 150 kg a una altura de 30.5 metros (100 pies) en un minuto (Camacho-Tamayo & Rodríguez B., 2007; Walters, 2016). En los Estados Unidos importantes investigaciones se llevaron a cabo en varias universidades estatales, como fue el caso de la Universidad Estatal de Iowa, en donde Collins & Caine (1926), reportaron información de investigadores europeos y americanos de la época, sobre la potencia (estimada) de los caballos de tiro. **Tabla 1-3** muestra la información mencionada sobre la potencia estimada de los caballos de tiro.

Tabla 1-3: Potencia estimada del caballo de tiro

Investigador:

<i>Desaguliers</i>	8 h	200 lb (90,7 kg) @ 4,0 km/h:	1,33 HP (kW)
<i>M. Sanvec</i>		189 lb (85,7 kg) 0,91m por segundos:	1,50 HP (kW)
<i>Desaguliers</i>		550 lb (249,5 kg), 15,24m por minuto:	0.84 HP (kW)
<i>Smeaton</i>		550 lb (249,5 kg), 12,2m por minuto:	0.67 HP (kW)
<i>Sociedad para Promover las Artes</i>		80 lb (36,3 kg), 4,8 km/h:	0.64 HP (kW)
<i>Tredgold</i>	6 h	125 lb (56,7 kg), 4,8 km/h:	1,00 HP (kW)
<i>King</i>		1,600 lb (726 kg) por caballo:	1,06 – 1,33 HP (kW)
<i>Watt</i>		100 lb (45,4 kg) 4 km/h:	0,67 HP (kW)
<i>Simms</i>	8 h		0,80 HP (kW)
<i>Rennie</i>			0,67 HP (kW)
<i>Beardmore</i>			1,19 HP (kW)

Potencia de tiro máxima registrada en la Universidad Estatal de Iowa:

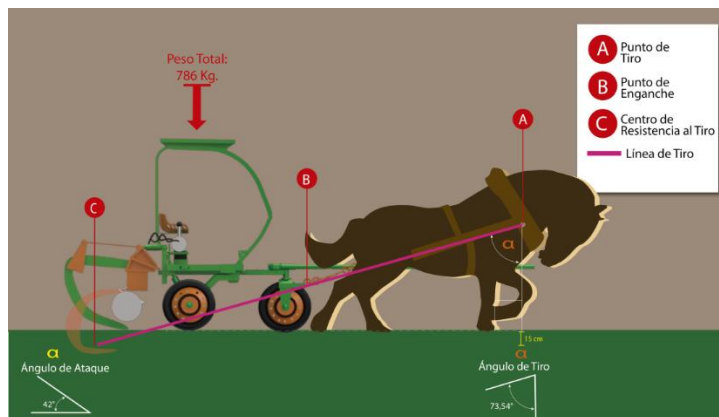
Años:	1922: 1.39 HP
	1923: 1.27 HP
	1924: 1.42 HP

Fuente: (Collins & Caine, 1926)

1.6.1.3 Angulo de tiro

Es el ángulo formado por una línea trazada sobre un plano desde un punto vital del animal ubicado próximo al hombro y sobre el cual, actúan las fuerzas de tiro para vencer la resistencia del suelo a la herramienta de trabajo. Para obtener el ángulo de tiro “óptimo”, (aproximado) en los caballos de trabajo usando un arnés de collar, se utiliza la siguiente técnica: se traza una línea imaginaria recta (o un hilo), desde el punto de tiro (A), ubicado en el yugo del arnés y continúa a través del punto de enganche (B) hasta terminar en el “centro de resistencia al tiro” (C), el punto en el cincel donde se concentra la resistencia de la herramienta a la fuerza de tiro, y puede ubicarse sobre y cerca de la punta de la herramienta cuando se entierra en el suelo. El punto de enganche (B), en donde se conectan los balancines a la herramienta o carro de enganche, deberá ajustarse para interceptar la línea de tiro trazada. El resultado sería una aproximación al “ángulo de tiro óptimo o eficiente”. Tal como se señala en la **Figura 1-11**, la herramienta bien alineada con la línea de tiro se manifiesta con un ángulo de tiro de **73.54°** (B), con el cincel parabólico enterrado en el suelo a 15 cm de profundidad.

Figura 1-11: Principales fuerzas que actúan en el tiro animal



Fuente: Diseñado por María Beatriz Duque Zúñiga, Diseñadora Industrial, 2019.

1.6.1.4 Angulo de ataque

Se refiere a la posición física de la punta de la herramienta (ej. cincel) en relación con el plano horizontal, que le permite penetrar y cortar a través del suelo con la mayor eficiencia y eficacia como lo indica la **Figura 1-11**.

A diferencia de los resultados obtenidos por Ortiz-Laurel & Cowell (2007, p. 13) en donde concluyen que.... *“el ángulo de tiro no tuvo ningún efecto significativo en los promedios de las fuerzas verticales y horizontales desarrolladas por las extremidades del caballo a un dado peso de carga”*, durante los ensayos se pudo observar que el efecto del ángulo de tiro fue determinante en la generación de la fuerza horizontal (de corte/penetración), en relación con el tipo y peso de las herramientas y el operador, y el tipo de suelo en donde éstas operan. Por ejemplo, cuando el cincel parabólico se enterraba en el suelo rompiendo las fuerzas de resistencia, los animales respondieron agachando la cabeza y la región torácica del cuerpo, para reducir la distancia entre el pecho del animal y la superficie del suelo moviendo el punto de tiro (A) más cerca de la superficie del suelo. Esto sugiere, la importancia de seleccionar y reproducir animales de tiro de baja a mediana estatura con corvejones fuertes y bien desarrollados (maduros) y de cascos de tamaño pequeño a mediano para generar la mayor potencia de tiro.

1.6.1.5 Línea de tiro

Es una línea (imaginaria) que se traza desde el punto de enganche al implemento, para mantenerlo lo más cercano a la línea de tiro verdadera en la dirección de viaje del implemento, con el mínimo de fuerza requerida. El implemento que se mantenga fuera de la línea de tiro (no alineado), aumentaría la fricción del implemento en el suelo hasta en un 10%, incrementando la fuerza requerida para moverlo (Goe & McDowell, 1980, p. 9).

1.6.1.6 Centro de resistencia al tiro

Es el punto (C) en la herramienta en donde las fuerzas de resistencia al corte/penetración del suelo convergen. También puede definirse como un punto en la herramienta, opuesto a la dirección de

movimiento de esta, que se conecta con el punto de tiro a través de la línea de tiro (Shrivastava et al., 2006; Starkey, 1989).

1.6.2 Capacidad y rendimiento del caballo de tiro

Se entiende esto como el “resultado productivo” de la interacción animal-herramienta. Algunas de las variables a considerar que impactan en la capacidad de trabajo de los animales son: temperatura y humedad ambiental, periodo de lluvias o seco, intensidad solar y peso de las herramientas.

Para calcular la demanda de fuerza de tiro de cada máquina e implemento agrícola, se deben tomar en consideración los siguientes factores:

- a) Ancho de trabajo de la herramienta
- b) Profundidad de la labranza
- c) Velocidad de trabajo
- d) Resistencia del suelo

Fuente: (Walters, 2016)

a. Ancho de trabajo de la herramienta. El ancho y/o tamaño de la herramienta se elige de acuerdo con las necesidades del trabajo y capacidad de(los) animal(es). En el caso de utilizar un solo arado de cincel con animales de tiro, el ancho de trabajo del cincel se definiría como el ancho de la punta del cincel incluyendo el área de influencia (o de impacto) de las zonas laterales del surco, el cual se aproximaría a unos 50 cm a cada lado, si tomamos en cuenta las observaciones hechas por Camacho-Tamayo & Rodríguez B. (2007, p. 63,64) sobre el área típica de un suelo disturbado por herramientas de labranza primaria, tales como, un cincel parabólico. Si se desea aumentar el número de cinceles arreglados en varias formas, el ancho de trabajo sería la suma de las distancias recomendadas para instalar los cinceles en la estructura de acople (o barra de tiro) más las distancias de impacto lateral de los cinceles extremos.

El cincel parabólico usado como arado de cincel, puede utilizarse para la labranza mínima en las siembras de cultivos en hilera, tal como: la papa, el maíz, etc. Los cinceles en general deben poseer

un ángulo (α) que les permita penetrar el suelo con cierta facilidad y demanden la menor energía, pero sin ser demasiado agresivos y crear las condiciones óptimas para la labranza con animales de tiro. Sin embargo, Makudih (2016) sugiere que *para subsolar o cincelar óptimamente suelos arcillosos, se requeriría de un cincel con ángulo de penetración (ataque) de 72° y una fuerza de tiro mínima de 41 kNm-3*. Makudih (2016), también ha sugerido un ángulo de 50° el cual podría asumirse como aceptable para el trabajo con animales de tiro, pero, aún no existe data conclusa que lo vincule al trabajo con tracción animal.

Varios estudios sobre el impacto del uso de cinceles parabólicos han reportado reducciones en requerimientos de energía (potencia) entre el 10% al 16% (Smith and Williford, 1988) citados por Kasisira (2005, p. 14) y cuya presencia adecuada de humedad en el suelo ha sido fundamental. Campos Magaña Santos Gabriel (2000); Araya (1985); Kasisira (2005), Smith & Williford (1988); Camacho-Tamayo & Rodríguez B. (2007, p. 66). En una investigación, realizada por Smith & Williford (1988) citados por Zhang et al. (2007) de tres tipos de subsoladores (cinceles), los resultados indican que, *"...un subsolador parabólico requiere de menor fuerza comparado con un subsolador convencional y un subsolador triplex"*.

b. Profundidad de la labranza. Es determinada por el cultivo, tipo de suelo, tipo de herramienta, elección de labranza, necesidad agronómica y la capacidad de los animales, entre otros. Para optimizar el esfuerzo de los animales y la herramienta de labranza, no se debería profundizar la herramienta más allá de lo justo y necesario, para afectar positivamente el área de las raíces de las plantas y cultivos. En el caso puntual de los cinceles, podríamos señalar que estos generan un poco de arado siempre y cuando el trabajo se realiza en condiciones de humedad adecuada. Aun así, y dependiendo del ancho de la punta del cincel se podría estar creando las condiciones para un pie de arado.

c. Velocidad de trabajo. Los animales determinan la velocidad de trabajo, obviamente. La velocidad de trabajo se mantiene relativamente constante y ésta disminuye a medida que transcurre el periodo de trabajo, durante el día. Aun así, para optimizarla se deberían considerar los siguientes factores: buenos aplomos y herraduras, cascos limpios sin barro/piedras por debajo, extremidades (patas) sin daños aparentes (ej. cojeras), arneses en buenas condiciones e implementos con adecuado mantenimiento (engrasados/aceitados) y en perfectas condiciones de trabajo. Durante

la labranza, se deja a los animales trabajar a un paso cómodo y a una velocidad que les permita continuar operando con la maquinaria o implementos por varias horas en el día. Normalmente, los animales de tiro trabajan con un mínimo de input por parte del operador ya que éstos suelen caminar voluntariamente halando el implemento al mando de su voz, y como respuesta a su nobleza (disposición) para el tiro. A diferencia de un tractor, la velocidad del animal de tiro no se regula indiscriminadamente, más bien se les deja caminar a su propia velocidad para evitar afectar la integridad física del animal y su agotamiento prematuro. Es vital no excederse con el peso de las herramientas para que no afecten negativamente la velocidad y capacidad de tiro. Según Owen (1988), citado por Kasisira (2005, p. 14):

“...quien estudió la relación de velocidad de trabajo vs fuerza de tiro y perturbación del suelo durante la labranza con el subsolador, ha reportado una significativa correlación entre la fuerza de tiro y la velocidad de trabajo del subsolador, pero también reportó no significativa correlación entre la velocidad de trabajo y la perturbación del suelo”. (p. 14). Quien concluyó que a mayor velocidad mayor es la demanda de tiro.

d. Resistencia al corte. La resistencia del suelo al corte es determinada por: tipo de suelo (principalmente su textura), grado de compactación, contenido de humedad, geometría y tamaño de las herramientas. Sería de mucha utilidad tratar de obtener información disponible sobre la resistencia del suelo al corte o grado de compactación, con las autoridades competentes, tales como, Agustín Codazzi, UMATAs, etc., para conocer detalles del suelo en el cual se trabaja o trabajaría. También, se debe agregar el estado de mantenimiento de la herramienta a utilizar. En general, las herramientas de trabajo con buen mantenimiento y en perfectas condiciones de uso hacen de la labranza un trabajo más placentero, tanto para los animales como para el operador.

1.6.3 Tracción animal con caballos de tiro

La tracción del caballo de tiro se define como la fuerza de desplazamiento (hacia adelante o hacia atrás) derivada del contacto de las extremidades de los animales y la superficie del suelo, con el propósito de superar el tiro generado por la resistencia del suelo (a las herramientas agrícolas) o al peso de una carga. La transmisión de la fuerza o potencia se hace a través de palancas, constituidas principalmente, por selectos huesos (fémur y omoplato), músculos, tendones y articulaciones

(corvejón), terminando en los aplomos del caballo de tiro (MacDonald, 1909, pp. 437–439). Los cascos son las partes del caballo que permanecen en contacto con el suelo y se asume que la fricción es mínima. De allí, que los animales son considerados más eficientes en el tiro que un tractor, debido a estos no producen la fricción que se manifiesta entre las llantas de un tractor y el suelo. Según lo mencionado por Ortiz-Laurel & Cowell (2007):

“Los animales producen fuerza (potencia) como resultado de las fuerzas de tracción originadas por la interacción entre los cascos y el suelo. El esfuerzo del animal se aplica al suelo al nivel de los cascos ya que la textura y el nivel de compactación del suelo tienen una importante influencia en la disponibilidad del esfuerzo tractivo” (FAO, 1972). (p. 4).

La **Figura 1-12** muestra como fuerzas externas impactan en el caballo durante su esfuerzo tractivo.

Figura 1-12: Fuerzas externas que impactan en el caballo durante su esfuerzo tractivo

O' :

α : ángulo de tiro

D : fuerza de tiro

V : fuerza vertical efectiva

P : potencia de tiro

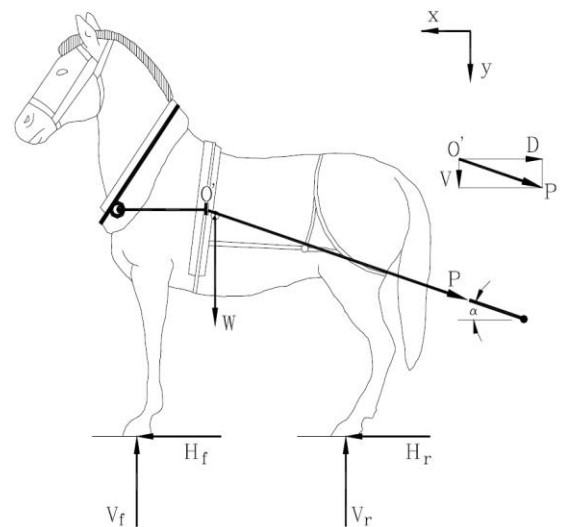
W : peso del animal

H_f : tracción horizontal con extremidades frontales

H_r : tracción horizontal con extremidades traseras

V_f : fuerza de apoyo vertical con extremidades frontales

V_r : fuerza de apoyo vertical con extremidades traseras



Fuente: (Ortiz-Laurel & Cowell, 2007)

Un operador (agricultor) experimentado, reconoce cuando el(los) animal(es) necesita(n) descansar, o cuando la capacidad de tiro ha mermado considerablemente durante el día, lo que sugiere que se debería dar por terminadas las labores de campo, y retirar a los animales del potrero para

dejarlos descansar hasta el siguiente día. De ahí la importancia de caminar junto a los animales de tiro mientras ellos realizan trabajos que demandan de mucha energía, como es el caso del arado de cincel, y de esta manera el operario pueda monitorear la condición física del(os) animal(es) a lo largo del trabajo. Por lo tanto, la variabilidad en la velocidad de trabajo sería mínima y no influenciaría significativamente en el comportamiento de la herramienta de labranza en el suelo.

Según Walters (2016, p. 1) *“La efectividad de la labranza es dependiente de la velocidad de trabajo del implemento y la unidad de fuerza utilizada para jalarla a través del suelo”*. A diferencia del trabajo con el tractor, en donde se pueden alcanzar altas velocidades, los caballos de tiro pesado mantienen una velocidad de trabajo (caminando) relativamente mas lenta, la cual oscila entre 4 y 5 km/hr, tanto para la labranza primaria (pesada) como para la labranza secundaria (a excepción del trote corto). Debido a que las primeras pruebas de tiro fueron realizadas con caballos, estas velocidades se han mantenido como recomendaciones para el uso eficiente de la maquinaria e implementos en los diversos trabajos agrícolas. La velocidad de desplazamiento de los animales con la herramienta también influye en la eficiencia de los animales la que equivale a la cantidad de trabajo realizado en un periodo de tiempo. No obstante, debido a la diferencia en la velocidad y capacidad de trabajo, existen pequeñas diferencias en la geometría de los implementos para uso con tracción animal vs tractor. Cabe señalar que a medida que la velocidad aumenta, también aumenta el tiro (Naderloo, L., Alimadani, R Akram, R, Javadikia, P ZeinaliKhanghah, 2009, p. 382; Walters, 2016, p. 5). Por consiguiente, es muy necesario respetar las recomendaciones de velocidades para cada implemento que hacen los fabricantes de maquinaria agrícola, para obtener los mejores resultados en la preparación del suelo.

1.6.4 Capacidad Teórica vs Capacidad Efectiva vs Eficiencia de Campo

1.6.4.1 Capacidad teórica

Es la capacidad máxima asumida de los animales de tiro operando con una herramienta agrícola e incluye la velocidad estimada y su ancho de trabajo. La capacidad teórica puede obtenerse utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 1-4

$$\text{Capacidad Teórica (ha/h)} = \frac{\text{Velocidad x Ancho (m)}}{10}$$

1.6.4.2 Capacidad efectiva

Es la superficie trabajada por los animales con la herramienta o máquina agrícola en tiempo real. Puede expresarse con la siguiente ecuación:

Ecuación 1-5

$$\text{Capacidad Efectiva (ha/h)} = \frac{\text{Superficie Trabajada (ha)}}{\text{Tiempo Utilizado (h)}}$$

1.6.4.3 Eficiencia de campo

Es la fracción de tiempo por unidad de superficie trabajada. Se utiliza para determinar la eficiencia del uso de animales de tiro y selecta herramienta(s) agrícola(s). Puede expresarse de la siguiente manera:

Ecuación 1-6

$$\text{Eficiencia de Campo (\%)} = \frac{\text{Capac. Efec. (ha/h)} \times 100}{\text{Capacidad Teórica (ha/h)}}$$

Fuente: modificado de Riquelme et al.(1991)

1.6.5 Caballos de tiro como generadores de energía

Los caballos de tiro pesado pueden desempeñarse eficientemente como fuente de energía barata, para mecanizar la agricultura de la región andina. En la actualidad, los animales de tiro se consideran eficientes máquinas de combustión interna, al generar suficiente energía para realizar trabajos de labranza, operar con maquinaria agrícola, transportar cosechas y reducir el consumo de combustibles fósiles.

A comienzos del siglo XX, investigadores definieron el rol de los caballos de tiro como gestores de energía para el trabajo agrícola. Tal como lo sugiere King (1901, p. 487) mencionado por Collins & Caine (1926):

“Cuando los animales (equinos) son visto como máquinas, ellos son mecanismos maravillosos. No solamente son auto alimentadores, auto controladores, auto mantenedores y auto reproducibles, pero son mucho más económicos por la energía que son capaces de desarrollar, desde una cantidad dada de combustible que cualquier otra forma existente de motor. Aunque ellos son como un motor a vapor en requerir combustible a carbón, oxígeno y agua para desarrollar energía, estos ingredientes se combinan en el cuerpo del animal a una temperatura más baja a la que sería posible en un motor a vapor y en una menor proporción, el valor del combustible se pierde en la forma de calor cuando se está trabajando”. (p. 194)

La mecanización con caballos de tiro ha suplementado la producción agrícola y forestal con energía menos costosa y localmente producida. Por ende, se le considera más eficiente que la mano de obra y más económica que el tractor.

Según Huerga et al. (2011, p. 4)“...con la tracción animal se estarían ahorrando cerca de 50 MJ de energía fósil por hectárea sembrada con el implemento propuesto (sembradora Dolzani)”.

Para transmitir la energía del caballo de tiro a la maquinaria o implemento agrícola, estos utilizan dos tipos de arneses: pechera y collar. El arnés de pechera es una banda que se posiciona horizontalmente en el pecho del caballo y lleva un par de cadenas o correas (tiros o tirantes) para enganchar/conectar el animal con la maquinaria o el peso a jalar, y una lomera para suspender las cadenas o correas de tiro (ver

Figura 1-13).

Figura 1-13: Caballos utilizando arneses de pechera



Fuente: Facebook: Alain-Lorand, Francia, 2017

El arnés de collar es un sistema mucho más elaborado y ergonómicamente más cómodo para el trabajo de labranza, y está compuesto por un par de yugos (madera o metal), un collar de cuero (rellenado con paja de trigo) y ahormado al cuello del animal, un par de cadenas o correas (tirantes), una lomera y una baticola para sostener el collar y evitar que se voltee hacia adelante cada vez que el caballo se agache (ver **Figura 1-14**). Un componente adicional es la retranca, un accesorio que se utiliza para ayudar al animal a frenar o controlar el peso (carreta) que hala, principalmente en pendientes. Con la ayuda del arnés, el animal puede jalar de manera cómoda, segura y eficiente, cargas y herramientas agrícolas. La dinámica de esta acción en relación con el funcionamiento del tiro, en particular, fue explicado por Miller (2004) de la siguiente manera:

“Cuando el caballo, enganchado a la carga se mueve hacia adelante, éste “empuja” sobre el collar con la punta de sus hombros y el pecho para iniciar el movimiento. Una vez en movimiento, la dinámica de esta acción se traslada hacia un esfuerzo de jalar la carga a través de los tirantes (o tiros) del arnés” (p. 23).

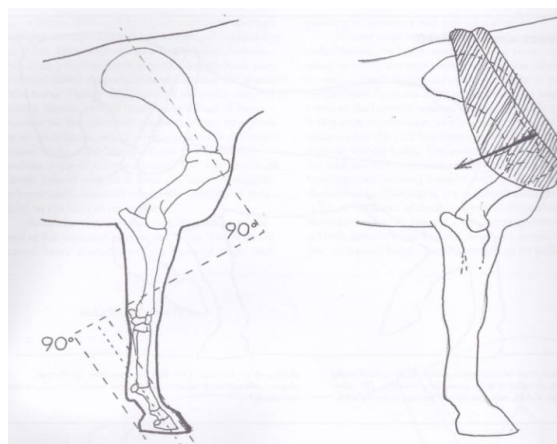
Figura 1-14: Caballo de la raza Brabante con arnés de collar y yugos de tubo metálico



Fuente: Gentileza de Willy Mertens. Brujas, Bélgica

Un factor importante en la determinación de la calidad de tiro del caballo lo determina la estructura física (anatomía) del caballo como tal. Miller (2004, p. 23) sugiere que la característica “natural” en el caballo de tiro, además de relacionarse con la formación y calidad ósea, es poseer hombros con un ángulo natural de 90° . (Ver **Figura 1-15**)

Figura 1-15:a) Angulo natural del hombro; b) Collar montado sobre los hombros



Fuente: (Miller, 2004, p. 23)

Podemos agregar que existen otras características igualmente importantes y que son vinculantes a la calidad del caballo de tiro, lo que hacen de éste una eficiente máquina de generar potencia (energía). Las características deseables y muy bien señaladas en la **Figura 1-16**, son:

- a. Poseer un sistema óseo fuerte con huesos de buen tamaño (diámetro) para permitir el desarrollo y anclaje de un mayor número de fibras musculares y ligamentos,
- b. Tener corvejones de buen tamaño, con articulaciones sanas y ligamentos bien desarrollados y maduros (fuertes) lo que permitirá utilizar los huesos largos como “palancas” con seguridad y protección contra accidentes cuando halan grandes pesos.
- c. Disponer de una espalda corta a medianamente larga y relativamente plana para desarrollar un lomo fuerte,
- d. Contar con un hueso ilion (pelvis) de tamaño mediano a largo, el cual se usará como “palanca” con el hueso femoral.
- e. Poseer un hueso “canilla” de buen diámetro y corto que acerque el “punto de tiro” a la superficie del suelo.

Figura 1-16: Reproductor de la raza italiana de caballo de tiro



Fuente: Facebook Annalisa Parisi (2016)

La sabiduría tradicional vincula estrechamente el desarrollo muscular, tren trasero y la calidad de los corvejones a la calidad del tiro animal. Pero, un estudio reciente señala que el sistema locomotor de los caballos de tiro en sí también genera una importante porción de la fuerza animal total. Ortiz-Laurel & Cowell (2007) afirman:

“El apoyo alternativo y las fases de los pasos de las extremidades mientras el animal está moviéndose, resulta en una aplicación periódica intermitente de las fuerzas de sus patas. Las fuerzas externas que actúan sobre el animal son reacciones al contacto de las patas con la superficie del terreno, la fuerza de tiro a través de los tirantes y la gravedad”. (p. 2)

Si bien es cierto que las extremidades delanteras y traseras tienen el rol de generar la fuerza necesaria para la locomoción, jalar peso y mantener el equilibrio, las extremidades delanteras específicamente deben mantener el balance de la 2/3 parte delantera del cuerpo, especialmente durante el movimiento.

Un agricultor y criador de caballos de tiro pesado de Alemania (anónimo) con vasta experiencia en la crianza y uso de caballos de tiro, explicó que el role del tren delantero es principalmente de sostener y balancear las 2/3 parte del cuerpo (porción delantera), mientras que el tren trasero debe sostener la 1/3 parte (trasera) del cuerpo y generar la fuerza de tiro para empujar o jalar la carga.

1.6.6 Capacidad y rendimiento del caballo de tiro pesado

Desde comienzos de los años 1900's, se dieron inicios a extensos estudios para “cuantificar” la capacidad de trabajo que generan estos animales y cuyos resultados se publicaron en la literatura técnica de la época. En 1926, se lleva a cabo en la Universidad de Iowa una investigación para determinar la capacidad de fuerza de los caballos de tiro pesado, en condiciones de campo, halando implementos agrícolas y cuyos resultados se detallan a continuación, en la **Tabla 1-4**:

Tabla 1-4: Resultados de Pruebas de Fuerza de Tiro con Varios Implementos Agrícolas.

<i>Implemento</i>	<i>Fuerza de Tiro (kgf)</i>	<i>Profundidad/cultivo</i>	<i>#Equinos</i>
1. Arado de vertedera 14" (Sulky)	226	15 cm/pasto sudan	3
2. Arado de vertedera 14" (Sulky)	226	12.7 cm/pasto azul	3
3. Arado de vertedera 14" (Sulky)	190	17 cm/barbecho	3
4. Arado de vertedera 14" (Sulky)	235	15 cm/barbecho de maíz	3
5. Arado de vertedera 14" (Sulky)	217	10 cm/pastura	3
6. Arado de vertedera 14" (x2)	344	15 cm/barbecho de maíz	4-5
7. Arado de vertedera 14" (x2)	626	12.7 cm/alfalfa	7-8
8. Arado de vertedera 14" (x2)	293	21 cm/arena profunda	4
9. Arado de vertedera 14" (x2)	385	21cm/tierra negra/profunda	5-6
10. Rastra de disco, 2.4 m, 16" dia.	181	Barbecho de maíz	3
11. Rastra de disco, 2.4 m, 16" dia.	204	Pasto azul	3
12. Rastra de disco, 2.4 m, 16" dia.	250	Pastura arada	4
13. Rastra de disco, 10" dia.	267	Arada de Otoño	4
14. Rastra de disco, 10" dia.	294	Barbecho de maíz	4-5
15. Rastra de disco, 8" dia.	265	Barbecho de maíz	4
16. Desterronadora (Cultipacker) 2 m.	136		2
17. Cultivador, 2 hileras	245	8.8 cm	3-4
18. Cultivador, 2 hileras	136	6 cm	3

Fuente: (Collins & Caine, 1926)

La conclusión de esta investigación señala que el número de caballos de tiro utilizados para jalar un implemento es variado y está directamente relacionado con la demanda de fuerza en relación con el tipo y uso del suelo, herramienta y tipo de cultivo. Por ejemplo, "un arado de vertedera doble de 14 pulgadas requirió de 344 kg de fuerza para arar un barbecho de maíz con 4 a 5 caballos; y, el mismo arado trabajando un cultivo de alfalfa requirió 626 kg de fuerza, equivalente al uso de 7 a 8 caballos" (Collins & Caine, 1926, p. 209).

El agricultor, escritor y editor Norteamericano Miller (2004), a través de una de sus publicaciones destacó la capacidad de trabajo de una "collera" de 2 caballos de tiro pesado, en un escenario

agrícola del Noroeste de los EE. UU. de clima templado, terrenos planos y laderas suaves, detallando los siguientes rendimientos:

1. Arar 0.6 a 0.8 hectárea por día (promedio 1/2 ha/animal con arado de 12”).
2. Discar 4 hectáreas por día (rastra de 2 cuerpos de 12 discos).
3. Rastrillar (con rastra de púas) 4 a 5 hectáreas por día.
4. Sembrar 3.24 hectáreas de pasto por día.
5. Sembrar 3 a 4 hectáreas de papas/maíz por día.
6. Cultivar 3.24 hectáreas de papas/maíz por día.
7. Cortar 3.24 hectáreas de pasto por día.
8. Hilarar 6.5 hectáreas de pasto por día.
9. Tirar una zorra 40 km por día.
10. * (Transportar 1.000 kilos de carga en una carreta por 5 km.)

(Miller, 2004, p. 209)

Obviamente, los resultados de las investigaciones sobre las capacidades de trabajo de los caballos de tiro pesado se han realizado en el contexto de una agricultura tipo europea, de clima templado y practicada en terrenos de baja altitud. Estos resultados pueden ser muy beneficiosos como guía para compararlos con los resultados obtenidos en el entorno agrícola de la región andina Cundi-Boyacense.

1.7 Factores que influyen en la labranza agrícola con tracción animal.

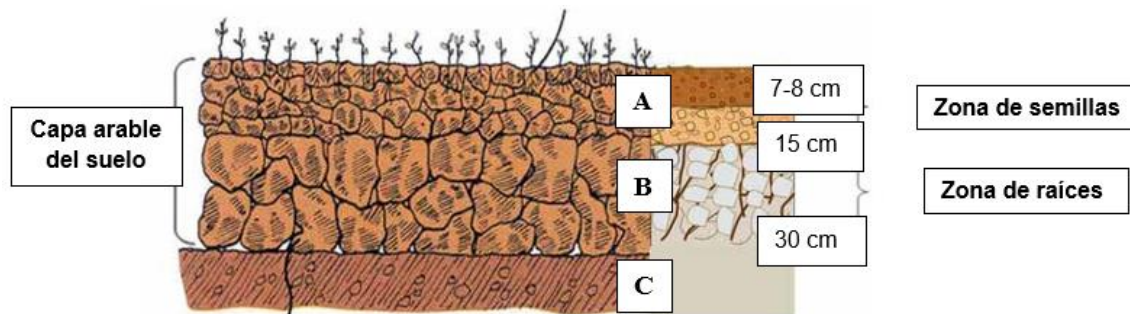
1.7.1 Suelo

El fundamento de la agricultura. El suelo proporciona un medio para el crecimiento del alimento, fibra y madera, los que utilizamos para nuestro consumo. Poseer un adecuado conocimiento en esta materia es primordial, para facilitar en gran medida la toma de (buenas) decisiones con respecto a: prácticas y técnicas de labranza con caballos de tiro; seleccionar herramientas apropiadas para reducir el daño físico al suelo y su calidad; identificar el cultivo o sistema

productivo apropiado; e, investigar la disponibilidad y tipo de mecanización, siendo ésta última de las más influyente en el factor riesgo a la integridad física del suelo. Un gran porcentaje de los suelos agrícolas de la región poseen la capacidad para producir cultivos y pastos. La fertilidad y profundidad de los suelos se caracterizan por la alta presencia de materia orgánica y buen drenaje, pero también, existen suelos marginales de bajo contenido en materia orgánica, con drenaje muy pobre y un alto grado de erosión influyendo en su baja capacidad productiva. La topografía y los cambios térmicos que ocurren a diferentes altitudes en los Andes Orientales influyen en el uso de los suelos. Los suelos andinos son aptos para la siembra de cultivos anuales y perennes; la crianza de ganado lechero y/o carne; y producción maderera (bosques). Los suelos se utilizan con un mínimo de criterio técnico creando las condiciones para su deterioro. Una de las causas principales de deterioro de los suelos agrícolas es el uso indiscriminado del tractor con herramientas mal seleccionadas y peor empleadas y técnicas no apropiadas para los tipos de suelos de la región altiplánica. Estas prácticas de labranza están causando la reducción progresiva del contenido de materia orgánica en la capa superficial del suelo, un aumento en la compactación debido al excesivo tráfico de maquinaria pesada, y una alta erosión eólica y fluvial, afectando su capacidad productiva. La rotación: papa - ganadería, ha resultado endémica para la sostenibilidad de los suelos andinos porque fomenta la compactación y la erosión.

Los suelos ubicados en los páramos andinos se les aprecian por sus cualidades para almacenar agua y carbono. Tienen la habilidad de absorber y manejar la humedad que proviene de las lluvias y de la espesa niebla la que libera lentamente en las quebradas y ríos (Llambi et al., 2012, p. 253). No obstante, el IGAC en su Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca (2000), caracterizó la calidad de los suelos de Cundinamarca como **“predominantemente distróficos”** (Ch. 5: 420). Los suelos agrícolas andinos están compuestos en un 45% por material mineral, 5% por materia orgánica y un 50% por espacio poroso ocupado por agua y aire (Inostroza, F. & Méndez L., 2009, p. 30). Los horizontes **A** y **B** son señalados como la “capa arable” del suelo en donde el horizonte **A** contiene la mayor actividad de microorganismos y presencia de materia orgánica en proceso de descomposición. La capa arable del suelo es la más fértil y demanda de la mayor atención por parte del agricultor, porque es aquí en donde los procesos de labranza ejercen su influencia. En otras palabras, hablamos de un suelo cuyas características deberían ser evaluadas por su calidad para el sustento del crecimiento de cultivos y animales (Ver **Figura 1-17**).

Figura 1-17: Capa arable del suelo (cama de siembra) y horizontes A, B y C



Fuente: (Inostroza, F. & Méndez L., 2009)

1.7.2 Calidad del suelo

Ésta se define simplemente, como ***“la capacidad de funcionar de un específico tipo de suelo”*** (USDA, 1999, p. 5), mencionado por Estrada-Herrera & Hidalgo-Moreno, Claudia Guzmán-Plazola, Remigio Almaraz Suarez, José Navarro-Garza, Hermilio Etchevers-Barra (2017). Se evalúa de acuerdo con su “capacidad funcional” para permitir que tanto plantas, microorganismos y animales puedan desarrollarse y reproducirse en dicho ambiente. La calidad del suelo también influye muy directamente en la calidad del agua que utilizamos para las diversas actividades domésticas e industriales. Según Stiver, 2017 (p. 1) ***“La calidad del suelo es fundamental para las prácticas agrícolas”***. En general se requiere de un suelo en condiciones fértiles, con buena estructura física, química y buena actividad microbiológica para permitir el crecimiento adecuado de las plantas y cultivos en general. La calidad del suelo es evaluada midiendo sus componentes físicos, químicos y biológicos y sus interacciones (Stiver, 2017, p. 2). El ministerio de agricultura de los EE.UU. también, recomienda ***“realizar mediciones periódicas para monitorear cambios o tendencias en calidad de suelo... y/o comparar valores medidos con los de una condición del suelo estándar o de referencia”*** (USDA, 1999, p. 1).

La selección y uso de las herramientas de labranza deberían ser sopesados en gran medida por los indicadores físicos, químicos, biológicos y demás, debido al impacto y posibles consecuencias

negativas que éstas podrían significar para la sostenibilidad misma del suelo. El desarrollo de los indicadores de calidad, se formalizan con relación a las funciones que el suelo podría realizar especialmente, sobre aquellas características físicas más susceptibles a ser afectadas por las herramientas agrícolas, provocando cambios en su uso (Bautista Cruz et al., 2004, p. 93).

1.7.3 Indicadores de calidad

Los indicadores de calidad son variables temporales y sitio específico (Estrada-Herrera & Hidalgo-Moreno, Claudia Guzmán-Plazola, Remigio Almaraz Suarez, José Navarro-Garza, Hermilio Etchevers-Barra, 2017, p. 814). Estos se utilizan para evaluar las condiciones de salud y de capacidad productiva de los suelos agrícolas. El proceso de evaluación se realiza en relación con las funciones y los cambios que puedan generarse en el suelo, a raíz de la labranza y demás prácticas agrícolas. Los indicadores de calidad (IDC) son físicos, químicos, biológicos y medio ambientales y demás eventos o interacciones y cambios que ocurren en un suelo de un área específica (Bautista Cruz et al., 2004, p. 92,93,95).

1.7.3.1 Indicadores físicos

Son aquellos que reflejan la manera como el suelo reacciona o interactúa para permitir el movimiento del agua, afectar el crecimiento de las raíces, germinación de las semillas, resistencia a la penetración de herramientas agrícolas, el desarrollo de las plantas, etc. Según Bautista Cruz et al. (2004, p. 93) *“se proponen como indicadores físicos: la estructura, densidad aparente, estabilidad de los agregados, infiltración, profundidad del suelo, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada”*.

A. Compactación. La compactación afecta la capacidad productiva de los suelos. Cuando esto ocurre, el suelo adquiere firmeza y se endurece al punto de resistir a la penetración de las herramientas de labranza y las raíces de las plantas. Según Dörner (2019), la compactación, *“...es una deformación plástica que altera de forma irreversible el volumen de poros y su capacidad para conducir fluidos”*. Un proceso muy diferente a aquellos asociados con *“ciclos de humectación y secado, que también provocan deformación, pero el proceso se asocia a hinchamiento y*

contracción". El grado de compactación está directamente relacionado al tipo de suelo donde el fenómeno ocurre. Kasisira (2005, p. 6), señala que no solamente un aumento en la compactación aumentaría considerablemente el uso de energía en la labranza, sino que también, afectaría negativamente el crecimiento de las plantas particularmente, si el suelo tiene muy poca humedad. La compactación reduce el tamaño de los poros y estos a su vez restringen la capacidad de permitir la fluidez y el almacenamiento de las aguas-lluvias, aire y *nutrientes* (Inostroza, F. & Méndez L., 2009, p. 30; Kasisira, 2005, p. 1; Riquelme Sanhueza & Jiménez Carrasco, 2011, p. 3)). ***"La compactación es causada por el estrés mecánico que excede la fortaleza o resistencia mecánica del suelo (conocido también como capacidad de soporte y presión de precompresión), ocasionando una mayor deformación física del suelo"*** (Dörner et al., 2017, p. 1065). Según Medina M. Carlos (2016, p. 92), ***"...el pisoteo de los animales compacta el suelo en los primeros 15 cm, ocasionando una severa disminución en el movimiento interno del agua y un aumento en la densidad aparente"*** La compactación es una de las causas principales de la degradación sistémica de los suelos y genera pérdida de fertilidad disminuyendo su capacidad productiva.

Para corregir la compactación a corto plazo, se utilizan varios tipos y tamaños de cinceles (ej. rígidos, vibradores, etc.) e incluso cinceles los cuales penetran con un mínimo impacto en las condiciones físicas del suelo, para incrementar la porosidad. A diferencia de los arados de vertedera y discos, los cinceles no voltean el suelo ni disgregan excesivamente la condición física del suelo, al punto de causar "rompimientos" excesivos en su consistencia, mejorando la integridad física del mismo y su posterior uso. Los cinceles, se operan cercanos a la superficie hasta profundidades superiores a 45 cm con el propósito de mejorar la porosidad del suelo, romper el pie de arado y permitir una mejor infiltración de las aguas-lluvias (y riego) para estimular el desarrollo de las raíces y disminuir daños causados por retención superficial de agua y/o la erosión hídrica (aguas de escorrentías) (Kasisira, 2005, p. 2). Un suelo suelto con un mayor grado de porosidad permite el almacenaje de humedad fomentando un aumento en la producción y la calidad de los pastos y cultivos (Carrasco et al., 2012, p. 11).

B. Porosidad. La porosidad se caracteriza por la presencia y el tamaño de sacos de aire en el suelo y es determinada por su proporción en el volumen del suelo, el cual está compuesto en un 45% en material mineral, 5% en materia orgánica y un 50% en espacio poroso ocupado por agua y aire

(Inostroza, F. & Méndez L., 2009, p. 30). La porosidad permite el desarrollo de las raíces de pastos y cultivos y facilita el movimiento de gases y agua, por lo que la labranza con herramientas y técnicas apropiadas (menos nocivas) promueven el desarrollo de la porosidad en los suelos agrícolas. Los suelos arcillosos contienen una mayor proporción de porosidad, hasta de un 60% del volumen del suelo. (Castellanos, 2012, p. 62; Riquelme Sanhueza & Jiménez Carrasco, 2011, p. 1). A través de la labranza se puede soltar el suelo (reducir su resistencia mecánica) para crear las condiciones físicas de porosidad. Sin embargo, dadas las características físicas de los suelos Andisoles de nuestra región, se podría estar afectando sus propiedades físicas, tales como, la recuperación de la estructura del suelo y sus funciones de porosidad (Dörner et al., 2017, p. 1064,1065).

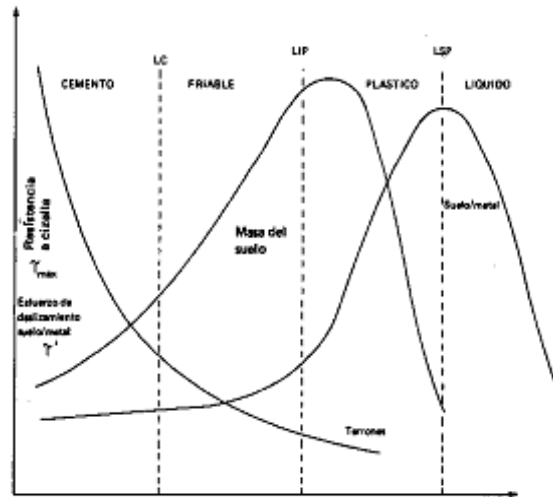
C. Consistencia. La consistencia del suelo dice relación con el contenido de humedad y cómo esta afecta las condiciones físicas durante las labores de labranza. Según lo señalan Carrasco et al. (2012, p. 12), Ashburner & Sims (1984, p. 7), existen cuatro estados de consistencia (física) del suelo, los cuales se identifican como: Cementado, Friable, Plástico y Líquido.

Un suelo “cementado” opone el máximo de resistencia al corte con los implementos de labranza. Cuando se rompe, se generan grandes terrones que dificultan posteriormente otro tipo de labores. Un suelo “friable” es aquel que contiene una mayor humedad que el suelo cementado y suficiente humedad para realizar los trabajos de labranza, permitiendo que el suelo se rompa con menor requerimiento de fuerza y disminuya el tamaño de los agregados con menor dificultad. La labranza con animales es mejor cuando se realiza mientras el suelo se encuentra en estado friable, porque requerirá de menor fuerza de tiro (Castellanos, 2012, p. 66); (Sanchez Cruz, 2004, p. 11). Un suelo “plástico” contiene más humedad dificultando la labranza y causando que el suelo se pegue a la herramienta aumentando el requerimiento de fuerza para moverla. El suelo “líquido” es aquel que contiene una mayor humedad, pasando de un estado plástico a una consistencia líquida, comportándose como un fluido. Este tipo de consistencia es típicamente utilizada en la producción del cultivo de arroz (Ashburner & Sims, 1984, p. 8; Carrasco et al., 2012, p. 12).

D. Plasticidad. Los límites Atterberg de consistencia, miden la consistencia del suelo (Dörner, 2019) y son puntos de transición entre estos estados, cuyos parámetros sirven para determinar el momento apropiado para labrar el suelo. Según Ashburner & Sims (1984, p. 54) ...“**Los límites (de**

Atterberg) definen los valores del porcentaje mínimo y máximo del contenido de humedad del suelo en su estado plástico. Se les denomina límites inferior y superior de plasticidad (LIP y LSP), respectivamente”, como se señala en la Figura 1-18.

Figura 1-18: Relación contenido de humedad del suelo vs. resistencia al corte. En un suelo friable entre LC y LIP la resistencia al corte es menor y facilita el laboreo



Fuente: (Ashburner & Sims, 1984, p. 64)

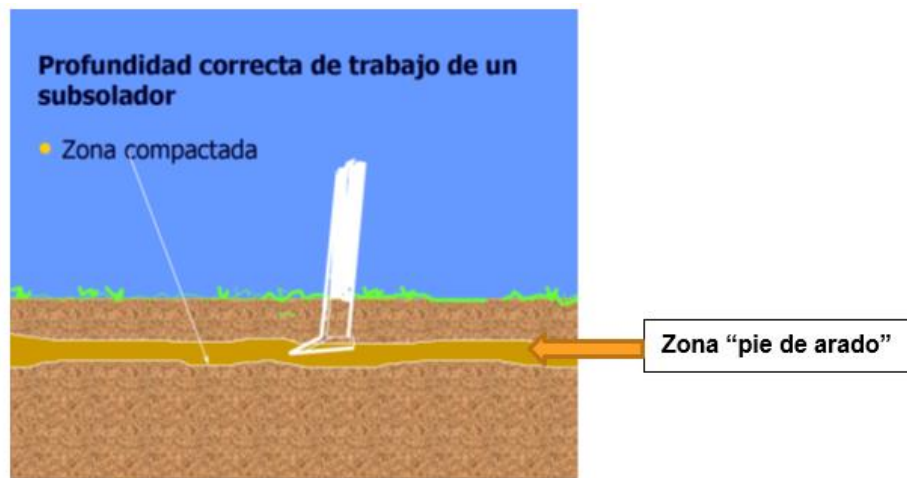
La plasticidad es determinada por el contenido de arcilla presente en el suelo y es influenciada por el contenido de humedad y en cierta manera, por la materia orgánica presente en las arcillas, las cuales se unen para formar cadenas de cohesión. En la preparación de tierras, al labrar un suelo en estado seco se aterrona o se pulveriza y si el material está mojado se apelmaza, se vuelve plástico y fácilmente se adhiere a las herramientas. ... ***“El contenido de humedad óptimo para la labranza es aquel que se acerca al del límite plástico inferior, punto en el cual el suelo tiene comportamiento friable y, por tanto, facilita las labores de labranza”*** (Carrasco et al., 2012, p. 12; IGAC, 2000, p. 377).

E. Textura. La textura del suelo es una condición física en la que también pueden apreciarse a través del tacto de las partículas de suelo (arcilla, limo y arena). ***“La textura más equilibrada para el buen desempeño agrícola, corresponde a suelos francos (arcilla entre 7-27% y limo entre 28-50%);***

éstos presentan una tendencia uniforme a retener agua, a la vez que permiten la difusión de gases, con lo cual las funciones fisiológicas de la planta no sufrirán limitaciones” (IGAC, 2000, p. 373). Más específicamente, la textura se relaciona con “...*la porosidad, infiltración y disponibilidad de agua; densidad aparente, relacionada con la tasa de infiltración y conductividad hidráulica; y la estabilidad de agregados, que se relaciona con la resistencia a la erosión y contenido de materia orgánica”* (Chen, 2000) mencionado por Acevedo et al. (2005, p. 46), (IGAC, 2000).

Los suelos arcillosos tienen la capacidad de mayor retención de humedad que los suelos arenosos y limosos y por lo general, son muy susceptibles a alteraciones físicas causados por la labranza convencional, especialmente, cuando existe una alta presencia de humedad. Este tipo de suelo se encostra o tiende a crear un “pie de arado”, tal como lo demuestra la **Figura 1-19** (Riquelme Sanhueza & Jiménez Carrasco, 2011, p. 17).

Figura 1-19: Zona “pie de arado”



Fuente: (Carrasco et al., 2012)

F. Densidad. Es un factor determinante en la calidad física del suelo. La densidad del suelo puede ser real o aparente y a ésta última lo determina el grado de porosidad (compactación). Por ejemplo, a mayor contenido de materia orgánica menor es su densidad aparente. (Castellanos, 2012, pp. 59–70). Según Mouazen y Ramon (2002), mencionado por Nkakini (2015, p. 54) “...**el incremento**

de la densidad aparente aumenta la fuerza de tiro de los implementos de labranza...” lo que influenciaría la capacidad de tiro de los animales, al reducir su velocidad de trabajo y aumentando el tiempo requerido para completar la faena.

G. Infiltración/retención de agua. El agua se mueve a través del suelo y la cantidad y velocidad de la infiltración es determinada por el grado de porosidad, siendo ésta afectada por la labranza, pisoteo de los animales en pastoreo, abundancia o falta de materia orgánica, tráfico de maquinaria pesada, pendiente y otros (Volverás-Mambuscay B, Amézquita-Collazos E, 2016, p. 369).

1.7.3.2 Indicadores Químicos

Son factores que condicionan las relaciones entre las plantas, agua, microorganismos y nutrientes presentes en el suelo (Bautista Cruz et al., 2004). Los indicadores químicos que contribuyen a generar los indicadores de calidad son: ***“capacidad amortiguadora del suelo, disponibilidad de nutrimentos para las plantas y microorganismos, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total y lábil, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno total y mineralizado, capacidad de absorción de fosfatos y disponibilidad de micronutrientes”***. (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; NRCS, 1996; Bautista et. al. 2004; Bautista, et. al., 2011; Bautista y Etchevers, 2014), mencionados por Estrada-Herrera & Hidalgo-Moreno, Claudia Guzmán-Plazola, Remigio Almaraz Suarez, José Navarro-Garza, Hermilio Etchevers-Barra (2017, p. 816).

Acidez (pH): Establece las interacciones química y biológica del suelo. (Bautista Cruz et al., 2004, p. 94). La producción de la gran mayoría de pastos y cultivos ocurre en un rango de acidez (pH) de 5.5 a 7.0 (USDA, 1999).

Nutrientes disponibles: (N-P-K). Indicadores de la capacidad del suelo para alimentar las plantas, cantidad de nutrientes presentes y disponibles, indicadores de la calidad ambiental (Bautista Cruz et al., 2004, p. 94).

Conductividad eléctrica: Indica la proporción de sales (Sodio) presentes en el suelo y cuyo exceso afecta el crecimiento de pastos y cultivos. ... ***“Interpretaciones de calidad de suelo para sitios específicos depende del uso específico de las tierras y de la tolerancia de los cultivos”*** (USDA,

2000). El uso del yeso agrícola (Sulfato de calcio) como enmienda del suelo aumenta la tolerancia de las plantas a las sales de suelos áridos y muy especialmente en suelos húmedos donde el nivel freático es muy alto, como es el caso del Valle de Ubaté.

1.7.3.3 Indicadores Biológicos

Puntualizan la actividad vegetal y microbiana del suelo, a través de **C&N** de la biomasa microbiana; materia orgánica, humedad y temperatura del suelo; N mineralizable; y lombrices (Bautista Cruz et al., 2004, p. 94).

A. Materia orgánica. La materia orgánica se encuentra presente en la superficie del suelo (capa arable), favorece la estructura física y reduce su compactación. La presencia de materia orgánica es vital para determinar el grado de densidad del suelo y en facilitar la retención de humedad, lo que permitiría un adecuado trabajo de labranza con animales de tiro. Junto a las partículas de arcilla, la M.O. ejerce una marcada influencia sobre la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en favor de mejoras en las propiedades físicas del suelo, tales como, permeabilidad (filtración) y retención hídrica, fuente de nutrientes para las plantas y pastos, reducción de la erosión y promoción de la aireación del suelo. Sin embargo, la presencia de rastrojos (materia orgánica aún no descompuesta) afecta el desplazamiento de las herramientas de labranza y generan resistencia al rendimiento de la fuerza de tiro. El abono de los animales de tiro es una excelente fuente de materia orgánica y estaría inmediatamente disponible a no costo para el pequeño productor. Una vez la materia orgánica es secada o preparada como compostaje, ésta puede ser esparcida e incorporada en el suelo durante la labranza (Bautista Cruz et al., 2004, p. 94; Inostroza, F. & Méndez L., 2009, p. 31).

B. Humedad y temperatura del suelo. La humedad juega un papel fundamental en el comportamiento de las herramientas de labranza con el suelo, ya que la humedad condiciona la resistencia del suelo a la roturación e influye en el tamaño de los agregados (terrones). Las condiciones cambiantes de humedad en el suelo afectan enormemente las condiciones de tiro. La humedad excesiva, especialmente en suelos arcillosos, crea un barro que se adhiere a las herramientas creando condiciones que aumentan la fuerza de tiro. Por el contrario, si la humedad es muy baja, el suelo seco se endurece aumentando la fricción y la resistencia a las herramientas de labranza. (Daraghme *et.al.*, 2009) mencionado por (Makudih, 2016, p. 24). Un tractor en

condiciones de alta humedad resbalaría mucho más que un animal de tiro, no obstante, ambos tendrían que aumentar sus capacidades de fuerza al límite, causando marcas/huellas en el suelo dañando las propiedades físicas del suelo y ocasionando un alto grado de compactación.

Los terrones de gran tamaño que se forman durante la aradura del suelo pueden vincularse con la falta de humedad, y a raíz de esto requeriría de una labranza secundaria para mullirlo y mejorarlo para la siembra. En contraste, el suelo seco forma terrones duros y por tanto, arar un suelo más húmedo dejaría un medio más mullido (granular) casi imperceptible en su tamaño y produciría una textura de barro que obstaculizaría el drenaje, aumentando su grado de adherencia y sellando la superficie del suelo. Un suelo óptimo para la labranza debe ser de consistencia friable, el punto de humedad que se encuentra muy próximo al límite de plasticidad (LP), tal como se ilustra en la **Figura 1-18**. La humedad debe ser considerada como una “aliada” en la labranza primaria (de calidad), y el agricultor debe familiarizarse con los parámetros recomendados para el uso eficaz de las herramientas de labranza bajo ciertas condiciones de humedad, para evitar causar daño excesivo a la estructura del suelo y reducir el esfuerzo de los animales de tiro.

La labranza de los suelos agrícolas debería estar estrechamente ligada con el ciclo de lluvias, ya que ésta determina el momento propicio para realizar la preparación de suelos, siembras, mantenimiento de los cultivos, etc. Desafortunadamente, la labranza en muchos casos no se realiza a tiempo porque el servicio de tractor o animales de tiro no está disponible. Irónicamente, la mecanización agrícola técnicamente mal programada es la tecnología que más daño le causa a la hidrología de las regiones andinas, permitiendo la expansión de la frontera agrícola hacia los Páramos, destruyendo la ingeniería tradicional de canales de irrigación y las mejoras para el control/contención de las escorrentías (ej. terrazas), fomentando la erosión.

Según Mamani et al. (2001, p. 130), *“La labranza antes de la siembra permite conservar más agua en el suelo en comparación con un suelo sin labranza, debido a que ésta logra romper los microporos de la capa arable”*.

Cuando las condiciones de alta humedad saturan los suelos, los animales de tiro pueden labrar la tierra con menor dificultad que el tractor, pero no es recomendable por el amasado que se produce

en el suelo. Se debería esperar varios días después de una intensa lluvia, para que el agua se infiltre y el suelo adquiera una mayor firmeza antes de reanudar o comenzar el trabajo.

El rango de humedad más apropiado para labrar el suelo satisfactoriamente se define como la diferencia entre LIP (límite inferior de plasticidad) y LSP (límite superior de plasticidad) y éste se obtiene utilizando la siguiente fórmula:

$$\theta Rango = \theta LIP - \theta LSP$$

(Notas: Autor, Presentación ppt. Curso: Dinámica de suelos, UNAL, 2do semestre 2017)

Para determinar el contenido humedad en el suelo se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 1-7

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{Ww - Wd}{Wd} \times 100$$

Dónde:

Ww = peso de la muestra de suelo húmeda (g);

Wd = peso de la muestra de suelo seca (g)

C. Lombrices. Estas mejoran la calidad del suelo. Su presencia es indicativa de una relativa actividad microbiana y fertilidad química del suelo, como también, mejoras en las características físicas del suelo (ej. porosidad). La presencia de lombrices también es indicativa del alto o bajo uso de agroquímicos (Abi-Saab Arrieche, 2012, p. 19). Las lombrices aceleran la descomposición de la materia orgánica (USDA, 2000).

1.7.4 Fertilidad del suelo

Es una calidad del suelo para almacenar y brindar los nutrientes necesarios para alimentar y fomentar el crecimiento de las plantas. Los nutrientes se clasifican en principales y secundarios, siendo lo primarios: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Un factor importante agregado

a los nutrientes es la acidez del suelo, la cual se mide en pH y el nitrógeno potencialmente mineralizable, como el indicativo más confiable para determinar la productividad del suelo y la disponibilidad del nitrógeno (Bautista Cruz et al., 2004, p. 94). La gran mayoría de los cultivos se desarrollan en un pH entre 6.2 y 6.8 (Stiver, 2017, p. 1).

1.7.5 Resistencia al corte/penetración

La resistencia mecánica del suelo a la deformación está basada en su cohesión, tipo de suelo y frecuencia de la labranza. Cada una de ellas demuestra un cierto grado de variabilidad de acuerdo con el contenido de humedad, tamaño de las partículas, forma y tamaño de los agregados y grado de consolidación del suelo (Dörner, 2019), (FAO, 2005). Según Walters (2016) ... ***“La resistencia al corte es una medida de la fuerza necesaria para deformar el suelo... algunas veces se expresa en kN/m² de profundidad”***. También, puede expresarse en kgf/cm² para otros equipos.

Particularmente, en lo relacionado al uso de herramientas de labranza a tiro animal, estas se utilizan con el propósito de estudiar su comportamiento cuando expuestas a los rigores de resistencia del suelo al corte (roturación) versus tensión y compresión, e influencia en los animales ya que influyen en la potencia de tiro de los animales. Las herramientas de labranza se someten a las fuerzas de resistencia, las que invariablemente lo deformarán de manera diferente, dependiendo del tipo de suelo y la geometría de la herramienta (Kasisira, 2005). Durante la labranza primaria la rotura del suelo se realiza con el uso de cinceles, subsoladores, arados de disco, etc. La teoría de falla del suelo (cohesión) en la labranza pasiva explica los eventos que suceden durante la dinámica de roturación. Según la teoría de la “falla (física) del suelo en la labranza pasiva” de O’Callaghan and Farrelly (1964), mencionado por Kasisira (2005, p. 8), ***“...los implementos usados en la labranza pasiva para la preparación del suelo actúan forzando el suelo hasta generar un quebramiento (estallamiento/rotura). Una vez, la fuerza es aplicada a la herramienta de labranza, el estrés en el suelo aumenta en una zona que se extiende frontalmente desde la superficie de la herramienta en contacto con el suelo”***. En otras palabras, durante el avance de la herramienta se forma un cono adelante ocasionando un “estallamiento” cuando se rompe. Mientras el cincel rotura el suelo, éste evacúa el suelo hacia arriba y los lados, generando un efecto tri-dimensional.

Como lo expresa la teoría sobre la falla física del suelo de Coulomb y el criterio de falla definido por Mohr-Coulomb, ésta última representada por medio de la siguiente ecuación:

$$T_s = C_c + \sigma_n \tan \phi$$

Dónde:

T_s = Máximo estrés de corte del suelo al roturar (kPa).

C_c = Coeficiente de cohesión del suelo (kPa).

σ_n = Estrés normal ejercida sobre el plano de ruptura (kPa).

Φ = Angulo interno de fricción del suelo (grados).

Fuente: (Kasisira, 2005, p. 9)

1.8 Herramienta(s) de labranza primaria

1.8.1 Cincel parabólico

Es una herramienta de labranza primaria cuya función principal es romper el suelo para mejorar su porosidad y facilitar la aireación y movilidad del agua y aire. El cincel parabólico goza de mucha popularidad debido a las múltiples ventajas que ofrece (Riquelme Sanhueza & Jiménez Carrasco, 2011). También, puede ser utilizado como un “arado de cincel” para penetrar y “estallar” el suelo a diferentes profundidades en preparación a la siembra. El cincel en modo de aireación rotura el suelo para agrietarlo finamente para procurar un mayor almacenamiento de agua y aire (oxígeno), reduciendo la compactación y favoreciendo el desarrollo de las raíces de pastos y cultivos. La profundidad promedio de trabajo depende de las necesidades de labranza, condición física del suelo y el cultivo a sembrar.

El rol designado del cincel parabólico fue el rayado de potreros, como una práctica de labranza muy necesaria, para mejorar la porosidad de los suelos y fomentar el crecimiento y calidad de forraje y cultivos en general. Para la roturación del suelo existe una amplia selección de cinceles con una punta adecuada para su uso, los cuales se someten a la resistencia del suelo al corte o estallamiento, y determinan el tipo de acabado de la labranza. Los cinceles delgados (finos)

producen una fisura (grieta) más fina que los cinceles gruesos, estos últimos definitivamente, requieren de mayor energía que los cinceles delgados. Según un estudio comparativo sobre el uso de energía para labores de labranza y mejoramiento de suelos, se concluyó entre otros, que los cinceles en la labranza vertical utilizaron un 15.6% menos energía que en la labranza convencional (Cadena Zapata, Martin Campos et al., 2013).

Los cinceles se fabrican en diferentes tamaños y formas (rectos y parabólicos) para responder a las necesidades de los diferentes tipos de suelos y herramientas. Según observaciones de campo del autor, los cinceles utilizados con tracción animal agrietan los suelos más finamente, permitiendo un acabado de mejor calidad que con cinceles de mayor tamaño. Igualmente, la profundidad de trabajo se limita a una profundidad de entre 10-15 cm lo que demanda de menor energía versus labranza a profundidades mayores. Además, debido a que los suelos de la región andina son por lo general poco profundos y combinado con cultivos de raíces superficiales (salvo excepciones), no se amerita labrar el suelo tan profundamente (*King 1907*).

1.8.2 El disco de corte

Ha probado ser de mucha utilidad, como complemento al cincel parabólico. El disco corta los residuos dejados por las cosechas y el sistema radicular de los pastizales para facilitar la penetración y el desplazamiento del cincel en el suelo. Existen tres tipos de discos: planos, corrugados y “flautas”. Los discos de corte facilitan las formaciones de fisuras limpias con un mínimo contenido de suelo dentro de los surcos delgados y planos, con un mínimo de aspereza, perturbación e irregularidades en la superficie del suelo para evitar que los animales en pastoreo dañen sus patas/extremidades.

El disco de corte es un accesorio de vital importancia para disminuir la demanda de energía favoreciendo la eficiencia de los animales de tiro y de la herramienta agrícola. Los efectos cinemáticos del disco de corte tienen una directa relación sobre la cantidad de energía requerida para operar el cincel en tareas de labranza. Otro beneficio directo del disco de corte es facilitar el diseño de implementos con bajo requerimiento de energía o fuerza de tiro, haciéndolos más aptos para la labranza con animales de tiro. Según un estudio dirigido por el Ing. Campos Magaña Santos

Gabriel (2000), “... encontró que la combinación disco de muescas y doble disco permite incrementar la eficiencia de corte de residuos en un 30% y reducir en un 60% la fuerza de tiro, permitiendo la siembra de 3 hileras de cultivo con el empleo del “Yunticultor”, carro de enganche para uso con bueyes.

1.9 Labranza agrícola en laderas

La geografía de los terrenos agrícolas de la región altiplánica es variada. Estos van desde terrenos planos a muy escarpados. Tradicionalmente, los campesinos o pequeños agricultores han estado asociados con el trabajo en suelos marginales (laderas), quienes han adaptado técnicas de trabajo, especialmente con bueyes.

Para el trabajo en laderas con caballos, con pendientes superiores a 15°, las herramientas deberán ser pequeñas, livianas y su diseño debería permitir su uso sin que éstas se deslicen durante su desplazamiento por las laderas (Ver **Figura 1-20** a y b). En el caso que se desee utilizar una máquina como el carro de enganche, el cual posee un perfil alto, se recomienda que su trabajo esté limitado a laderas inferiores a 15° de pendiente.

Figura 1-20: a) Rayado de potrero en ladera con un cincel pequeño b) aporcando un cultivo en hilera en ladera



a)



b)

Fuente: a) (Sanhueza, 2018), b) Anónimo – internet

El uso de animales de tiro en laderas se considera relativamente más seguro, además, son más aptos para trabajar con técnicas de labranza de conservación para reducir/controlar la erosión y la

compactación de suelos. El trabajo en laderas empinadas se dificulta cuando se emplean caballos de tiro pesado, debido a su peso, altura y tamaño de cascos. Tradicionalmente, el trabajo en laderas se ha limitado al uso de animales de menor estatura, cascos pequeños y de menor peso corporal, tales como, las mulas, caballos cruzados (media sangre) y bueyes.

En terrenos planos, el uso de caballos de tiro se simplifica de gran manera, permitiendo el empleo de equipos de mayor tamaño y enganches de más de 2 caballos. En laderas, los animales de tiro son afectados por varios factores, tales como: velocidad de trabajo, tamaño y peso de las herramientas, técnicas de labranza, enganche de los animales, experiencia del operador, etc. Otro factor crítico que considerar es el grado de inclinación del terreno, porque crea una condición de riesgo. A mayor inclinación, mayor es la posibilidad de que ocurran accidentes porque los animales y la maquinaria pueden volcarse o resbalarse y rodar ladera abajo.

1.10 Costos asociados con el uso de caballos de tiro

1.10.1 General

Los costos asociados con la utilización de la tracción animal pueden considerarse muy altos, debido a la falta de un mercado que oferte maquinaria e implementos agrícolas de calidad y producidos localmente a precios razonables y no se tenga que recurrir a productos importados. La carencia de una “cultura” asociada con el caballo de tiro y su uso en la agricultura, puede ser la causa para la falta de adopción de dicha tecnología y para que no se incentive el desarrollo de talleres artesanales y mercados locales, los cuales son necesarios para el desarrollo y la producción de herramientas y aperos a nivel local.

No existen estudios formales sobre costos relacionados con el uso de caballos de tiro en actividades agrícolas para el altiplano Cundi-Boyacense. Se asume que los costos de compra, mantenimiento y operación de la maquinaria y los animales de tiro son menores al de un sistema con tractor. Los costos asociados exclusivamente al uso de caballos de tiro en labores agrícolas pueden dividirse en: inversión inicial, gastos operativos, gastos de mantenimiento y gastos adicionales.

1.10.2 Costos

Los **costos de inversión (inicial)** están relacionados con la compra o adquisición del paquete tecnológico, el que incluye: animales de tiro, maquinaria, implementos agrícolas, arneses e infraestructura como, por ejemplo: corrales. (Ver **Anexo C**). Los **gastos operativos** (gastos fijos y gastos variables), son aquellos necesarios para el funcionamiento normal del paquete tecnológico de tracción animal e incluyen: salarios y herrería, mantenimiento y reparación de la maquinaria e implementos, etc. Los **gastos de mantenimiento** se limitan principalmente a cuidados y alimentación, y son relativos al tamaño de los animales y la regularidad con la que se utilicen. La ración alimenticia diaria se considera de mantenimiento o trabajo (y de crecimiento para los potros). A estos costos directos habría que agregar los costos de la infraestructura, como corrales, comederos y bebederos, muy necesarios para poder mantener a los animales cómodamente en pesebreras y no permitirles que pasten en los potreros, los cuales serían dedicados a la producción de cultivos, pastos y otros. Los **gastos adicionales** (imprevistos) se relacionarían con la visita del Veterinario (ocasionalmente), mano de obra adicional (externa), medicinas, etc.

En un análisis/estudio informal (sondeo) realizado en 2013, Sanhueza (2018) concluyó lo siguiente:

- a. La diferencia significativa de los precios de compra de los varios paquetes tecnológicos para tiro animal radica en el tamaño y calidad de los animales. Los precios de compra se aproximan al precio de un tractor de capacidad equivalente a 40-45 HP, para un paquete que incluye dos animales de raza pura de 800 kg.
- b. Los costos relacionados con la depreciación de ambos paquetes tecnológicos desfavorecieron al tractor. Los caballos se “reproducen” y por consiguiente no se deprecian (debe poseer una yegua para vientre como mínimo).
- c. Es necesario fabricar gran parte de la maquinaria agrícola a tracción animal localmente, para reducir costos que implican los altos aranceles de importación.
- d. La producción y venta de las crías sería una entrada adicional para aumentar los ingresos del productor. Otros ingresos adicionales estarían relacionados con el servicio de entrenamiento de animales y el de labranza agrícola.

1.10.3 Costos adicionales

Son aquellos costos ocasionales y “complementarios” para la compra de combustible para operar un carro motorizado a tracción animal y en comparación a los gastos de combustible, aceites, mantenimiento y reparaciones asociados al uso de un tractor serían menores.

A. La experiencia del criadero Los Brabantes (Guasca, Cundinamarca) es lo más cercano que tenemos en la Sabana de Bogotá, con respecto al uso de caballos de tiro en la producción de forraje. El propósito del criadero es producir vientres para la producción de caballos de tiro pesado para el mercado local. La raza utilizada (preferida) para este propósito es el Belga Europeo o Brabante.

Aspectos importantes de las actividades del criadero se resumen a continuación:

- a.** El criadero mantiene a 11 animales (3 reproductores, 3 yeguas y 2 caballos y 3 crías), en completa estabulación.
- b.** Costo mensual de alimentación por animal es de aproximadamente \$200,000, incluye: concentrado, pasto de corte, aditivos nutricionales medicinas, etc.
- c.** En la época seca el pasto de corte se suplementa con aproximadamente 600 pacas de heno adquiridas en el mercado local.
- d.** Se mantienen entre 3 a 4 animales adultos entrenados para ser utilizados en las varias faenas requeridas para la producción, cosecha, manejo y conservación de forraje.
- e.** El costo anual aproximado de medicinas es de \$1'000,000 a \$1'200,000. Incluye desinfectantes, vacunas, antibióticos, aceite mineral, medicinas, agujas, jeringas, etc. El costo anual de los servicios veterinarios es de aproximadamente \$600,000.
- f.** Los animales se utilizan para operar la cortadora de pasto (guadaña) con dos animales y jalar una carreta para el transporte del pasto cortado para alimentar el resto de los animales. Dos animales se utilizan durante ½ hora 3 veces a la semana; y un animal por 2 horas 3 veces a la semana. Mensualmente, se utilizan 3 animales para un total aproximado de 48 horas/mes o 576 horas/año, para apoyar la alimentación de los caballos del criadero.

- g.** Los caballos de tiro también realizan trabajos de aireación en 2,6 ha, dos veces al año. Se usan dos caballos para subsolar los potreros con el SIMATA y demoran aproximadamente 1,5 hora/ha (total: 12 horas/año).
- h.** Adicionalmente, los animales participan en días de campo y ferias para demostrar su utilidad en labores productivas de campo.
- i.** Otra actividad adicional, es el desarrollo de prototipos de maquinaria e implementos agrícolas para ser utilizados con caballos de tiro, por pequeños y medianos agricultores.

B. Otros ejemplos de sistemas productivos en donde se utilizan caballos de tiro se encuentran principalmente en los E.E.U.U. Según un estudio informal en el que participaron 4 pequeños agricultores (cuatro sistemas productivos) y cuyos resultados fueron publicados en la revista técnica *Small Farmer's Journal*, Nordell (2012) se concluyó lo siguiente:

- a.** Los caballos se utilizaron entre 210 a 2,500 horas, anualmente.
- b.** La mano de obra externa se limitó a ayudar durante ciertas fases de la producción agrícola (ej. cosecha).
- c.** Las 4 fincas basan su actividad económica en la producción de hortalizas como una actividad comercial principal, y se complementan con la producción lechera y forestal.
- d.** El “tiempo no-productivo” versus “tiempo productivo” de los caballos de tiro se limita en promedio a un 40% del tiempo total anual, lo que incluye: tiempo para aperarlos, viajes de ida y vuelta a los potreros, giros en las cabezas de los surcos, descansos durante el trabajo, esperando el turno en-arnés mientras se realizan otros trabajos, etc.
- e.** El beneficio de utilizar un solo caballo en las tareas agrícolas reduce en un tercio las horas de uso por caballo, pero, significativamente aumenta el costo de mano de obra/caballo/hora. Por lo que se recomienda, calcular el costo de la mano de obra para determinar la eficiencia y productividad de uso de los caballos de tiro.
- f.** En promedio, se utilizaron entre 50 a 53 minutos/día en mano de obra para atender cada animal 8 h/día.

C. Un estudio, dirigido por el Profesor James (2003) del Servicio de Extensión Agrícola de la Universidad de Ohio, en las comunidades Amish del Condado Geauga, Ohio, se compararon los

costos de dos sistemas productivos, uno en donde la mecanización agrícola se realizó con caballos de tiro y el otro sistema productivo convencional en donde se utilizó el tractor.

Aproximadamente, seis a diez agricultores “Amish” pertenecientes a tres distritos (comunidades) participaron en este estudio. Según los entrevistados,

- a. El típico día de trabajo se limitó a 6 horas/diarias. Tres horas por la mañana y tres horas por la tarde y descanso al mediodía para el almuerzo.
- b. Un típico número de caballos utilizados para cada tipo de trabajo osciló entre 2 y 3 animales (ver **Anexo F**).
- c. La comparación entre los costos de producción del sistema productivo tipo “Amish”, a base de caballos de tiro versus un sistema productivo convencional a base de tractor, dio como resultado que el ingreso neto por acre de una finca Amish, con excepción de los costos de mano de obra y administración, fuese consistentemente mayor a la convencional. Específicamente, el ingreso neto de la mano de obra y la administración del sistema productivo tipo Amish se estimó en (USD): \$ 126/acre de granos, \$233/acre de heno de alfalfa, y \$65/acre de maíz. El ingreso neto para el sistema productivo convencional fue de (USD): \$28/acre de granos, \$124/acre de heno de alfalfa, y pérdida de \$9/acre para el maíz.
- d. El uso de la mano de obra (por acre) en el sistema productivo Amish, fue consistentemente alto en comparación al sistema convencional. En el sistema productivo Amish se requirieron aproximadamente 12, 25, y 17 horas de mano de obra/acre para producir una acre de granos, heno de alfalfa y maíz respectivamente, mientras que, en el sistema convencional, se utilizaron 3.5, 6.5, y 3.6 horas de mano de obra/acre para los mismos cultivos.
- e. El sistema productivo “Amish” opera económicamente en menos terreno (menor número de acres) que el sistema convencional y produce “en rotación”: 15 acres de

granos, 20 acres de heno de alfalfa y 15 acres de maíz (50 acres), con un uso de 920 horas/año de mano de obra (23 semanas de 40 horas/semana) con requerimientos de mano de obra esparcidos a través de las temporadas de producción (primavera, verano y otoño) en un clima de tipo templado a frío. En la mayoría de los casos, las numerosas familias Amish proveen su propia mano de obra (interna) para suplir las necesidades del sistema productivo, a diferencia del sistema convencional, en donde los costos anuales se basan en una producción de 1,000 acres de maíz, limitados a 3,600 horas o 90 semanas de 40 horas/semana con el uso mínimo de mano de obra “externa” al sistema productivo (James, 2003, p. 4).

D. Otro estudio sobre el potencial económico de trabajar con caballos de tiro de Chet Kendell (2005), economista agrícola y agricultor, se resume de la siguiente manera:

- a.** El análisis económico utiliza dos caballos de tiro para 25 acres (10.1 ha).
- b.** El cálculo de fuerza de tractor requerido para trabajar en su sistema productivo es de 1.4 HP por acre.
- c.** Número de caballos requeridos para trabajar una acre: 0.08.
- d.** El requerimiento de mano de obra aumenta en un 20% cuando se usan caballos.
- e.** El tractor usado en el estudio fue recientemente adquirido (nuevo) con una capacidad de 35 HP.
- f.** Se contó con un carro de enganche motorizado (motor de 24,7 HP)
- g.** Las crías, el abono de caballo y la orina, se incluyeron como ingresos adicionales.

La información presentada es útil para hacer una “relativa” comparación con nuestras experiencias locales y puede ser utilizada para orientar cálculos en donde se incluirían costos locales representativos de la región. Se podría asumir que los costos de mano de obra y de administración serían significativamente menores que los encontrados en este estudio. Similarmente, los precios de nuestros productos agrícolas serían igualmente menores debido a la inestabilidad de nuestros mercados nacionales y a la falta de una política de precios más justos. Sin embargo, el uso de la mano de obra sería inmediatamente disponible, imprescindible y relativamente menos costosa para utilizarla en el manejo de los caballos de tiro, en aquellos sistemas productivos en donde el empleo de la mano de obra externa sería muy necesario.

En términos generales, podemos resumir que el uso de animales de tiro en la región Cundi-Boyacense, en el mejor de los casos es una actividad de medio tiempo e incluye el transporte de cantinas de leche. El uso de la mecanización proviene principalmente del uso del tractor y no existe un uso colaborativo que indique un uso combinado de mecanización con tractor y animal(es) de tiro. El servicio de maquinaria agrícola para realizar faenas de labranza es la oferta principal de mecanización para pequeños agricultores de la región andina. En el Departamento de Cundinamarca se reporta el costo de arriendo promedio de un tractor para el cultivo de la papa en \$50.000/hora (pesos colombianos). Existen servicios similares con tracción animal los que se ofrecen para formar/preparar surcos para la siembra y/o tapar la semilla de papa, a un costo de \$120.000/día (6 horas/día).

Para independizarse, el productor tendría que asociarse para optar a ayudas económicas y créditos, a la vez que tendría que adoptar nuevas prácticas agrícolas relacionadas a la agricultura comercial, lo que le permitiría mejores opciones económicas para poder pagar la inversión inicial y sostener su sistema productivo.

1.11 Capacidad artesanal y semi-industrial para fabricación y reparaciones de herramientas agrícolas

La capacidad para reparar máquinas e implementos agrícolas es primordial para el sostenimiento de la tecnología a tracción animal. Los mayores talleres de metalmecánica se ubican principalmente en Bogotá y otras ciudades de Colombia. Existen talleres artesanales en la mayoría de los municipios y pequeñas comunidades rurales en donde maestros artesanos poseen una capacidad relativa para fabricar y reparar simples maquinas e implementos agrícolas a tracción animal. Desafortunadamente, carecen de la preparación formal en el área de la mecanización agrícola, para realizar reparaciones y fabricaciones eficazmente.

La carencia de conocimientos básicos (materiales, mecanizado, soldadura, normas y estándares, etc.), en el campo de la mecanización agrícola y la falta de herramientas y maquinaria industrial/semi-industrial para reparar adecuadamente las herramientas, limita la capacidad innovadora y restringe la capacidad reparadora de estos talleres. Sin embargo, los talleres de

herrería y de metalmecánica existentes pueden ofrecer un servicio razonable de reparación para mantener las herramientas en condiciones de operar en el campo.

1.12 Transferencia y adopción de la tecnológica a tracción animal

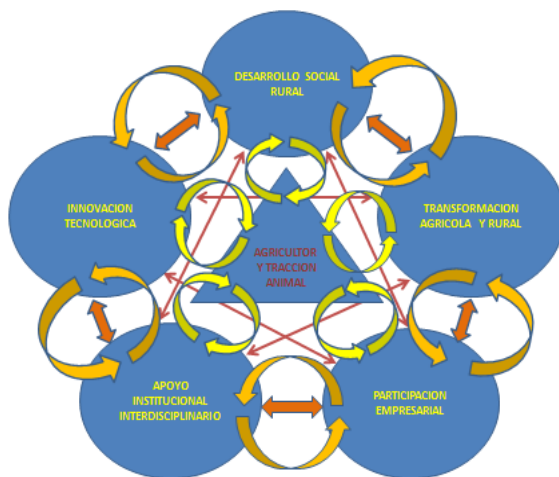
El uso de caballos de tiro representa una tecnología cuya fuente de energía es renovable, de bajo costo y socialmente aceptable, que fomenta la economía circular, para mecanizar la producción agrícola de pequeños y medianos agricultores y transformar la agricultura local y nacional. Aunque la mecanización con animales de tiro está ocurriendo a menor escala, en algunos municipios de la región Cundi-Boyacense entre cultivos de pastos, papa, granos y hortalizas, la falta de recursos económicos (capital) para la adquisición de animales, maquinaria e implementos agrícolas (incluyendo su reparación) afecta el interés y la participación de pequeños y medianos agricultores en la adopción de dicha tecnología. La tracción animal con caballos de tiro facilitaría la independencia al uso del tractor, fomentando un adecuado manejo del limitado capital en efectivo disponible de una gran mayoría de pequeños y medianos productores (micro-empresarios), quienes han apostado a la agricultura como una fuente de ingresos para mejorar la economía familiar y hacer un aporte a la economía rural.

Se entiende como transferencia tecnológica de mecanización con caballos de tiro, como el proceso de asimilación y/o adopción de la tracción animal, para generar cambios individuales y colectivos de importancia, el cual se aceptaría como un concepto tecnológico actualizado o renovado de fuente energética (potencia) de bajo costo, aplicada a las actividades de labranza y transporte en la producción agrícola, ganadera, forestal y el agroturismo. La calidad de la innovación tecnológica, tal como lo sugiere Gebresenbet, Gilma Kaumbutho (1997, p. 170), “**...puede ser medida en la manera que ésta: (a) es apropiada para la familia campesina, (b) requiera de menor energía (para su funcionalidad), (c) genere una mayor autosuficiencia (socioeconómica), y (d) promueva la conservación del agua y suelos con el sistema de labranza (apropiado).**”

Las tecnologías agrícolas apropiadas dirigidas a mejorar la productividad del campo son muy escasas pero necesarias para mejorar la eficiencia laboral. Dichas tecnologías ayudarían a reducir los tiempos requeridos para completar las labores agrícolas, especialmente bajo condiciones climáticas muy adversas.

La estrategia para la transferencia y adopción de la tracción animal en la región Cundi-Boyacense podría suscribirse al Modelo Multisectorial de Transferencia y Fomento a la Tracción Animal, elaborado sobre varios fundamentos/pilares, identificados como “actores del proceso”, tal como se identifican en la **Figura 1-21**.

Figura 1-21: Modelo Multisectorial de Transferencia y Fomento a la Tracción Animal



Fuente: (Autor, 2017)

Actualmente, Colombia cuenta con una política de Estado a través de la Ley No 1876 del 29 de diciembre de 2017, la que ha creado el “Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria” para la Transferencia Tecnológica (TT) del sector agroalimentario. Sus tres pilares: Investigación & Desarrollo, Formación y Capacitación para la Innovación; y Extensión Agropecuaria, han sido creados con el propósito de generar competitividad, innovación y sostenibilidad en el sector agrícola. (Revista Semana, 2018b). Las nuevas tecnologías exigirán habilidades técnicas para ser operadas, y éstas podrán ser adquiridas principalmente a través de la enseñanza y la capacitación formal (ej. SENA). La adopción de la tecnología de mecanización con caballos de tiro podría realizarse de igual manera y cuya aplicación se sustentaría en las enseñanzas que nos han dejado las múltiples experiencias (negativas) relacionadas con la utilización del tractor.

2 CAPITULO: OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

Evaluar la viabilidad de utilizar caballos de tiro pesado como tecnología apropiada de mecanización para pequeños agricultores y trabajadores agrícolas en el altiplano Cundi-Boyacense.

2.2 Objetivos específicos

1) Construir un dispositivo electrónico que permita registrar información de capacidad de fuerza, profundidad de trabajo y velocidad de los caballos de tiro.

2) Realizar trabajos (ensayos – pruebas) de campo con el sistema biomecánico propuesto y maquinaria e implementos agrícolas en alturas de 2.500 a 3.000 m.s.n.m. del Altiplano Cundi-Boyacense.

3) Evaluar la capacidad, eficiencia y el impacto agronómico, social, económico, ambiental y tecnológico, del uso de caballos de tiro con implementos agrícolas en los suelos del altiplano Cundi-Boyacense.

2.3 Hipótesis

Los caballos de tiro pesado (y semipesados) se desempeñan en forma segura y eficaz, realizando diversos trabajos agrícolas en laderas y terrenos planos de la región andina, en altitudes de 2500 a 3000 msnm; operan con el sistema integral de mecanización agrícola a tracción animal (SIMATA) con mínima dificultad y mayor eficacia; demuestra capacidad para labrar en suelos de alta resistencia a la penetración/corte, en laderas suaves con pendientes <15°; reducen la

compactación y la erosión, debido a su menor peso; con diseños mejorados de alta calidad de maquinarias e implementos agrícolas, constituyéndose en una viable opción de tecnología intermedia de mecanización agrícola para pequeños (y medianos) agricultores y trabajadores agrícolas de la región andina.

3 CAPITULO: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La literatura de origen latinoamericana sobre el tema contemporáneo de la tracción animal con caballos de tiro es extremadamente limitada y lo poco que se encuentra disponible se enfoca principalmente al uso de bueyes. Es importante mencionar que gran parte de las más importantes investigaciones llevadas a cabo con caballos de tiro, se realizaron en su mayoría en los Estados Unidos y Europa, a fines de los 1800s y comienzos de los 1900s, las cuales coincidieron con el periodo de la revolución industrial. Hasta ahora, nuestro interés por rescatar el uso de la tracción animal sigue limitándose al uso de bueyes como una conexión cultural a nuestra herencia Ibérica. No obstante, se utilizó información actualizada disponible para presentar argumentos sobre el uso contemporáneo de caballos de tiro pesado en la agricultura andina.

3.1 Pruebas de Fuerza

Collins & Caine (1926) de la Universidad Estatal de Iowa (EE. UU.), llevaron a cabo una investigación sobre la capacidad de fuerza del caballo de tiro. Para realizar pruebas de fuerza, utilizaron tres dinamómetros, uno para medir grandes pesos a distancias cortas y el otro de menor peso para medir pesos normales. El dinamómetro grande tenía una capacidad para medir fuerzas de tiro de hasta 1859,7 kg (4.100 lb). El dinamómetro más pequeño tenía una capacidad para medir una resistencia variable (fuerza de tiro) entre 27,2 kg (60 lb) y 158,7 kg (350 lb) de cada animal individualmente conectado. (Ver **Figura 3-1**)

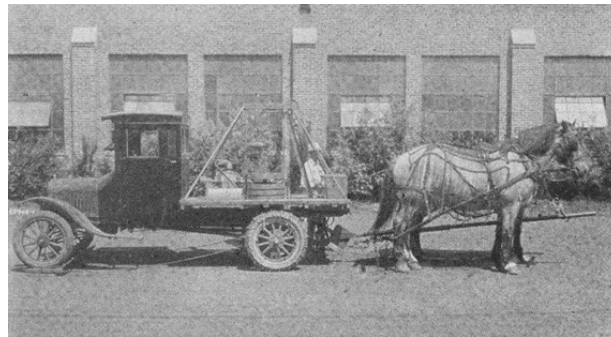
Figura 3-1: Dinamómetro pequeño para medir la fuerza de tiro de dos animales con cargas normales



Fuente: (Collins & Caine, 1926)

Un tercer dinamómetro, montado sobre el chasis de un camión Ford (Ver **Figura 3-2**) se fabricó para medir el máximo esfuerzo de dos caballos con un límite de 1.451,5 kg (3.193 lb). Las pesas utilizadas fueron fabricadas en hierro fundido (colado) y tenían un peso de 113.4 kg cada una.

Figura 3-2: Dinamómetro móvil montado sobre chasis de un camión Ford

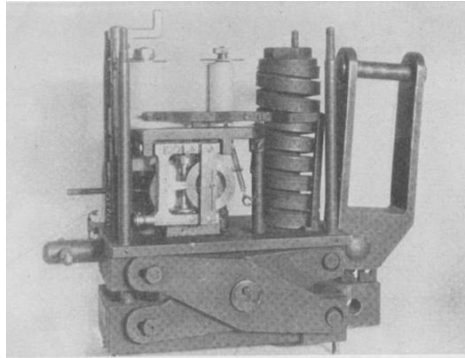


Fuente: (Collins & Caine, 1926)

Hubo un trabajo preliminar con tres caballos percherones con dos yeguas con pesos de 670 kg y 737 kg, en 1922. El ensayo se reanudó en el verano de 1923 por un periodo de 154 días con un par de caballos de tiro de 810 y 815 kg, respectivamente. En el tercer año (1924), los ensayos se reanudaron durante 219 días consecutivos, con un nuevo equipo de caballos de tiro de 800 y 805 kg, cada uno. Los animales fueron probados en trabajos de labranza, transporte y demostraciones de fuerza de tiro.

Las pruebas de tiro tuvieron lugar en suelos del tipo arcilloso-limoso en las cercanías de Ames, Iowa. Varios implementos agrícolas fueron utilizados en los ensayos de campo para medir la fuerza de tiro, se diseñó un dispositivo conocido como el “Dinamómetro Integrador de Tracción Iowa” (Ver **Figura 3-3**).

Figura 3-3: Dinamómetro Integrador de Tracción Iowa



Fuente: (Collins & Caine, 1926)

El dispositivo se utilizó con varios implementos agrícolas y durante los ensayos, se concluyó que las variaciones en las fuerzas de tiro estuvieron directamente relacionadas con las variaciones en el **“tipo de suelo, condiciones físicas del suelo, tipo de cultivos, profundidad del arado y porcentaje de humedad presente”**. (Collins & Caine, 1926, p. 16). La **Figura 3-4**, muestra el Dinamómetro Iowa conectado a un implemento agrícola halado por tres caballos.

Figura 3-4: “Dinamómetro Integrador de Tracción Animal - Iowa” acoplado a un implemento agrícola



Fuente: (Collins & Caine, 1926)

La información de fuerza de tiro recopilada durante dichos ensayos con varios implementos agrícolas se presenta en la **Tabla 1-4**, más atrás en la página 63, El estudio resalta además la capacidad de tiro de los caballos seleccionados, la importancia de hombros bien conformados y un collar bien ajustado al cuello y hombros del caballo. Un cuello/hombro “dañado” afecta la eficiencia de tiro del animal (Collins & Caine, 1926, p. 25), (Miller, 2004, p. 80).

Collins & Caine (1926, p. 38), concluyeron después de 3 años de investigación:

- a. Es muy factible que caballos de tiro que pesan entre 680 kg y 862 kg o más puedan jalar continuamente cargas equivalentes a 1 caballo de fuerza o superior por periodos de un día o varios.*
- b. Durante la investigación hubo un par de caballos que desarrollaron 29.76 HP en una prueba oficial.*
- c. La fuerza en reserva de los caballos es de un valor incalculable.*
- d. Durante los días de verano, la humedad (ambiental) puede afectar considerablemente a los caballos mientras realizan su trabajo.*
- e. El correcto posicionamiento del collar y el correspondiente cuidado de los hombros (pecho) de los caballos de tiro es esencial para obtener el máximo beneficio de los animales durante los trabajos. Trabajos realizados durante días muy calurosos afectan sus hombros, aunque se tomen todas las medidas para protegerlos.*
- f. Si fuese necesario trabajar los animales durante días lluviosos, se debería proveer un lugar (techo) en donde resguardar a los animales para mantener sus hombros y collares secos. Una humedad excesiva debajo del collar puede causar lesiones graves a los hombros de los caballos.*
- g. Es posible que los caballos de tiro puedan producir una potencia equivalente a 1/10 - 1/8 de su propio peso vivo y viajar 32 km por día con una carga de 172 kg. Si la distancia es menor, el peso de la carga podría ser mayor.*

Gebresenbet, Gilma Kaumbutho (1997) realizó un estudio en Kenia para determinar la dinámica de las medidas de fuerzas, momentos, velocidad de trabajo y profundidad de la labranza, con dos

arados de vertedera (europeo) y una versión moderna del arado reversible tipo Ard (Etiopia), para uso con animales de tiro. Para las mediciones de fuerza se utilizó un transductor octagonal extendido de presión del tipo anillo y para las mediciones de velocidad y profundidad de labranza un sensor de pulso. Un burro pequeño de 186 kg fue utilizado para jalar los implementos durante los ensayos. Los resultados indicaron que la demanda de fuerza del “arado renovador” Ard-reversible fue el menor (7.12 kNm⁻²), en relación con los arados de vertedera Rumpstad (12.33 kNm⁻²) y Victory (9.81 kNm⁻²). La diferencia en la velocidad de trabajo fue más notoria entre los tres arados, siendo el arado Ard reversible el que demostró una relativa ventaja sobre los otros dos. En términos de profundidad de trabajo el arado reversible mostró una leve desventaja, debido a su menor peso, aproximadamente un tercio de los otros dos (36.5 kg, 33.6 kg, respectivamente). La desventaja del menor peso se corrigió con el diseño de la punta del arado reversible el cual brindó una mayor succión. También, se notó que las fuerzas horizontales y verticales se aumentaron más rápidamente con un aumento en el ángulo del talón del arado a menos de 45 grados.

Schmit & Moscardo (2015), realizaron pruebas comparativas de tracción, en Luxemburgo e Italia, con dos hileradoras de pasto para un solo caballo de tiro, la REPOSSI 68/5 y la MAINARD 268 de fabricación italiana. Se enfocaron en medir la fuerza de tiro y la velocidad de trabajo del animal para realizar diferentes tareas, tales como, “voltear” para secar y amontonar el pasto en hileras. Los resultados indican que la hileradora REPOSSI 68/5 requirió de menor fuerza de tiro que la MAINARDI 268, hasta en un 47%. Según los investigadores, la diferencia radica en el mayor tamaño de las ruedas de la REPOSSI 68/5 la que favoreció una menor fricción de rodamiento y una mejor transmisión bañada en aceite produciendo mayor torque en el peine hilerador.

3.2 Pruebas de penetración/resistencia al corte con tracción animal

Wong et al. (2016), realizaron en Cuba, estudios comparativos de subsolado, roturación y cruce para determinar el comportamiento de las propiedades físicas del suelo, densidad aparente y su incidencia en la compactación con el uso de la tracción animal. Para el estudio se empleó un arado de vertedera (T1) y un multiarado 6 en 1 (T2) a tracción animal. Se usaron bueyes de 700 y 900 lb

y se utilizó una grada (rastra) de púas para el mullido del suelo para ambos tratamientos. Los resultados obtenidos indican una disminución en el porcentaje de la densidad aparente del T2 con respecto a T1. Desde 0-10 cm de profundidad la densidad aparente disminuyó en un 3,5 %; y entre 10-20 cm de profundidad en casi un 5 %. Los investigadores concluyeron que la compactación disminuyó en un 18% en T1 y 25% en T2, después de la preparación del suelo.

Makudiuh (2016), llevó a cabo un estudio en Kenia, para evaluar el efecto de variados ángulos de ataque de un cincel parabólico experimental sobre requerimientos de fuerza de tiro en un suelo NITISOL. Los ángulos del cincel fueron variados de 30° a 70°. En esta ocasión la investigación se realizó con el uso de dos tractores, pero la intención del uso de los resultados fue para implementarla con tracción animal, específicamente con el uso de bueyes. Los parámetros investigados para medir la fuerza de tiro fueron: velocidad y profundidad de trabajo (y ángulo de tiro). Makudiuh, recomendó que las operaciones de cincelado con animales de tiro se realicen en la temporada seca antes de la temporada de lluvias. Los resultados identifican un ángulo óptimo de 72° para cincelar un suelo arcilloso.

3.3 Costos de mecanización con caballos de tiro

Kendell (2005), agricultor y agrónomo, PhD, norteamericano, realizó un estudio socioeconómico sobre el uso de caballos de tiro como fuente de energía apropiada para la agricultura del pequeño agricultor norteamericano. Para este fin, utilizó la mecanización mixta (animal y automotriz) en una finca de 10 hectáreas. Estableció costos de su propio sistema productivo para cada opción tecnológica de mecanización y los comparó en términos económicos para determinar costo/beneficio. Según Kendell, el propósito principal de utilizar caballos de tiro en el sistema productivo fue la mejora de todo el sistema e incluye la participación familiar en las actividades de la finca. Los beneficios económicos de la finca serían el resultado de los esfuerzos de las actividades en el sistema productivo y no necesariamente el objetivo principal (valor cultural).

Según el autor, los beneficios tácitos del empleo de caballos de tiro son la reducción en la compactación del suelo, reducción en la polución e insumos externos a la finca (o sistema productivo), mientras que los animales agregan materia orgánica al suelo para aumentar su

fertilidad. Según Kendell (2005), además de los beneficios con el medio ambiente existen beneficios del orden económico, como por ejemplo, el tamaño del sistema productivo donde la capacidad/potencia de los caballos de tiro puede ser efectiva (y eficiente), la cual dependería principalmente de cómo se utiliza el potencial de los animales y de los costos asociados con la mano de obra y los combustibles (y/o arriendo del tractor).

3.4 Labranza en los suelos del altiplano con tracción animal

Mamani et al. (2001) realizaron un estudio titulado “Efecto del Tipo de Labranza con Tracción Animal en las Características Físicas del Suelo, Conservación de la Humedad y en el Crecimiento y Producción del Cultivo de la Papa”, en el altiplano boliviano (3.430 m.s.n.m.). El estudio tuvo por objetivos a) identificar las épocas y el número de labranzas a realizar con el arado de palo y b) evaluar implementos de labranza que se comparaban al arado de palo (tradicional) con otros implementos mejorados, tales como, el arado reversible y de cincel. Según Mamani et al. (2001, p. 130), ***“la labranza permite conservar más agua en el suelo respecto de un suelo sin labranza, debido a que ésta logra romper los microporos de la capa arable,y el arado de cincel alcanza una mayor profundidad de aradura, rompe el pie de arado y facilita un enraizamiento más uniforme de las plantas (cultivo)***. Adicionalmente, concluyeron que un excesivo laboreo no influye significativamente en una mayor cosecha de papa y que ***“una rayada y una cruzada son suficientes para incrementar el rendimiento con respecto a un suelo sin laboreo”***(Mamani et al., 2001, p. 147).

3.5 Evaluación de Implementos agrícolas

Estudios recientes en la región Latinoamericana, sobre rendimientos de selectos implementos agrícolas jalados por animales de tiro, han aportado valiosa información a la investigación general de la tracción animal. Para este fin, se han utilizado dataloggers para registrar la información de campo la que posteriormente se ha evaluado para obtener conclusiones. Estos estudios, han permitido reevaluar la capacidad de los animales de tiro, identificar herramientas más apropiadas, y determinar su potencial contribución a la mecanización de la agricultura familiar de la región andina.

En México, Arredondo et al. (2003), evaluó el comportamiento y rendimiento de 3 tipos de arados de tiro animal, para determinar si los animales de tiro pueden generar suficiente fuerza para labrar el suelo para producir maíz y frejol. Para este fin, utilizaron un arado de vertedera, un tipo de cincel de corte horizontal y el rancharo (similar al arado de rastrojo). Para la captación de la información, usaron un datalogger modelo 21X de la empresa Campbell Scientific; un potenciómetro rotatorio, utilizado para detectar el ángulo de inclinación de la línea de acción de la fuerza de tiro; un dinamómetro, del tipo que se utiliza en bicicletas, para detectar la velocidad de los bueyes. Los resultados indican que el arado de vertedera permitió una mayor conservación de humedad (mayor porosidad) y el arado rancharo exigió menos energía de los animales.

En Argentina, Venturelli et al. (2009), realizaron trabajos de investigación para conocer la demanda energética de dos herramientas de labranza: a. arado de vertedera y b. arado de cincel pequeño con punta en V.; y una sembradora de labranza mínima, utilizando un equino y dos tipos de arneses (uno de pechera y otro de collar). Para la captación de la información, emplearon un instrumental compuesto por una celda de carga, un microcontrolador (16 MIPS), un conversor analógico digital de 10 bits, un reloj de tiempo real (RTC) y un módulo GPS. El instrumental se alimentó con una batería pequeña de 12V y 1.2 Ah. El dispositivo les permitió identificar diferencias en la demanda energética de varios implementos agrícolas mientras estos eran jalados por el equino. Los resultados del estudio corroboran algunos de los resultados obtenidos por (Arredondo et al., 2003).

3.6 Pruebas de evaluación energética e impacto medio ambiental

En Argentina, Huerga et al. (2011), investigaron la relación de las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de energía, entre la tracción automotriz y la tracción animal, en labores de siembra de la agricultura familiar. Los resultados indicaron que no existen diferencias en la producción energética y la consumida entre ambas tecnologías de mecanización. Sin embargo, la tracción automotriz consume una mayor cantidad de energía a base de hidrocarburo y produce una mayor cantidad de gases efecto invernadero que la tracción animal. Los investigadores sugieren que, al utilizar caballos de tiro en lugar de tractores, estos podrían ayudar a economizar en las cantidades de energía fósil que los tractores consumen y a reducir las emisiones de gases con efecto invernadero.

En Suecia, Rydberg & Jansen (2002), conducen un estudio comparativo sobre el consumo de energía entre dos sistemas de tracción: caballos de tiro en el año 1926, y el tractor en el año 1996. Utilizaron un sistema de análisis energético para evaluar el impacto ambiental y humano. Los autores encontraron que la diferencia más significativa entre ambas tecnologías fue la huella energética, en donde el 60% de las necesidades energéticas de los caballos fueron “renovables” y solo el 9% asociadas al tractor. Concluyeron del estudio que la innovación al sistema local (representado por los caballos de tiro) por un sistema exógeno/externo (representado por el tractor), significó un cambio en el sistema tecnológico que era respaldado por procesos ambientales locales, por un sistema con un menor grado de integración. Los caballos eran parte importante del sistema “ecológico” local en donde los ciudadanos se beneficiaban no solo de su potencia energética sino también de su carne, cuero, pelo, abono y amistad. El caballo estaba estrechamente “vinculado” a los recursos renovables locales e incluía los conocimientos para emplear los caballos los cuales eran administrados por el agricultor.

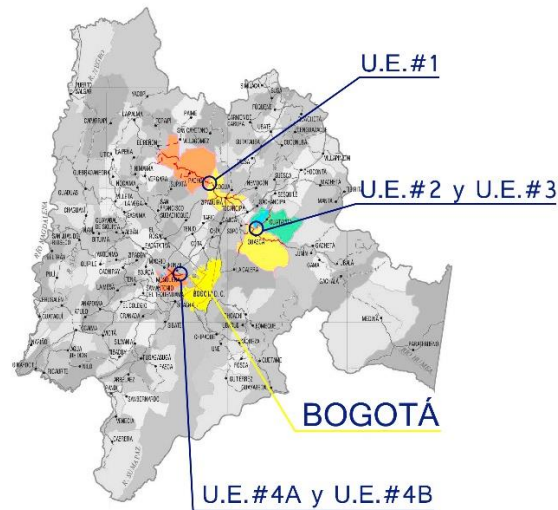
En México, Cadena et al. (2013), realizaron un estudio para establecer el consumo de energía con tres sistemas de labranza, convencional, vertical y cero integrando mejoradores orgánicos, para determinar si una de estas opciones de labranza pudiese ofrecer una mejor alternativa con bajo gasto de energía en un plazo de dos años. Los resultados descartan los mejoradores orgánicos porque no ofrecieron progreso alguno, donde la labranza cero y la vertical (cincel parabólico) fueron las más prometedoras para reducir la energía utilizada en comparación con la labranza convencional en un 84,5% y 15,6%, respectivamente. La conclusión de la investigación sugiere una reducción en el número de labores de labranza utilizando, por ejemplo, la labranza cero o la vertical.

4 CAPITULO: MATERIALES Y METODOS

4.1 Ubicación

En cuatro (4) sistemas productivos agrupados en cinco (5) unidades experimentales, ubicados en los municipios de: Guasca, Mosquera y Zipaquirá (**Figura 4-1**), con altitudes entre 2560 a 3400 m.s.n.m., con variadas condiciones de suelo, topografía y pisos térmicos, en terrenos considerados aptos para la ganadería de carne y leche, la agricultura intensiva y semi-intensiva (hortalizas, granos y frutas) y la producción maderera (forestal). Descripción de las unidades experimentales:

Figura 4-1: Ubicación de las Unidades esperimentales



4.1.1 Unidad experimental N°1. Finca La Represa

(Ganadería Grajales), dedicada a la producción lechera con un tamaño de 60 ha, en el Municipio de Zipaquirá, Cundinamarca. Características Climáticas: temperatura entre 12º y 18ºC, precipitación

entre 590 y 1.000 mm, a 3.300 m.s.n.m. Se considera zona de alta montaña por tener altitudes entre 2.652 y 3.400 m.s.n.m.

4.1.2 Unidad experimental N°2. Finca Garda

(Criadero Los Brabantes), propiedad agrícola dedicada a la crianza de caballos de tiro pesado y producción de pastos para consumo interno. Tiene aproximadamente 2.8 ha y está ubicada a 2.880 m.s.n.m., en el Municipio de Guasca, Cundinamarca. La zona cuenta con las siguientes características climáticas: Temperatura oscila entre 12° a 18°C, precipitación anual de 590 a 1.000 mm. Las madrugadas pueden ser muy frías hasta de 3°C (IGAC, 2000).

4.1.3 Unidad experimental N°3. Finca Doña Luna

Dedicada a la producción lechera, cuenta con 8 animales, aproximadamente a 2.850 m.s.n.m., operada en terreno arrendado de aproximadamente 3 ha, en el municipio de Guasca, Cundinamarca. La zona cuenta con las siguientes características climáticas: Temperatura oscila entre 12° a 18°C, precipitación anual de 590 a 1.000 mm. Las madrugadas pueden ser muy frías hasta de 3°C. (IGAC, 2000).

4.1.4 Unidad experimental N°4. Centro Agropecuario “MARENGO” (CAM), Lotes 1 y 2

Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá”. Finca de investigación agropecuaria, cuenta con 97.4 ha, ubicada a 2547 m.s.n.m., en el municipio de Mosquera, Cundinamarca. Características climáticas: temperatura entre 12° y 14°C, recibe una precipitación anual entre 590 a 1,000 mm. (IGAC, 2000).

Las variadas ubicaciones para realizar el estudio han permitido una apreciación más representativa de las características agronómicas, geográficas, medio ambientales, y donde caballos de tiro son utilizados en diversos tipos de trabajo.

4.2 Componentes y Materiales del Sistema de Medición Electrónica en Tiempo Real (SMETR)

El SMETR, fue diseñado para medir y almacenar la información de la fuerza de tiro bajo condiciones de campo. El sistema de medición electrónica se diseñó basado en la metodología de Caballero et al. (2018). A continuación, se relaciona los componentes del SMETR:

- **Tarjeta Arduino UNO:** el cual posee un microcontrolador (MCU) ATMEGA328P, programado con el algoritmo para el control del sistema y almacenamiento de los datos.
- **Modulo Data logger shield V1:** está compuesto por un módulo de tiempo real RTC para la sincronización de los datos, una tarjeta SD para el almacenamiento de datos en archivo de texto plano tipo .csv.
- **Módulo Display LCD con serial I2C:** se utilizó para la visualización de los datos y funcionamiento del sistema.
- **Sensor de Distancia Sharp GP2Y0A21 (IR):** El cual mide la profundidad trabajo del implemento con respecto a una placa fija referenciada a la barra de tiro del carro de enganche.
- **Celda de carga tipo S.** Se utilizó una celda de carga tipo-S, con capacidad de 1000 [kgf] y sobrecarga segura del 150%, para medir la fuerza de tiro de los animales (Figura 4-1). La celda de carga se calibró en el Laboratorio de Ensayos de Materiales del Departamento Ingeniería Civil y Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL).

Para la calibración de la celda se utilizó una prensa hidráulica automática Shimadzu, empleada para ensayos de materiales, con la cual sometió la celda a una fuerza variable de tensión mecánica controlada, y se midió el voltaje o tensión eléctrica entregada por la placa electrónica desarrollada con la metodología de Caballero et al. (2018). Durante la calibración se ajustó la ganancia del amplificador de instrumentación hasta lograr una tensión en bornes de salida de 4 V. (Ver **Figura 4-2**)

Figura 4-2: Celda de carga tipo S

Fuente: (Sanhueza, 2018)

- **Tarjeta de desarrollo de amplificación de señal.** Se desarrolló la tarjeta de aplicación de señal siguiendo la metodología de Caballero Peña et al. (2018), la cual permite amplificar la señal que llega de la celda de carga tipo S a través del amplificador de instrumentación INA128P. Esta tarjeta envía los datos amplificados al Arduino para que sean almacenados y visualizados. La integración de todos los elementos se alimentó con 12 voltios provenientes de una batería de automóvil.
- **Reloj POLAR M400 y Sistema de Monitoreo de Frecuencia Cardíaca Polar Equino.** El M400 es un reloj tipo deportivo que permite medir el ritmo cardíaco, velocidad, tiempo y distancia recorrida a través de un GPS integrado. El Polar Equino se compone de una cinta equina y un sensor de frecuencia cardíaca Polar H10 conectada a través del Bluetooth al reloj (Ver Figura 4-2). La información se almacena en la aplicación Polar Flow.

Figura 4-3: Polar M400 con cinta equina y dispositivo BT

Fuente: (Autor, 2019)

4.3 Componentes y Materiales del Sistema Biomecánico de Labranza a Tracción Animal (SIBIOTA)

El concepto SIBIOTA, es un paquete tecnológico que está compuesto por animales, arneses, maquinaria y herramienta(s) de labranza:

1. Carro de enganche con sistema hidráulico.
2. Cincel parabólico marca Tebben.
3. Caballos de tiro pesado de raza Belga Europea (Brabantes).
4. Arnese de trabajo, estilo "Amish".

A. Carro de enganche. Es una plataforma mecánica utilizada para operar con maquinaria e implementos agrícolas categorías I y II. No requiere de combustibles fósiles para operar porque la energía la brindan los caballos de tiro. Se caracteriza por su capacidad para realizar múltiples funciones, tales como: labranza, siembras, control de arvenses o coberturas vegetales, cosechas, transporte, etc.; puede operar con enganches de 2 o más caballos de tiro, según los requerimientos de potencia; sirve bien en fincas de variados tamaños y es muy eficiente en potreros grandes, pero se adapta bien a potreros pequeños; causa mínima compactación en los suelos, y consume combustible vegetal (pastos y granos).

- **Características técnicas.** Dicha plataforma de mecanización agrícola se diseñó con el propósito de mecanizar sistemas productivos agrícolas con caballos de tiro pesado. Trabaja bien en terrenos planos y laderas con inclinaciones no superiores a 15 grados. Se apoya en tres ruedas para mantenerse nivelado con respecto al suelo, reducir el peso sobre el lomo de los animales y minimizar el movimiento ascendente y descendente sobre el eje longitudinal (efecto delfín). Posee suspensión independiente con barra de torsión en cada rueda y separación adecuada entre las ruedas para trabajar entre hileras de cultivos (ej. papa, hortalizas). El operador trabaja el sistema desde el asiento instalado sobre la plataforma para una excelente visibilidad, comodidad y seguridad.

- **Sistema hidráulico de 12 voltios.** Es alimentado por un motor eléctrico de 12 VDC con capacidad de 100 a 250 amperios (3000 vatios), para levantar y bajar implementos y maquinaria agrícola para que operen a profundidades y/o alturas deseadas.

B. Cincel parabolico marca “Tebben”. Tiene un peso de 130 kg, semi-curvo (se asemeja al perfil de un anzuelo), con punta para roturar el suelo. El cincel parabólico goza de mucha popularidad debido a las múltiples ventajas que éste ofrece y con su punta de hierro, rotura el suelo para aumentar su porosidad y facilitar la filtración de agua, abonos y aire, y fomentar el desarrollo radicular de los cultivos.

- **Disco de corte.** Es muy útil para cortar los residuos dejados por las cosechas; el sistema radicular de los pastizales para facilitar la penetración y el desplazamiento de los cinceles en el suelo; abrir surcos para depositar semillas durante la siembra mecanizada, etc. Existen tres tipos de discos: planos, corrugados y “flautas”. El disco de corte utilizado con el cincel parabólico tiene un tamaño de 16 pulgadas, tipo flauta con filo biselado y fijado al cincel por medio de un brazo oscilante, para acomodarse a las pequeñas desviaciones en la dirección de viaje (desplazamiento) y curvas. Según Campos et al. (2015, p. 1), un beneficio directo y muy importante atribuido al disco de corte es el diseño de implementos y maquinaria agrícola con menor requerimiento de energía o fuerza de tiro, haciéndolos más apropiados para la labranza con animales de tiro. El disco con su brazo de empalme registró un peso de 10 kg.

C. Caballos de tiro pesado. Los animales pertenecen a la raza Belga Europea, (también conocida como raza Brabante). Participaron dos reproductores jóvenes de 5 y 6 años, con 1 y 3 años de experiencia en el trabajo agrícola, respectivamente, y una yegua adulta de 11 años con 7 años de experiencia. Los tres animales demostraron nobleza y aptitud durante los trabajos de labranza, mostrando su calidad genética para el tiro.

D. Arnese de trabajo. Los arneses utilizados por los animales de tiro son del estilo “Amish” y fueron importados desde los EE. UU. (Ver **Figura 4-4**) Confeccionados en riata “bio-plástica”, a excepción del collar que es el único componente del apero fabricado en cuero y debe protegerse

de la lluvia y el sol y mantenerse regularmente limpio y engrasado o aceitado (ej. grasa de pata y/o aceite de linaza) para extender su vida útil. El diseño ergonómico de los arneses se ajusta muy bien al cuerpo de los animales sin causarles daño físico como raspaduras, puntos de calor, inflamaciones, cortes, etc. Las retrancas, ayudan a controlar muy bien el peso del SIBIOTA, especialmente en laderas.

Figura 4-4: Apero de trabajo tipo “Amish”



Fuente: (Autor, 2015)

Existen aperos de fabricación local y a menor costo cuyo diseño y calidad de los materiales dejan mucho que desear. Los aperos locales se fabrican con materiales reciclables, tales como: lonjas o tiras de llanta, los cuales ocasionan lesiones y quemaduras en la piel de los animales. A pesar de su baja calidad son muy populares entre los agricultores y han demostrado ser utilitarios y duraderos.

4.4 Pesajes y mediciones

El pesaje de los animales, maquinaria, implementos y arneses se realizó con una balanza electrónica y se llevaron a cabo en el criadero Los Brabantes, el 31 de octubre de 2017. Consultar **Anexo H** para detalles del pesaje y mediciones. (Ver **Figura 4-5**, a y b.)

Figura 4-5: a) Pesaje de caballos y b) maquinaria



Fuente: (Autor,2018)

4.5 Variables e instrumentación de evaluación.

a) La **resistencia al corte** se midió utilizando una veleta de corte con un rango de 0 a 250 kPa. (Ver **Figura 4-6**). Los datos se tomaron a 0, 5, 10, 15 y 20 cm. de profundidad y se utilizó el indicador de registro para medir las fallas o cortes, para determinar el grado de resistencia del suelo al corte en kilopascales (kPa) (Rivera, 2018). La veleta se utilizó de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

Figura 4-6:Veletas: tamaño pequeña, mediana y grande



Fuente: (Sanhueza, 2018)

b) Humedad del suelo. Se utilizó el método de “secado al horno” para determinar el porcentaje de humedad en el suelo al momento de la labranza. Se tomaron 10 muestras de suelo por cada unidad experimental, las que se llevaron al Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional para ser secados en el horno. Posteriormente, se utilizó la siguiente ecuación para obtener el porcentaje de humedad presente en el suelo:

Ecuación 4-1

$$(Mh-Ms) / (Ms-Mr) \times 100 = \text{Porcentaje de humedad}$$

Nota: (Mh= muestra húmeda; Ms= muestra seca; Mr= recipiente vacío)

c) Tipo y textura del suelo. Se usó el método “organoléptico” (táctil) para determinar el tipo e identificar la textura del suelo. El método consiste en agregar agua a una muestra de suelo hasta formar una pasta consistente (ni muy húmeda ni muy seca) para tratar de formar una cinta. Este resultado se vincula a la presencia de arenas, limo y arcillas. Similarmente, se trata de frotar una porción de la muestra para percibir el grado de aspereza o suavidad para determinar la textura de suelo. Los tipos de suelo se clasifican como: livianos, medianos y pesados (USDA, 1999). (Ver **Figura 4-7**)

Figura 4-7: Prueba “organoléptica” de textura y tipo de suelo



Fuente: (Autor,2018)

d) Resistencia a la penetración y corte. Se utilizó una varilla no normalizada (3/8" x 1 m) para determinar de manera cualitativa (organoléptica) la dureza del suelo, entre los primeros 5 y 10 cm de profundidad. Por la razón que no se tenía un equipo confiable para medir resistencia a la penetración y teniéndose presente también que se disponía de una veleta para medir resistencia al corte de los suelos. La varilla se introdujo perpendicularmente en el suelo para obtener información inicial sobre la profundidad y grado de compactación. Bachmann et al. (2006, p. 117), utilizaron un penetrómetro y una veleta de cizalla para obtener información sobre la resistencia a la penetración y al corte, y concluyeron que el componente de estrés horizontal es el dominante tanto para la penetración vertical como para la resistencia al corte.

e) Ritmo cardiaco y velocidad. Se registró la información de ritmo cardiaco y velocidad con el reloj deportivo Polar M400 y este fue colgado de los yugos del arnés del caballo. La información se obtuvo a través de la aplicación Polar Flow la cual almacena los datos del reloj y entrega estadísticas de la actividad realizada. La cinta para medir el ritmo cardiaco se ubicó en el área torácica del animal para tener mayor proximidad al corazón según instrucciones del fabricante.

La información recopilada refleja la intensidad del trabajo en el caballo, la cual, se califica utilizando la frecuencia cardiaca (FC) promedio durante la actividad. En base a esto el trabajo se puede clasificar en 4 categorías: leve, moderado, intenso y muy intenso y que es en base a estas categorías que se suplementan los alimentos energéticos en el caballo.

Las cuatro categorías con la respectiva frecuencia cardiaca son las siguientes:

- a. Leve: FC menor 90
- b. Moderado: FC entre 90-110
- c. Intenso: FC entre 110-150
- d. Muy intenso: FC mayor de 150

Fuente: NRC (2007)

f) Fuerza de tiro y profundidad de trabajo. Se utilizó el Sistema de Medición Electrónica en Tiempo Real (SMETR) para medir la fuerza de tiro y profundidad de trabajo. El SMETR nos entrega la fuerza en Newton y la profundidad de trabajo en centímetros.

g) Calidad de la labranza. La evaluación se hizo de acuerdo con las recomendaciones de los manuales (FAO, 1994 y 1995) y se realizó por método visual. Se dedicó especial atención al corte vertical con la rueda de corte y al corte transversal del cincel parabólico. Se observó la cantidad de suelo removido y su distribución sobre la superficie, el número de cespedones arrancados por el cincel, y la calidad del corte y el tamaño de la apertura creada como resultado de la ruptura con el cincel parabólico.

4.6 Metodología

4.6.1 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas en el tiempo, según la metodología de Gómez López (1997, pp. 350–363), quien sugiere la utilización de parcelas grandes escogidas completamente al azar, las cuales se dividen en subparcelas distribuidas en el tiempo. El estudio se realizó en cuatro sistemas productivos agrupados en cinco unidades experimentales o parcelas grandes. Cada unidad experimental se dividió en tres subparcelas para obtener las repeticiones en el tiempo.

- **Unidad experimental N°1.** Finca La Represa (Ganadería Grajales), se utilizaron dos hectáreas divididas en tres subparcelas experimentales de aproximadamente 0.67ha cada una.

- **Unidad experimental N°2.** Compuesta por dos sistemas productivos. Finca Garda (Criadero Los Brabantes) y Finca Botero, los cuales se agrupan debido a la proximidad de ambas unidades, (vecinas). Se utilizaron 1.3 hectáreas divididas en tres subparcelas experimentales de aproximadamente 0.43 ha cada una.

- **Unidad experimental N°3.** Finca Doña Luna. Se utilizó 1 hectárea dividida en tres subparcelas experimentales.
- **Unidad experimental N°4A.** Centro Agropecuario “MARENGO” (CAM) Lote 1, Se utilizaron 1 hectárea dividida en tres subparcelas experimentales.
- **Unidad experimental N°4B.** Centro Agropecuario “MARENGO” (CAM) Lote 2, Se utilizaron 0.5 hectárea dividida en tres subparcelas experimentales.

Los experimentos consistieron en realizar 3 repeticiones por parcela. Antes de comenzar los trabajos de labranza, se tomaron muestras de suelo para determinar el contenido de humedad, textura y se realizaron mediciones con una veleta de cizalla de 250 kPa para medir la resistencia al corte.

4.6.2 Pruebas de campo

Los ensayos de campo consisten en rayar (cincelar) cada parcela experimental con presencia de pasto Kikuyo (y barbecho), roturando a 15 cm de profundidad y un metro de separación entre surcos, aproximadamente. Este procedimiento se repite para cada unidad experimental y se realiza en cuatro etapas:

- 1) Evaluación del terreno
- 2) Validación de funcionamiento del SMETR,
- 3) Trabajo de labranza y toma de datos
- 4) Post-análisis y evaluación.

A continuación, se describe cada etapa:

- **La evaluación del terreno:** Consiste en caminar el potrero para realizar una inspección visual y así verificar la presencia de material vegetal, altura del pasto, obstáculos y material foráneo. Se realiza la toma de datos de resistencia al corte con la veleta, se toman las

muestras de suelo para medir la humedad y se mide el grado de compactación. Una vez realizada la evaluación inicial del terreno, se procedió a preparar la maquinaria, el SMETR y los animales en la siguiente secuencia:

- i. El SMETR (datalogger y sensores) se instala en el SIBIOTA y se realiza un auto-test para verificar su operatividad.
 - ii. Apearar a los animales. A uno de ellos se le instala la “banda equina” del sistema POLAR en la región torácica, para monitorear su ritmo cardiaco, velocidad, GPS, etc.
 - iii. El reloj POLAR se reinicia para detectar e identificar el sensor BT de la banda equina, y se cuelga en el arnés del caballo.
- **Validación de funcionamiento del SMETR:** consistió en hacer funcionar el SMETR con el SIBIOTA por un recorrido de 50 metros de largo, el cual se repitió 6 veces para obtener un promedio, con diferentes posibles profundidades ajustadas por medio del control del pistón/servo hidráulico y a la vez verificar que los sensores operaban correctamente. La velocidad media inicial de trabajo del SIBIOTA fue de aproximadamente 5 km/h.
- **Trabajo de labranza y toma de datos:** consistió en registrar el tiempo promedio que el SIBIOTA demoraría en completar el trabajo de labranza en cada parcela experimental. En este momento el SMETR y el Polar registran los datos de las variables de estudio.
- **Post-análisis y evaluación:** se realizó visualmente después de concluida la labranza con el SIBIOTA. Se evaluó la calidad de la labranza de acuerdo con las recomendaciones de los manuales FAO No. 110 y 125 (FAO: 1994 y 1995). Se dedicó especial atención al corte vertical (con la rueda de corte) y al corte transversal del cincel parabólico. Se observó la cantidad de tierra y su distribución sobre la superficie del suelo y la calidad del corte y el tamaño de la apertura creada como resultado de la ruptura con el cincel parabólico. Estos datos se registran en la libreta de campo.

4.6.3 Evaluación de Potencia de tiro, Efectividad y Eficiencia de campo e Impacto tecnológico del SIBIOTA en el altiplano Cundi-Boyacense

❖ Potencia de tiro:

La evaluación sobre la capacidad de generación de potencia del animal de tiro se basa en determinar si es adecuada para realizar trabajos de labranza con el cincel parabólico en las alturas del altiplano CundiBoyacense. Para lo cual, se utiliza la información de fuerza de tiro (F_t), registrada por el SMETR y la velocidad de avance (v) registrada por el polar, y se emplea la siguiente ecuación para obtener la potencia (P):

Ecuación 4-2

$$P = Ft \times v$$

Dónde:

Ft: fuerza de tiro en [N].

v: velocidad de avance [m/s].

P: potencia [W].

❖ Efectividad y Eficiencia de campo:

La efectividad y la eficiencia del SIBIOTA como tecnología intermedia de mecanización agrícola a tracción animal, se basan en su eficacia para operar con herramientas de labranza y otras máquinas agrícolas. Se asume que los animales aportan suficiente potencia para permanecer en el potrero por 4 horas sin que su condición físico-fisiológica se deteriore significativamente. Para medir la efectividad y la eficiencia de sistemas de mecanización agrícola, se utilizan las siguientes ecuaciones (FAO, 1994; Riquelme et al., 1991, p. 26; Usman et al., 2004, p. 41):

- A. La capacidad teórica (C_t) se define como la capacidad máxima posible de una herramienta que se utiliza en su ancho efectivo total a una velocidad dada, y se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 4-3

$$Ct \left[\frac{ha}{h} \right] = \frac{\text{Ancho (m)} \times \text{Velocidad (km/h)}}{10}$$

- B. La capacidad efectiva (C_e) se define como el área real trabajada en una unidad tiempo con una herramienta agrícola y se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 4-4

$$C_e \left[\frac{ha}{h} \right] = \frac{\text{Total Area Cultivada (ha)}}{\text{Tiempo Total (h)}}$$

- C. La eficiencia de campo (E_c) se define como la fracción de tiempo verdaderamente trabajada y se expresa así:

Ecuación 4-5

$$E_c [\%] = \frac{C_e (ha/h) \times 100}{Ct (ha/h)}$$

Dónde:

Ce: Capacidad Efectiva en ha/hr.

Ec: Eficiencia de campo (%).

Ct: Capacidad teórica en ha/hr.

❖ **Impacto tecnológico:**

La evaluación del impacto de la tecnología a tracción animal con caballos de tiro se enfoca en el uso de caballos de tiro como fuente de energía renovable, comparado con el uso de la tecnología automotriz, y abordando factores agronómicos, económicos, energéticos, ambientales y sociales de la región.

- **Impacto Agronómico:** Se analizaron datos de potencia animal, tiempo y eficiencia de campo, en las diferentes unidades experimentales para determinar su desempeño como herramienta agrícola.

- **Impacto Social:** Se analizaron la importancia de utilizar la tecnología a tracción animal con caballos de tiro, en una región donde la economía se basa en la producción agropecuaria y el empleo de un significativo porcentaje de mano de obra no calificada. Se considera su potencial como vehículo para: promoción de organizaciones de productores, reducción del desplazamiento humano hacia los centros urbanos, promoción de la capacitación y entrenamiento para jóvenes y mujeres, y la posible generación de emprendimientos para atender la nueva actividad.
- **Impacto Económico:** Se evaluó el costo de la inversión inicial y el costo operacional de la tecnología a tracción animal con caballos de tiro pesado vs tractor para determinar el costo-beneficio de ambas tecnologías y su rol como promotor/fuente de empleos “especializados”.
- **Impacto Energético:** Se evaluó el consumo de combustible y su costo en la labranza con el uso del cincel con ambas tecnologías para determinar el potencial ahorro de capital con la reducción en consumo de combustible.

4.6.4 Análisis estadístico

4.6.4.1 Pruebas estadísticas

Se utilizó el programa SigmaPlot V11, para realizar las matrices de correlación de Pearson entre las variables Ritmo Cardíaco (ppm), Velocidad (km/h), Fuerza (N) y Potencia (HP), para cada unidad experimental, y gráficas de caja agrupadas para cada variable. El número de muestras utilizadas para el análisis estadístico es el siguiente:

- U.E.#1 La Represa: 895
- U.E.#2 Garda: 1086
- U.E.#3 Doña Luna: 2173
- U.E.#4 Marengo 1: 249
- U.E.#5 Marengo 2: 2565

4.6.4.2 Normalización de los datos para la construcción de las Gráficas

Para la construcción de las Gráficas fue necesario normalizar los datos con el objetivo de ajustar la escala, para lo cual, se buscó el valor máximo de la serie, se dividió cada dato en el máximo, para dejar todos los datos en escala de 0 a 1, el factor de multiplicación para encontrar el valor de la variable es el valor máximo.

5 CAPITULO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Construcción de un dispositivo electrónico

Se construyó el sistema de medición electrónica en tiempo real (SMETR) el cual se compone en tres módulos, estos integrados permiten registrar los datos de las variables de los sensores utilizados. Los módulos del SMETR son los siguientes:

➤ **Módulo 1, de registro de la fuerza de tiro:**

Este módulo se compone de la celda de carga tipo S y la tarjeta de desarrollo de amplificación de señal, los cuales se describen en el numeral 5.2. La tarjeta de amplificación se encargó de recibir la señal de la celda de carga y amplificarla para su conversión y almacenamiento.

➤ **Módulo 2, de registro de la profundidad de trabajo:**

Este módulo se compone principalmente de un sensor Sharp GP2Y0A21 infrarrojo y una placa refractaria, los que se acoplaron al carro de enganche para medir la profundidad de trabajo del implemento.

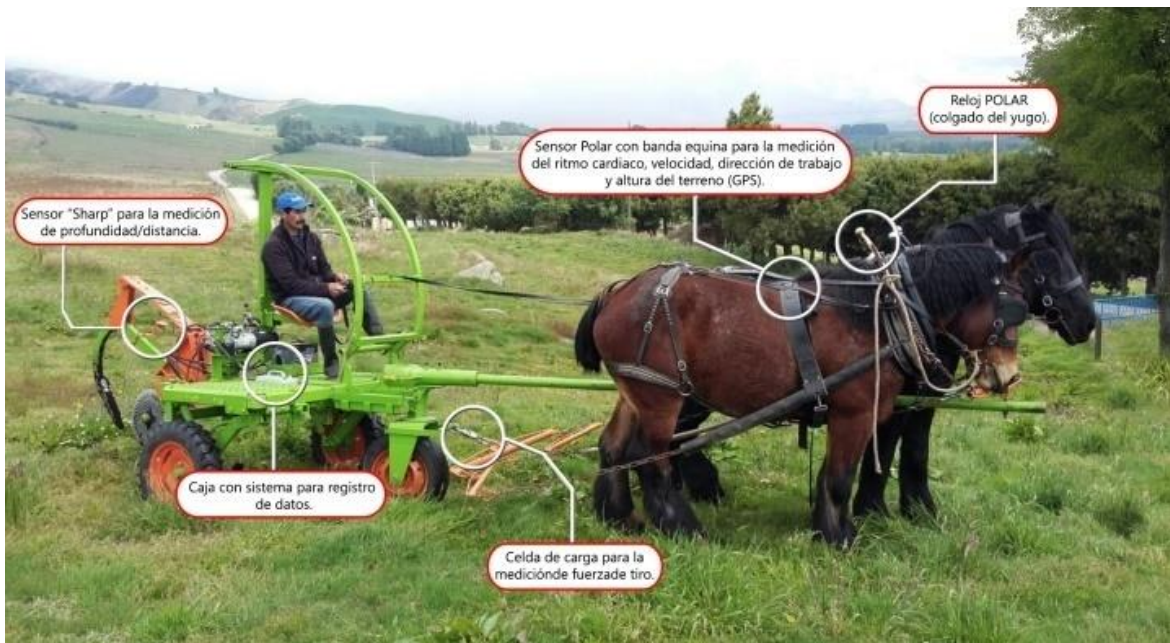
➤ **Módulo 3, de monitoreo de equinos:**

Este módulo se compone de tres accesorios, un reloj polar tipo deportivo, un módulo de comunicación Bluetooth y una cinta equina.

5.2 Instalación del SMETR

La instalación del SMETR se realiza de manera metódica y los sensores se instalan comenzando por la maquinaria y después en los caballos de tiro, tal como se detalla en la **Figura 5-1**.

Figura 5-1: El sistema de medición SMETR, instalado en el sistema biomecánico a tracción animal (SIBIOTA): Sensor “Sharp” para la medición de profundidad/distancia; celda de carga, para la medición de fuerza/carga; banda equina -“POLAR”, para la medición del ritmo cardiaco, velocidad y dirección de trabajo y altura del terreno (GPS); reloj – POLAR; y caja con sistema para registro de datos.



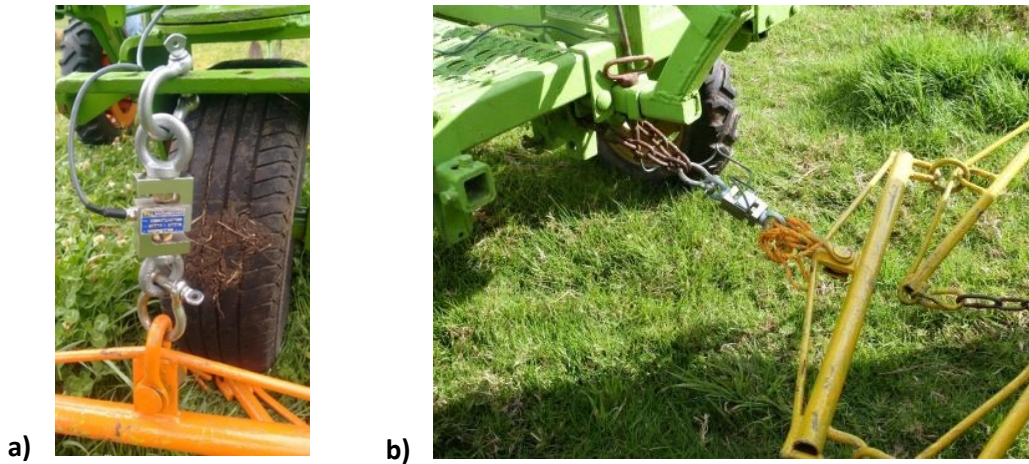
Fuente: (Autor, 2018)

A. Módulo 1. Registro de fuerza de tiro:

El módulo de registro de fuerza se posicionó entre el carro de enganche y el implemento (cincel parabólico) y la fuente de energía (dos caballos de tiro), por medio de un sistema llamado “balancines dobles” (como se puede apreciar en la **Figura 5-2a** y **b**), concentrando la fuerza de los dos animales en un solo punto de acople, tal como se describe en la metodología propuesta por Venturelli et al. (2009, p. 2). El principio está basado en un acelerómetro que mide directamente la fuerza de contacto con el suelo presentando una mayor variabilidad, y sin medir la fuerza cuando el cincel está levantado (sin operar). Debido a que el esfuerzo medido puede variar de acuerdo con

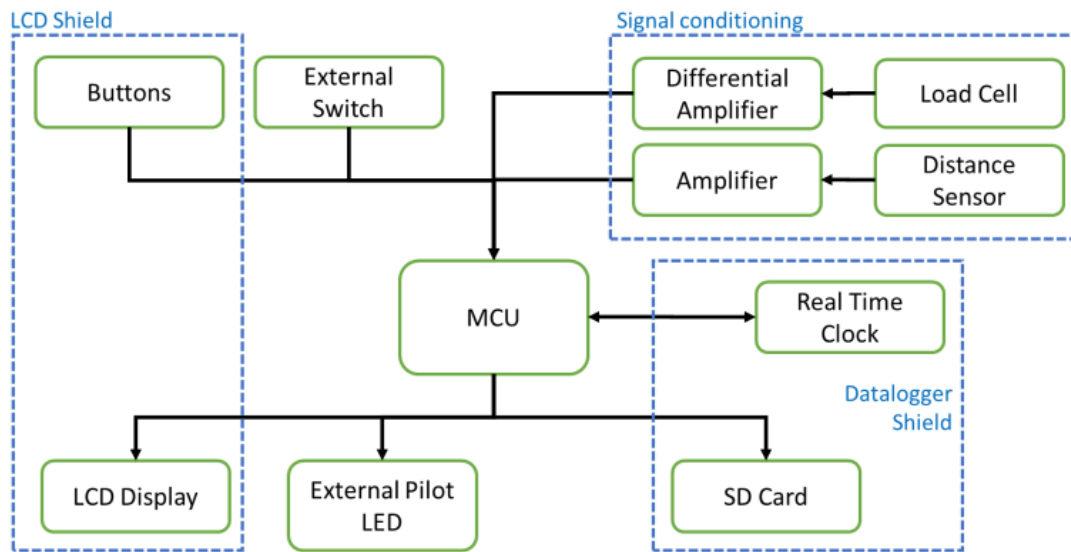
la profundidad de trabajo del cincel, tal que, a menor profundidad se logra una mayor velocidad, también se puede cubrir una mayor área de trabajo en menor tiempo (Caballero et al., 2018).

Figura 5-2: a) y b) Celda de carga posicionada entre el carro de enganche y los balancines



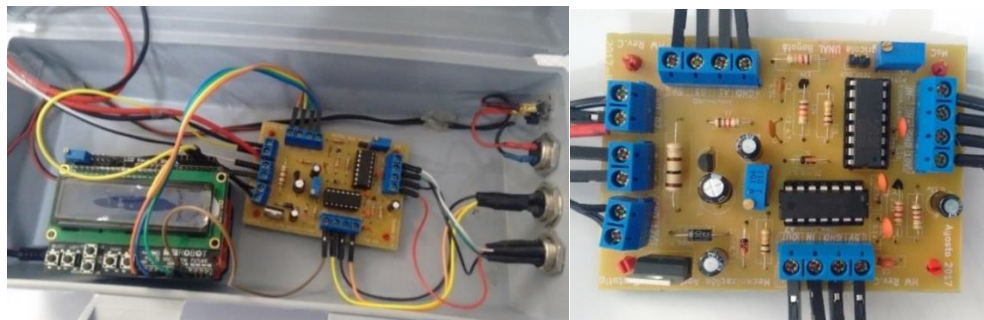
Fuente: (Autor, 2017)

Tanto la fuerza de tiro como la profundidad de trabajo fueron registradas mediante un microcontrolador (MCU) ATMEGA328P acoplado a un módulo de tiempo real RTC para la sincronización de los datos, una SD Card para el almacenamiento de datos en archivo de texto plano tipo .csv y una LCD para el control y visualización. En la **Figura 5-3**, se presenta el diagrama de componentes del dispositivo electrónico fabricado para el registro de datos, donde se incluye un interruptor (ON/OFF) e indicadores externos para una fácil operación en campo (IDLE/REC).

Figura 5-3: Componentes del dispositivo electrónico para registro de variables

Fuente: (Caballero et al., 2018)

El acondicionamiento de la señal fue implementado mediante un amplificador de instrumentación (INA125P) que a su vez proporcionó la tensión DC de 10V de alimentación para la celda de carga. Mediante amplificadores de bajo ruido se eliminaron los posibles problemas de carga (alimentación celda de carga y MCU) y se ajustó el rango de tensión de salida del sensor Sharp infrarrojo. En la **Figura 5-4** se presenta el prototipo construido para su uso en campo con alimentación por medio de batería de 12V.

Figura 5-4: Prototipo de medición para operación en campo

Fuente: (Caballero Peña et al., 2018)

Inicialmente, se realizó la caracterización de la celda de carga, el acondicionamiento de señal y su digitalización en el ADC del MCU en el laboratorio de estructuras del Departamento de Ingeniería

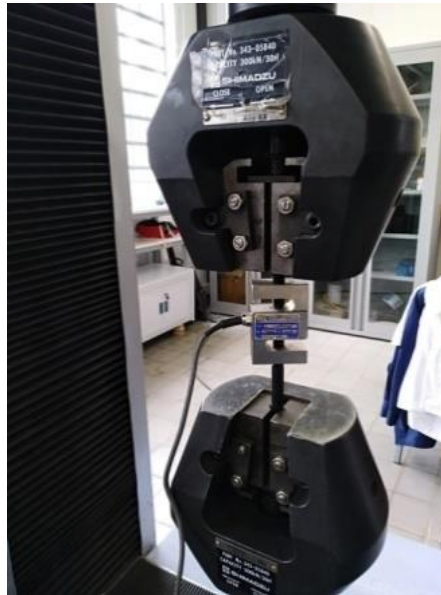
Civil y Agrícola, mediante prensa hidráulica Shimadzu encontrando el comportamiento linealizado de la fuerza de tiro en función del valor digital entero [bits] registrado por el MCU (Ver **Figura 5-5**).

$$F [N] = 2,43708053 * \frac{5000}{2^{10}} * V_{ADC} - 226,26046036$$

$$\Delta F [N] = 9.8065 * \sqrt{(V_{ADC} * \Delta a)^2 + (a * \Delta V)^2 + (\Delta b)^2}$$

En donde F es la fuerza de tiro en Newtons ejercida por los dos equinos, V_{ADC} es el valor registrado por el MCU en la SD Card, $\Delta a = 0,0009$, $\Delta V = 6,30 [mV]$ y $\Delta b = 1,20997376$. La incertidumbre en la fuerza ΔF se encuentra en función del valor medido debido al muestreo realizado el cual introduce un error de estimación del ADC, además contempla la histéresis no linealidades presentes en la celda de carga y en el circuito de acondicionamiento de señal.

Figura 5-5: Prensa hidráulica automática (Shimadzu, Japón) usada en la calibración de la celda de carga

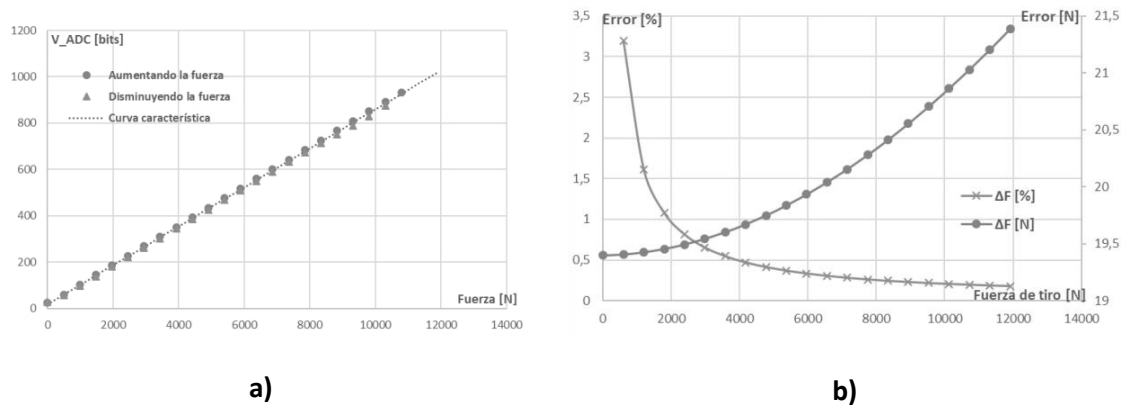


Fuente: (Autor, 2018)

Basado en la caracterización de la celda de carga (incremento y reducción de fuerza de prueba en laboratorio) y acondicionamiento de señal se encontró la curva de calibración para medir la fuerza de tiro (**Gráfica 5-1 a**) y su error (**Gráfica 5-1 b**). La incertidumbre en la fuerza ΔF se encuentra en

función del valor medido debido al muestreo realizado el cual introduce un error de estimación del ADC, además contempla la histéresis y no linealidades presentes en la celda de carga; todas estas son completadas mediante propagación de error basada en la desviación estándar de las medidas.

Gráfica 5-1: a) Curva característica de la celda de carga, b) Incertidumbre en la medición de fuerza



El comportamiento de la incertidumbre en la fuerza se puede observar en la Gráfica 1b el cual es mayor conforme aumenta la fuerza a medir hasta un máximo de 21,4 [N], pero porcentualmente es inversamente proporcional con un máximo de 3,2% en el rango de medida de la celda de carga hasta una sobrecarga de 120%.

B. Módulo 2. Registro de la profundidad de trabajo:

El módulo de registro de la profundidad de trabajo estuvo compuesto por el sensor infrarrojo Sharp que se instaló en la estructura del cincel parabólico para medir su distancia respecto a una placa refractaria fija, la cual fue acoplada a la barra de tiro, para obtener un valor indirecto de la profundidad de trabajo por medio de la variación del ángulo. Adicionalmente, se agregó un amplificador con ganancia ajustable a la salida análoga del sensor para ajustar el rango de la señal registrada y mejorar así la observación de las variaciones. El sensor y el amplificador se ajustaron con un valor de 900 en el ADC para la profundidad máxima de 14,5 cm medidos sobre el disco de corte.

La profundidad de trabajo máxima a medir por el cincel se calibró ajustando el sensor de distancia para trabajar en la zona lineal, tal como se puede observar en la **Figura 5-6**.

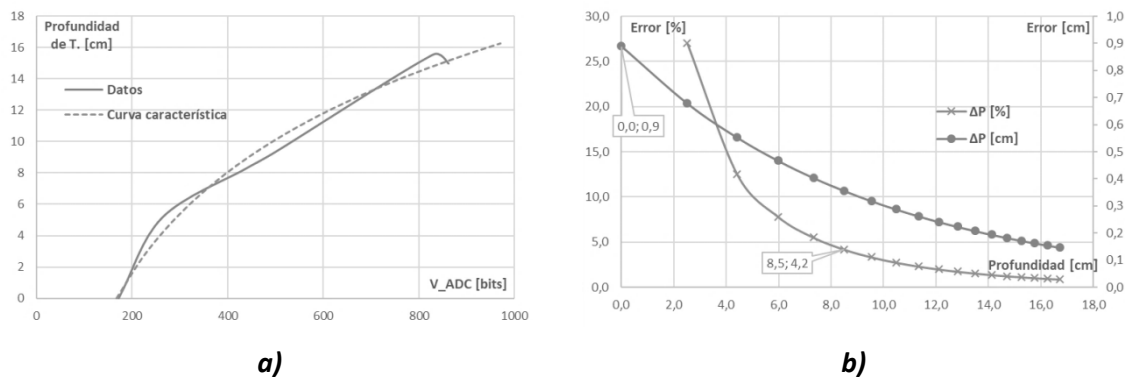
Figura 5-6: Sensor de distancia montado en el cincel parabólico a profundidad máxima de trabajo.



Fuente: (Autor, 2017)

La curva logarítmica característica de la profundidad de trabajo se presenta en la **Gráfica 5-2 a**. Este comportamiento se debe al método de ángulo de refracción, empleado por el sensor infrarrojo. Esta curva se obtuvo de la medición de la profundidad del terreno de al menos 10 puntos por algunos trayectos de recorridos del cincel con diferentes valores de profundidad establecidos con el brazo de control hidráulico del cincel parabólico.

Gráfica 5-2: a) Curva característica profundidad de trabajo, b) Incertidumbre en la profundidad de trabajo.



El comportamiento de la incertidumbre en la profundidad de trabajo se puede observar en la **Gráfica 5-2 b**, la cual puede llegar a tener valores de hasta 0,9 [cm] equivalente a 27 %, pero contemplando únicamente el rango de trabajo típico del cincel (7 a 16 [cm]) la incertidumbre se encuentra por debajo del 5 % permitiendo una medición acertada (Caballero et al., 2018).

C. Módulo 3. Registro de los datos del sistema de monitoreo de equinos:

El módulo de monitoreo de los equinos se compone de dos accesorios, el M400 (reloj deportivo) y el Polar Equino (cinta equina y sensor de frecuencia cardiaca Polar H10) que se enlazó al M400 a través de comunicación Bluetooth y monitoreó la frecuencia cardiaca del animal. Para visualizar los datos registrados, el M400 se conecta al sistema Polar Flow Sync a través de la aplicación web Polar Flow.

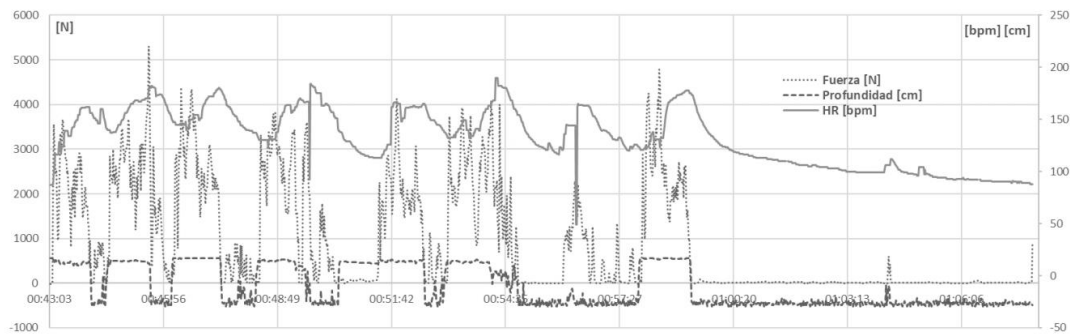
El M400 registró el ritmo cardíaco, la velocidad, tiempo y distancia recorrida de los animales y se visualiza la información a través de la aplicación web Polar Flow, la cual entregó estadísticas del trabajo en campo del animal. La aplicación entregó el recorrido georreferenciado del trabajo realizado por los animales, obteniendo la ruta y el lugar del ensayo. El monitoreo del ritmo cardíaco y el tiempo de recuperación de los caballos de tiro es esencial para determinar su rendimiento y para seleccionar mejores caballos de tiro (Hiraga & Sugano, 2017, p. 6).

5.3 Pruebas de calibración del SMETR: Resultados y visualización

Como parte de la verificación y puesta en marcha del SMETR, se realizó una prueba con los tres módulos trabajando en conjunto, para lo cual se emplearon dos animales de tiro pesado del Criadero los Brabantes, ubicado en la finca Garda.

Para conocer el funcionamiento del SMETR, los tres módulos que lo componen se sincronizaron en función del tiempo. En la **Gráfica 5-3**, se presenta el resultado de la fuerza de tiro de los dos animales, el ritmo cardíaco de uno de ellos (yegua Tabby) y la profundidad de trabajo del implemento en un recorrido de 905,4 [m], en un tiempo de 15 minutos de operación con el cincel parabólico ajustado para operar a 15 cm de profundidad.

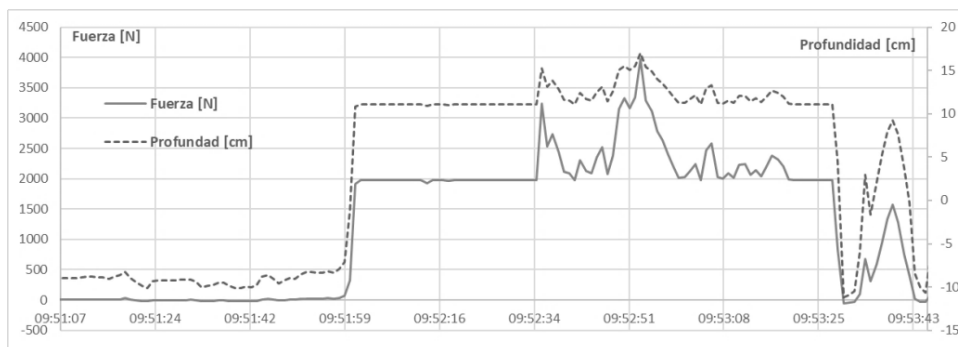
Gráfica 5-3: Datos de fuerza [N], profundidad de trabajo [cm] y ritmo cardiaco (RC en ppm) en un recorrido de 905 [m], en 15 minutos de operación



En relación con el ritmo cardiaco, se observa en la gráfica que el valor pico durante el trabajo de la yegua Tabby fue de 190 [ppm/bpm], y la recuperación del ritmo cardiaco a un nivel de reposo de 88 [ppm], tomó un tiempo de 8 minutos y 36 segundos, un poco más de lo normal de aproximadamente 6 minutos.

En la **Gráfica 5-4**, se observa el comportamiento de la fuerza ejercida y la profundidad de trabajo durante un recorrido típico del cincel, promediados cada minuto. En cuanto a la profundidad de trabajo, los valores negativos corresponden a los momentos en los cuales el cincel se encuentra fuera del suelo y por lo tanto fuera del rango de medición del sensor.

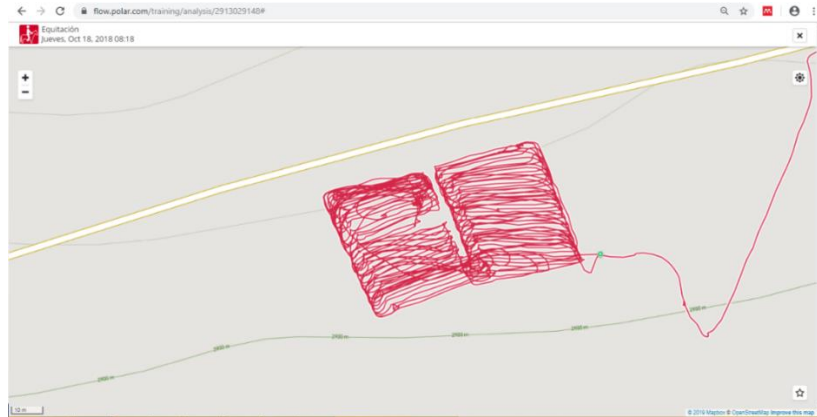
Gráfica 5-4: Datos de fuerza (línea continua) y profundidad de trabajo del cincel parabólico (línea punteada) durante un recorrido típico.



5.4 Visualización de la información con Polar Flow

La aplicación Polar Flow entregó la información georreferenciada sobre el recorrido del SIBIOTA y la ubicación de la finca de manera gráfica. (Ver **Figura 5-7**)

Figura 5-7: Visualización de la ruta de los animales registrada por el sistema de monitoreo equino. Finca Garda, Guasca



Similarmente, las variables de ritmo cardiaco en ppm (pulsaciones por minuto), velocidad (km/h), distancia recorrida (km) y altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), registradas por el Polar M400 pudieron ser exportadas en formato Excel para su análisis. (Ver **Figura 5-8**)

Figura 5-8: Visualización de los datos del animal registrada por el sistema de monitoreo equino



Para cada una de las unidades experimentales se tomaron los datos y se exportaron a formato Excel, y se sincronizaron con los datos tomados por el SMETR, con estos se construyeron las gráficas de fuerza de tiro, ritmo cardiaco, velocidad y potencia en cada unidad experimental.

5.5 Funcionamiento del SIBIOTA y sus componentes

Componente 1, carro de enganche múltiple:

El carro de enganche múltiple se desplazó sin mayor dificultad por las parcelas de ensayo con una baja fricción entre las ruedas agrícolas de caucho y el suelo, y la tercera rueda facilitó el giro del carro de enganche dirigido con el timón central. El diseño permitió que los animales trabajaran holgadamente y con suficiente separación entre ellos (y suficiente espacio con el carro de enganche), para evitar golpes, lesiones y generar situaciones de inseguridad o accidentes. El operador (palafrenero) dirigió a los animales y manipuló el cincel con facilidad y destreza, y su ubicación sobre la altura de las cabezas de los animales, le brindó una vista sin obstrucciones para ver adelante de los animales y evitar huecos, obstáculos, y trazar una dirección mental recta del trabajo a realizar para un buen acabado de las hileras y evitar curvas pronunciadas.

Componente 2, cincel parabólico marca “Tebben” con disco de corte:

El cincel parabólico con el disco de corte se desplazó con facilidad. La calidad y peso demostró una alta eficiencia para penetrar el suelo y soportar las fuerzas de resistencia a la penetración y al corte para permanecer a la profundidad programada.

a. El disco de corte con diámetro de 43 cm (17”) fue montado frente al cincel para cortar “limpiamente” el sistema radicular del pasto Kikuyo a una profundidad aproximada de 8 cm, para evitar romper o levantar cespedones de pasto (alfombra radicular) y facilitar la penetración y el desplazamiento del cincel hasta la profundidad de trabajo deseado. El empleo del disco de corte disminuyó el requerimiento de fuerza y facilitó la penetración y el desplazamiento del cincel en el suelo.

b. El tamaño de la punta utilizada con el cincel parabólico tenía las siguientes dimensiones: largo (27.94 cm), ancho (5.08 cm) y espesor (0.79375) (ver **Figura 5-9**). La punta de acero fue montada en el cincel parabólico y penetró el suelo hasta la profundidad programada de 15 cm, para luego deslizarse a un ángulo de ataque de aproximadamente 42° (α) en relación con el nivel horizontal del suelo (ver ángulo α en la **Figura 1-10** en la página 48).

Figura 5-9: Herramienta de cincel para “romper” o roturar el suelo



Fuente: (Autor, 2019)

Componente 3, caballos de tiro pesado:

Los animales se utilizaron en collera (en pareja) y se manejaron con un juego de riendas para uso doble. Se conectaron al carro de enganche por medio de un juego de balancines, los cuales se engancharon con facilidad a los tiros de cadena de los arneses. La distancia entre los animales y el carro de enganche fue adecuada lo cual permitió que los giros se hicieran con precisión, seguridad y suficiente espacio para evitar roces con las cercas. El tiempo de descanso promedio de los animales durante la primera hora de trabajo osciló entre 3 a 4 minutos cada 15 a 20 minutos de labor. Después de 2 horas de trabajo el tiempo de descanso incremento substancialmente en algunos casos a 5 minutos en trayectos superiores a los 100 metros ida y vuelta, aproximadamente. El tiempo utilizado por los dos animales para completar el trabajo de rayar una hectárea en pasto con descansos regulares, fue de 4 horas en promedio lo cual se consideró muy razonable.

Componente 4, arnés de trabajo agrícola (estilo Amish):

Los caballos fueron enganchados a la plataforma de trabajo (carro de enganche) por medio de los arneses. Estos fueron manipulados de manera segura, eficiente y sin dificultad y los animales ya acostumbrados a ser aperados facilitaron su uso. La altura de los animales de 1,60 m a la cruz no fue impedimento alguno para que el operador (palafrenero) los aperara con facilidad. Caballos superiores a esa altura podrían ocasionar que un trabajador agrícola de menor altura tenga cierta dificultad aperándolos y se vería obligado a usar un cajón para alcanzar la altura adecuada para colocarles el arnés con la posibilidad de tener un accidente si el animal es inquieto y lo empuje del cajón.

5.6 Resultados de las mediciones de campo

La información se organiza individualmente por Unidad Experimental (fincas) y comparativamente por ítems de interés. Las actividades de campo se realizaron a comienzos de la temporada de lluvias durante los meses de diciembre a abril y septiembre a octubre. En algunas de las unidades experimentales las intensas lluvias llevaron la humedad del suelo a valores mayores de capacidad de campo e hicieron que se postergaran los ensayos. En otros lugares, las lluvias fueron muy ligeras y la falta de humedad se evidenció en la dureza del suelo durante el trabajo de labranza. La idea principal fue de coordinar las actividades de labranza con el inicio de la época de lluvias para tener humedad adecuada en el suelo.

El estudio/observación de los suelos se limitó a determinar la textura, humedad y resistencia al corte, cuya información es muy necesaria para interpretar la correlación entre el esfuerzo realizado por los animales y el comportamiento del cincel parabólico.

5.6.1 U.E. No 1. Finca “La Represa”- Ganadería Grajales

El SIBIOTA operó en dos tipos de potreros de aproximadamente 3 hectáreas cada uno. Uno en condición de pastizal y el otro en barbecho. Estos terrenos están ubicados en suelos planos y laderas moderadamente inclinadas con pendientes de 7-12% (IGAC, 2014, p. 17). Algunos,

relativamente limpios, pero con pasto Kikuyo “macollado” y malezas de 20 cm de altura, aproximadamente (Ver **Figura 5-10**). Los potreros fueron cincelados uniformemente con separación entre surcos de 1 m de ancho, aproximadamente. El uso histórico de la parcela es la rotación pasto - papa – pasto - ganado, y así sucesivamente, lo que ha causado una alta compactación en los primeros 10 cm del suelo con irregularidades en la superficie y huecos. El trabajo de labranza se completó sin impedimento alguno, en un tiempo razonable de 4 horas. También, se observó que las superficies de las parcelas experimentales fueran homogéneas. El ensayo se realizó en pleno inicio de la temporada de lluvias, con un alto porcentaje de humedad en el suelo (superior a capacidad de campo) haciendo que el agua se aposara en la superficie del suelo muy próxima a la zona radicular del Kikuyo. El alto contenido de humedad en el suelo permitió que la herramienta penetrara fácilmente, pero desafortunadamente el suelo en estado plástico se adhirió a la herramienta reduciendo la velocidad de trabajo en sectores en donde la presencia de humedad era mayor.

Figura 5-10: Ubicación de la parcela de ensayo en Zipaquirá

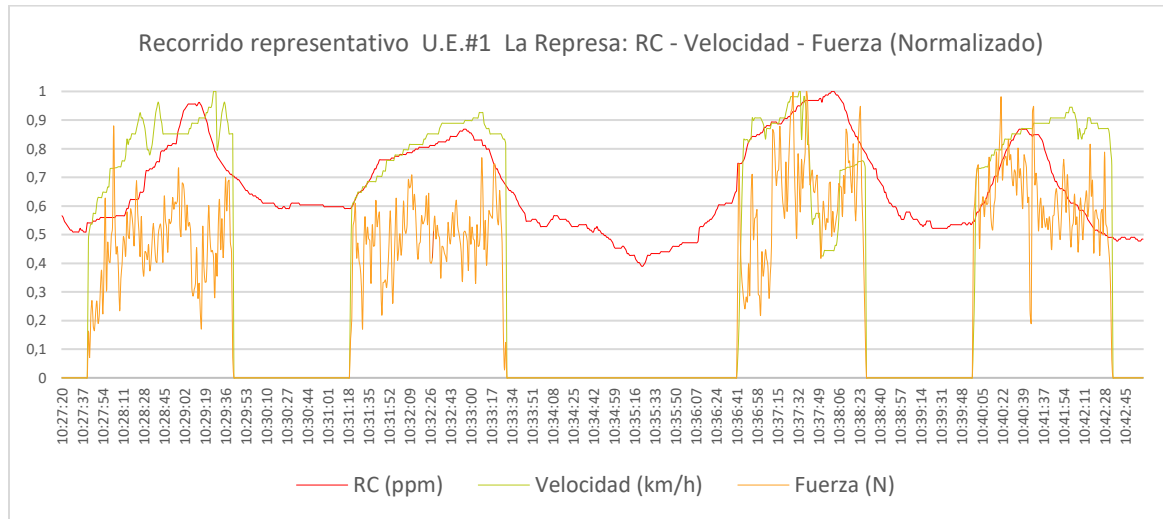


Fuente: (Autor, 2017)

A. Rendimiento animal. El desempeño de los animales fue normal y en cierta medida excediendo las expectativas, considerando la altitud de 3.400 m.s.n.m. en donde operaron. Los animales exhibieron una respiración ligeramente acelerada al comienzo del trabajo, pero se normalizó una vez alcanzaron el nivel de velocidad de trabajo normal con períodos regulares de descanso. El rendimiento de los caballos generó una fuerza **1781,3 N** equivalente a una potencia de **1654,7 W (2,3 HP)**. La **Gráfica 5-5**, muestra un tramo de un recorrido representativo del ensayo, ilustra el comportamiento del ritmo cardiaco, velocidad y fuerza en un periodo de tiempo en el cual se tienen

los valores **Máximos**: RC: 159(ppm), Velocidad: 5,4(km/h), Fuerza: 2847(N). **Es importante mencionar que la Gráfica se encuentra normalizada.**

Gráfica 5-5: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca La Represa



Correlación de las variables medidas

Se realizó una correlación de Pearson entre las variables medidas para cada unidad experimental, con el programa SigmaPlot V11. Este método establece una correlación entre las variables donde la relación de rango plantea que: 0 – 0,25: escasa o nula, 0,26-0,50: débil, 0,51- 0,75: entre moderada y fuerte, 0,76- 1,00: entre fuerte y perfecta.

Para U.E. No 1. Finca “La Represa”- Ganadería Grajales, la **Tabla 5-1** muestra la correlación entre las cuatro variables, para una muestra de 895 datos.

Tabla 5-1: Correlación de Pearson para U.E. #1

	RC (ppm)	Velocidad (km/h)	Fuerza (N)	Potencia R. (HP)
RC (ppm)	1	0,314	0,388	0,447
Velocidad (km/h)		1	0,243	0,561
Fuerza (N)			1	0,926
Potencia R. (HP)				1

Las variables RC y Velocidad muestran una correlación débil (0,314), lo que indica que existe una leve influencia directa entre ambas, igualmente entre RC y Fuerza con una correlación de 0,388. Para las variables RC y Potencia su correlación (0,447) es débil, aunque muy cerca de ser moderada. Lo anterior demuestra que existe la posibilidad que los animales nacidos en el entorno altiplánico andino se hayan adaptado (sistema fisiológico) exitosamente al medio ambiente local, por lo cual el RC no fue significativamente afectado.

Las variables Velocidad y Fuerza tienen una correlación escasa o nula (0,243), indicativo que no existe una influencia directa entre ambas, mientras que entre Velocidad y Potencia existe una correlación de moderada a fuerte (0,561).

Entre tanto, las variables Fuerza y Potencia presentan una correlación entre fuerte y perfecta dado el valor de 0,926, indicando que el factor Fuerza (de tiro) influyó en los resultados de la variable Potencia ya que existe una dependencia directa entre ellas. Lo cual indica que al incrementarse la fuerza de tiro tiene como resultado directo el incremento de la potencia, pero no ocurre en la misma proporción con la velocidad de trabajo, muy posiblemente por factores fisiológicos de los animales, los cuales al sentir incremento de la fuerza tienden a reducir su velocidad de trabajo (factor que difiere con un tractor agrícola, que tiende a conservar la velocidad con incrementos de la fuerza).

B. Condiciones del suelo. Las siguientes fueron las condiciones de textura, humedad y resistencia al corte encontradas en la U.E. #1:

1. Textura: Franco-limoso. Suelo medianamente pesado y debido a la alta humedad y el suelo húmedo presentó adherencia a la herramienta de labranza.

2. Porcentaje de humedad: 89%. Las intensas lluvias de la semana anterior aumentaron el porcentaje de humedad en el suelo, alcanzando niveles que superaron la capacidad de campo, exigiendo mayor fuerza de tiro en los animales.

3. Resistencia al corte: 130 kPa. Este valor es indicativo de un suelo con un nivel intermedio de compactación.

C. Efectividad de la herramienta: El SIBIOTA con el cincel parabólico trabajaron satisfactoriamente, a pesar de la alta compactación y humedad. El cincel penetró el suelo con un mínimo esfuerzo y el disco de corte abrió una brecha a través del sistema radicular del pasto Kikuyo facilitando el trabajo del cincel el cual dejó un delgado surco/franja a una profundidad predeterminada de 15 cm. El cincel dejó los surcos medianamente limpios, ya que parte del suelo removido se reincorporó nuevamente en la zanja por efecto del sistema radicular del Kikuyo y la alta humedad. El suelo en estado plástico se adhirió al cincel debido a la alta humedad. Las herramientas no tuvieron ningún desperfecto o accidente durante la labranza y no se requirió de ninguna reparación y ajuste.

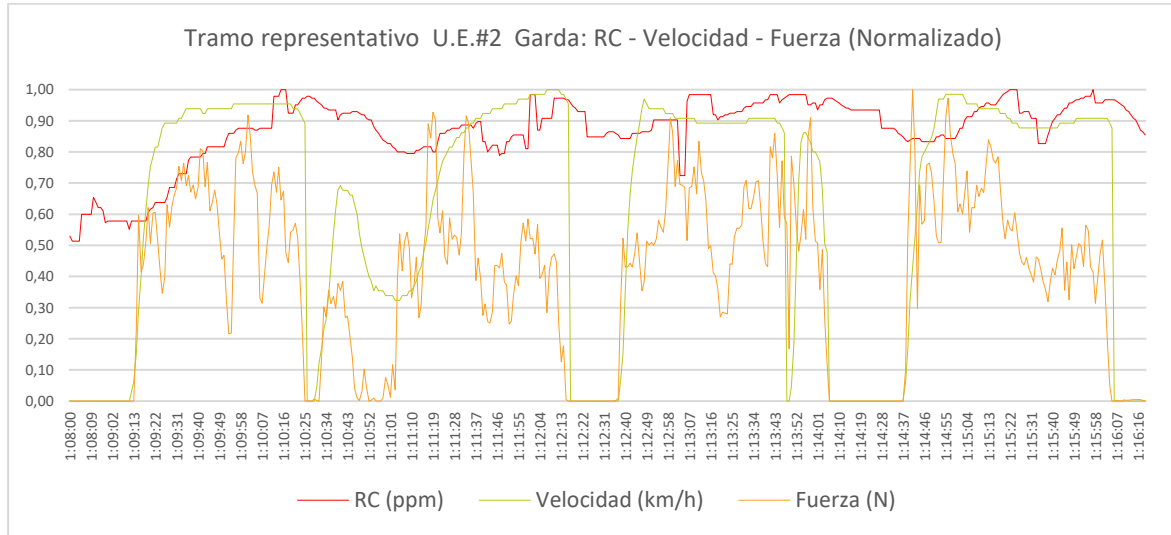
5.6.2 U.E. No 2. Finca Garda (Criadero Los Brabantes)

El SIBIOTA operó en dos subparcelas con área total de 8.014 m² y completó el trabajo en aproximadamente 2:45 horas. Los potreros están ubicados en suelos planos y laderas moderadamente inclinadas con pendientes de 7 – 12%. Las dos subparcelas se dedican a la producción de forraje/pasto de corte utilizando una mezcla de pastos como: Kikuyo, carretón, rye grass, poa, falsa poa y avena. El potrero se mostró limpio y desbrozado para facilitar la tarea de cincelado uniforme, con una separación de 1 m de ancho entre hileras/surcos. El cincelado se complementó con el esparcimiento de abono animal (equinos). Esta práctica ha resultado en un suelo menos compactado (más suelto) y un mejor aforo de pastos por la adición regular de materia orgánica con cal agrícola.

A. Rendimiento animal. Los animales trabajaron holgadamente. El clima se describe como nublado, con lluvia muy ligera, un día muy fresco. Los animales exhibieron una respiración normal durante la duración del ejercicio con períodos regulares de descanso. El rendimiento de los caballos generó una fuerza 2260,1 N para una potencia de 2519,4W (3,5 HP). La **Gráfica 5-6**, muestra un tramo de un recorrido representativo del ensayo, ilustra el comportamiento del ritmo cardiaco, velocidad y fuerza en un periodo de tiempo

en el cual se tiene los **valores Máximos**: RC: 185(ppm), Velocidad: 6,5(km/h), Fuerza: 4359(N). **Es importante mencionar que la Gráfica se encuentra normalizada.**

Gráfica 5-6: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca Garda



Para **U.E. No 2. Finca "Garda"**, la **Tabla 5-2** muestra la correlación entre las cuatro variables, para una muestra de 1086 datos.

Tabla 5-2: Correlación de Pearson para U.E. #2

	RC (ppm)	Velocidad (km/h)	Fuerza (N)	Potencia R. (HP)
RC (ppm)	1	0,208	-0,0679	0,0336
Velocidad (km/h)		1	0,503	0,743
Fuerza (N)			1	0,924
Potencia R. (HP)				1

Las variables RC y Velocidad muestran una correlación escasa o nula (0,208), lo que indica que existe una leve influencia directa entre ambas; entre RC y Fuerza con una correlación nula (-0,0679), al igual que RC y Potencia con una correlación nula (0,0336). Esto confirma lo mencionado anteriormente en la U.E. 1: existe la posibilidad que los animales nacidos en el entorno altiplánico andino se hayan adaptado (sistema fisiológico) exitosamente al medio ambiente local, por lo cual el RC no fue significativamente afectado.

Las variables Velocidad y Fuerza tienen una correlación moderada con un valor de (0,503). Entre las variables Velocidad y Potencia se muestra que existe una correlación entre moderada y fuerte (0,743).

Entre tanto, las variables Fuerza y Potencia presentan una correlación fuerte (0.924), indicando que a mayor fuerza registrada mayor es la potencia generada por los animales.

Si las variables de Velocidad, Fuerza y Potencia muestran una relación entre mediana y fuerte podemos concluir, que en la U.E. #2 el “factor velocidad” fue relevante, porque a mayor velocidad mayor es la fuerza, por ende, mayor es la generación de potencia.

De acuerdo con la Tabla 5-6 en la U.I. 2 se tuvo el menor valor de resistencia al corte y un valor medio de humedad del suelo, muy seguramente esto contribuyó a que se obtuviera la velocidad más alta (5,4 km/h). Donde este valor alto de velocidad presentó alta correlación con la potencia, dando como resultado el mayor valor de potencia (3,5 HP) registrado en comparación con las otras U.I.

Figura 5-11: Ubicación de la parcela de ensayo, Guasca, Cundinamarca



Fuente: (Autor, 2019)

B. Evaluación del suelo. Durante los últimos diez años, la parcela seleccionada para el estudio ha sido dedicada exclusivamente a la producción de pasto cultivado de corte. La práctica de subsolar

(rayar) el suelo se realiza 2 veces al año (desde hace tres años) y es combinado con el esparcimiento de abono de equino mezclado con cal agrícola, cal viva, gallinaza (ocasionalmente) y 2 bultos de fertilizante por ha. El aforo de pasto se ha incrementado de manera substancial. Según los resultados de las muestras de suelo el promedio de humedad fue de 50%. Es importante señalar que cuatro de las 12 muestras indicaron un alto porcentaje de humedad correspondiente a la parte baja del potrero. El pasto Kikuyo no tuvo el mismo impacto adverso como en las otras fincas participantes. El sistema radicular demostró ser menos denso y su profundidad se estableció entre 5 y 6 cm. Tanto los animales como las herramientas operaron eficientemente. Es muy posible que el uso regular del cincel parabólico haya incidido en el desarrollo más fino (delgado) del sistema radicular del Kikuyo. (Ver **Figura 5-11**)

1. Textura: Franco-limoso. Se considera un suelo de tipo mediano.

2. Porcentaje de humedad: 50%. El nivel de humedad se consideró moderadamente alto y muy apropiado para realizar la labranza y el comportamiento del cincel en un suelo medianamente húmedo fue normal. La humedad facilitó el trabajo del cincel, permitiendo que éste penetrara y avanzara por el suelo rompiéndolo muy fácilmente. También se observó que porciones de suelo en estado plástico se adhirió a la herramienta indicando mayor presencia de humedad a profundidades mayores a los 10 cm.

3. Resistencia al corte: 108 kPa. Este valor es indicativo de un suelo con un nivel relativamente bajo de compactación, probablemente, hasta los 15 cm de profundidad.

C. Evaluación de las herramientas: El SIBIOTA con el cincel parabólico roturaron el potrero con relativa facilidad. Las herramientas no experimentaron ningún desperfecto o accidente durante la labranza y no se requirió de ninguna reparación y ajuste.

5.6.3 U.E. No 3. Finca “Doña Luna”

El SIBIOTA operó en una subparcela de 3.100 m² y el trabajo de labranza demoró 1 hora y 45 minutos. El uso de la subparcela se ha concentrado en el pastoreo directo en los últimos 8 años,

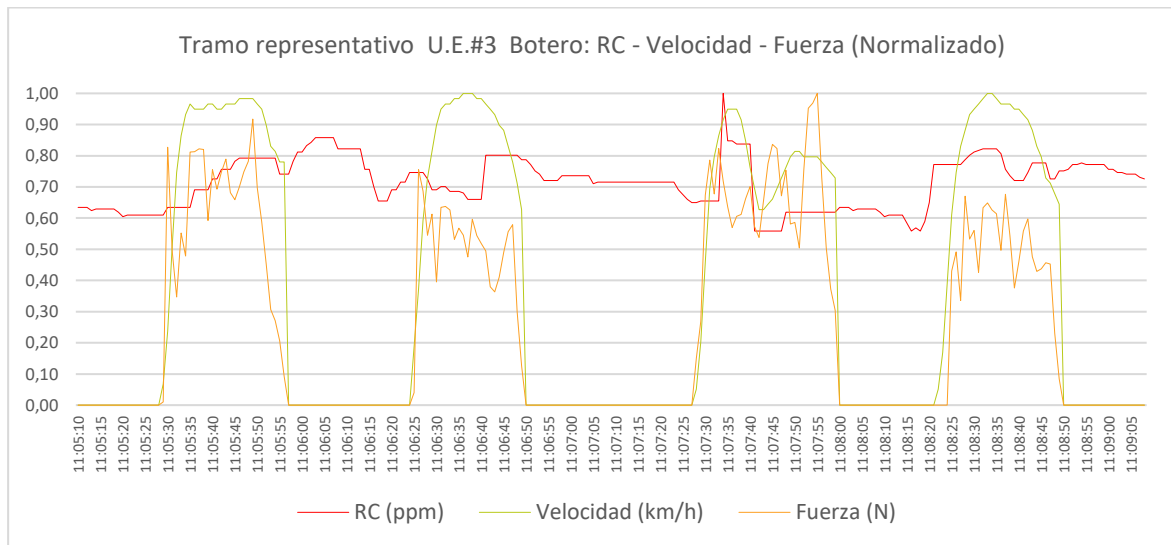
sin el beneficio del uso de un cincel para aumentar la porosidad y generar una mayor producción de pasto, ver **Figura 5-12**.

Figura 5-12: Ubicación de la parcela de ensayo



Fuente: (Autor, 2018)

A. Evaluación del rendimiento animal: Los animales demostraron su capacidad de tiro, pero fueron exigidos sobre niveles normales de fuerza para realizar su trabajo debido a la alta compactación del suelo. Los animales se beneficiaron de mayores tiempos de descanso ocasionados por las frecuentes paradas, debido al menor tamaño de la subparcela y cortos recorridos, extendiendo el tiempo promedio calculado para completar la faena. El rendimiento de los caballos generó una fuerza promedio de 2722 N convertida a una potencia de 2407,7 W (2,9 HP). La **Gráfica 5-7**, muestra un tramo de un recorrido representativo del ensayo, ilustra el comportamiento del ritmo cardiaco, velocidad y fuerza en un periodo de tiempo en el cual se tiene los valores Máximos: RC: 197(ppm), Velocidad: 5,9(km/h), Fuerza: 4764(N). **Es importante mencionar que la Gráfica se encuentra normalizada.**

Gráfica 5-7: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca Doña Luna

Para **U.E. No 3. Finca “Doña Luna” (Botero)**. La **Tabla 5-3** muestra la correlación entre las cuatro variables, para una muestra de 2173 datos.

Tabla 5-3: Correlaciones de las Variable Medidas para la U.E. #3

	RC (ppm)	Velocidad (km/h)	Fuerza (N)	Potencia R. (HP)
RC (ppm)	1	0,0717	-0,0304	0,0125
Velocidad (km/h)		1	0,449	0,722
Fuerza (N)			1	0,917
Potencia R. (HP)				1

Las variables RC y Velocidad muestran una correlación escasa a nula (0,0717), al igual que entre RC y Fuerza (-0,0304) y RC y Potencia (0,0125), lo que sugiere que no existe una influencia directa entre todas ellas. Lo cual significa que el “factor RC” no tuvo injerencia alguna en las otras tres variables.

Las variables Velocidad y Fuerza tienen una correlación débil (0,449), indicativo que no existe una influencia directa entre ambas, mientras que entre Velocidad y Potencia si existe una correlación entre moderada y fuerte (0,722).

Entre las variables Fuerza y Potencia se presenta una correlación entre fuerte y perfecta con un valor de 0.917, indicando que con la mayor fuerza generada mayor es la potencia de tiro.

B. Evaluación del suelo: La textura y tipo de suelo es similar al de la finca Garda, debido a la proximidad de la subparcela (vecino). El potrero se ha dedicado al pastoreo directo del ganado lechero y como resultado se ha compactado a niveles muy altos. La fecha elegida para cincelarlos coincidió con el periodo seco de la temporada y se notó por la baja presencia de humedad en el suelo.

1. Textura: Franco-limoso. Se considera un suelo de tipo mediano.

2. Porcentaje de humedad: 36%. El nivel de humedad en el suelo franco limoso se considera una humedad media, apta para realizar trabajos de labranza de buena calidad, eficaz y eficiente.

3. Resistencia al corte: 219.4 kPa. El alto valor de resistencia al corte exigió mayor potencia por parte de los animales. Su alto valor coincide con el manejo histórico del lote, el cual no se ha cincelado en los últimos 8 años.

C. Evaluación de las herramientas: El SIBIOTA con el cincel parabólico operó en un suelo compactado. Esto hizo que el roce del cincel con el suelo produjera un ruido muy particular de estallamiento. El SIBIOTA experimentó un accidente mecánico hacia el periodo final del ensayo como consecuencia de la dureza del suelo. La reparación del SIBIOTA fue mínima, pero el daño al sensor de carga que se ubicaba próximo al área accidentada no pudo ser reparado y se tuvo que reemplazar por otro de similar capacidad.

5.6.4 U.E. No 5. Centro Agropecuario “Marengo”

El SIBIOTA operó en un potrero en pasto Kikuyo con el cual se alimentaba directamente al ganado lechero. Esta parcela se encuentra ubicada en suelos planos con diferentes características físicas. Por tanto, el potrero asignado se dividió en dos sectores, sector A y B. La información de humedad y resistencia al corte se evaluaron separadamente, el sector A representando un suelo “blando” y el sector B el área “dura” de la misma parcela.

El sector A, albergó un suelo con una moderada presencia de humedad y el sector B, representando un suelo “cementado” con muy baja humedad. Muy relevante son las diferencias de valores en kPa para un mismo tipo de suelo, 176,0 kPa y 228,0 kPa. Interesantemente, la U.E. #3b ubicada en Guasca, también registró un alto nivel de compactación (219,4 kPa) con una humedad moderada (36%), pero superior al sector B de la parcela de Marengo. Ver **Figura 5-13**

Figura 5-13: Ubicación de la parcela de ensayo, Marengo (sector A)



Fuente: (Autor, 2019)

El comportamiento de los animales y la herramienta utilizada fue muy similar. Los animales demostraron un notorio esfuerzo para realizar el trabajo y la herramienta tuvo la tendencia a levantarse esporádicamente cuando llegaba a los 6 cm de profundidad (medida con cinta) cuando el grado de compactación fue muy alto, como lo indica la **Tabla 5-6**.

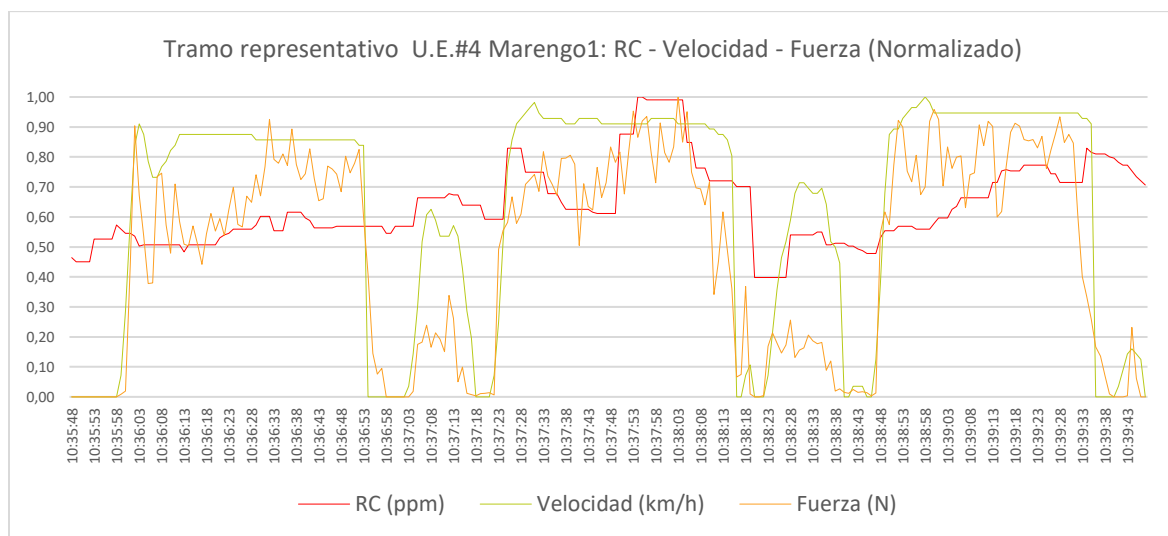
A. Evaluación del rendimiento animal. Los animales demostraron su capacidad de tiro, pero fueron exigidos sobre niveles normales de fuerza para realizar su trabajo. El rendimiento de los caballos fue condicionado a dos factores: parcela larga de aproximadamente 200 m, suelo altamente compactado (“cementado”) y baja humedad. Aun así, operando en condiciones extremas los animales generaron una fuerza de tiro promedio de 1639,9 N, convertida a una potencia de 1620,8

W (2,2 HP), en el sector blando de la parcela (A). En el sector altamente compactado (B), la fuerza de tiro promedio registrada fue de 2086,9 N, convertida a potencia de 2016,1 W y equivalente a 2,7 HP (pero con una profundidad menor de trabajo, entre 6 y 8 cm, medido manualmente)

En el sector blando del potrero (A), los animales demostraron un rendimiento y una fatiga normal. En el sector “duro” (B) demostraron un mayor esfuerzo y fatiga lo cual hizo que los descansos fueran más extendidos que lo normal para facilitar la recuperación del ritmo cardiaco y la respiración.

La **Gráfica 5-8**, muestra un tramo de un recorrido representativo del ensayo, ilustra el comportamiento del ritmo cardiaco, velocidad y fuerza en un periodo de tiempo en el cual se tiene los **valores Máximos**: RC: 211(ppm), Velocidad: 6(km/h), Fuerza: 2426(N). **Es importante mencionar que la Gráfica se encuentra normalizada.**

Gráfica 5-8: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca Marengo (sector A)



Para U.E. No 4. “Centro Agropecuario Marengo”- CAM, (sector A), la

Tabla 5-4 muestra la correlación entre las cuatro variables, para una muestra de 249 datos.

Tabla 5-4: Correlación de variables medidas para U.E. #4^a (Sector A)

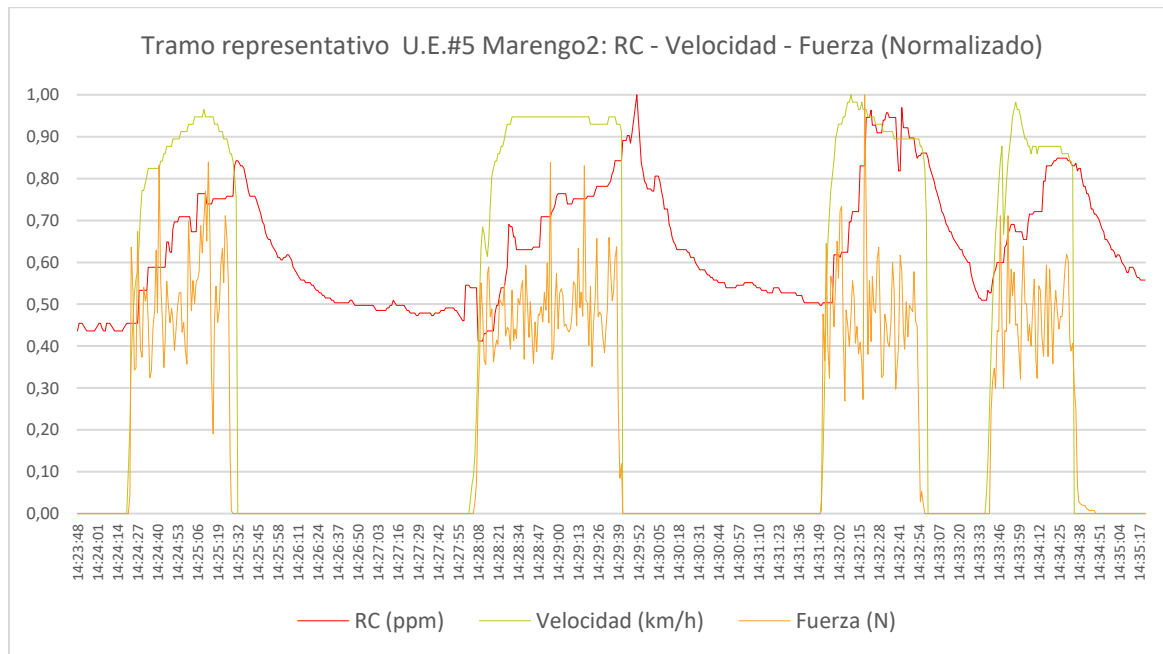
	RC (ppm)	Velocidad (km/h)	Fuerza (N)	Potencia R. (HP)
RC (ppm)	1	0,159	0,268	0,285
Velocidad (km/h)		1	0,738	0,844
Fuerza (N)			1	0,971
Potencia R. (HP)				1

Las variables RC y Velocidad muestran una correlación muy débil (0,159), al igual que entre RC y Fuerza (0,268) y RC y Potencia (0,285), indicando que no existe una influencia directa entre todas ellas. Lo que significa que el “factor RC” no tuvo mayor injerencia con las otras tres variables.

Las variables de Velocidad y Fuerza muestran una correlación fuerte (0,738) y similarmente, las variables de Velocidad y Potencia muestran una correlación fuerte a perfecta (0,844). De acuerdo con la Tabla 5-6 en la U.I. 4 (A) se tuvo un valor medio de resistencia al corte y de humedad del suelo), muy seguramente esto contribuyó a que se obtuviera la segunda velocidad más alta (4,8 km/h) y un valor de potencia bajo (2,2 HP) con respecto a las otras U.I.

Entre las variables de Fuerza y Potencia, se presenta una correlación fuerte a perfecta (0,971), indicativo que existe una influencia directa de la fuerza registrada sobre los valores de potencia W producidos, los cuales se representan muy fehacientemente.

La **Gráfica 5-9**, muestra un tramo de un recorrido representativo del ensayo del sector duro, ilustrando el comportamiento del ritmo cardiaco, velocidad y fuerza en un periodo de tiempo en el cual se tienen los **valores Máximos**: RC: 165(ppm), Velocidad: 6(km/h), Fuerza: 3835(N). Cabe señalar que la profundidad de trabajo fue más superficial entre 6 y 8 cm. **Es importante mencionar que la Gráfica se encuentra normalizada.**

Gráfica 5-9: Recorrido representativo normal del SIBIOTA en la finca Marengo (sector B)

Para U.E. No 5, “Centro Agropecuario Marengo - CAM, sector B, la **Tabla 5-5** muestra la correlación entre las cuatro variables, para una muestra de 2565 datos.

Tabla 5-5: Correlaciones de las variables medidas para U.E. #4B (lote 2)

	RC (ppm)	Velocidad (km/h)	Fuerza (N)	Potencia R. (HP)
RC (ppm)	1	0,153	0,113	0,17
Velocidad (km/h)		1	0,082	0,489
Fuerza (N)			1	0,899
Potencia R. (HP)				1

Las variables RC y Velocidad muestran una correlación escasa o nula (0,153), al igual que entre RC y Fuerza (0,113) y RC y Potencia (0,17), lo que indica que no existe una influencia directa entre todas ellas. Esto significa que el “factor RC” no tuvo injerencia alguna en las otras tres variables.

Las variables Velocidad y Fuerza representan una correlación nula (0,082), y entre las variables de Velocidad y Potencia, débil (0,489). Esto nos indica que entre estas variables no existió influencia alguna.

Entre las variables de Fuerza y Potencia se presenta una correlación fuerte con un valor de 0.899, indicativo que el factor Fuerza (de tiro) tuvo una fuerte influencia sobre la variable Potencia, generando un nivel aceptable de energía animal para jalar el SIBIOTA.

B. Evaluación del suelo. El potrero fue cincelado uniformemente y la separación entre hileras/surcos fue de aproximadamente 1 m de ancho, El uso continuo del potrero para pastoreo directo del ganado lechero y la falta de cincelados regulares, ha causado una alta compactación en los primeros 10 cm del suelo con muchas irregularidades del terreno y huecos. Según un estudio parcial agrológico realizado por el IGAC en 2014, se determinó que *“los suelos del CAM son altamente sódicos y poseen un alto grado de compactación a diferente profundidades”* (IGAC, 2014, p. 337). Esto pudo corroborarse durante el trabajo con los caballos, quienes tuvieron que esforzarse mucho para realizar el trabajo con el cincel en la mitad occidental de la parcela. Además, en ocasiones la herramienta subida involuntariamente hacia la superficie del suelo, alcanzó profundidades de entre 6 y 8 cm. El suelo se caracterizó por ser muy desnivelado y por tener muchos huecos lo que podría explicar la variabilidad de la información registrada por los sensores de carga y distancia (profundidad). Según se informó, los trabajos de aireación/subsolado no se realizan desde hace 6 años (Ver **Figura 5-14**).

Figura 5-14: Acabado de la labranza muy irregular (accidentado) en Marengo sector B, debido a que el cincel solo logró profundizarse en el suelo entre 6 y 8 cm, produciendo pedazos de cespedones.



Fuente: (Autor, 2019)

Los altos niveles de compactación, alcanzados por el tipo de suelo, también son agravados por el frecuente tráfico de la maquinaria pesada por los potreros, afectando el trabajo de labranza con el cincel.

En estudios anteriormente realizados en Marengo, se habría informado sobre el efecto compactador de las herramientas agrícolas y el tráfico de la maquinaria pesada en los potreros, según lo señalan los siguientes comentarios: *“el efecto del arado de cinceles alcanzó una profundidad cercana a 10.5 cm. La menor profundidad de trabajo posiblemente se debió a la dureza del suelo y a la escasa potencia suministrada por el tractor (Ford 5000/50 HP) para mover este implemento. La humedad promedio durante la prueba fue de 25,5%. ...Los valores promedios de resistencia en profundidades de hasta 7 cm no arrojaron diferencia significativa entre uno y dos pases con el cincel. Los resultados de la prueba de compactación con la rueda del tractor (tratamiento cuatro) no fueron concluyentes, puesto que no causó aumento en la resistencia a la penetración. Este hecho es un indicador del grado de dureza del suelo y del relativamente bajo aflojamiento del suelo causado por el cincel”* (Jiménez et al., 1992, p. 34).

1. Textura: Franco-arcilloso: Se considera un suelo de tipo pesado.

2. Porcentaje de humedad: Sector A = **47%** y sector B = **27%**.

La humedad fue baja para el trabajo óptimo de labranza en el sector B, lo cual exigió a los animales mayor potencia para realizarla. El cincel levantó pequeños cespedones de pasto debido al alto grado de compactación, causando que el disco de corte no pudiese cumplir su función de cortar eficazmente el pasto.

3. Resistencia al corte: Sector A = **176,0 kPa**, suelo un poco mas blando debido a la cercanía a las infraestructuras agrícolas (bodegas para crianza de cerdos) y bebederos para el ganado; y sector B = **228,0 kPa**. Suelo muy duro y cementado, empujando la herramienta hacia la superficie y exigiendo mayor fuerza a los animales.

C. Evaluación de las herramientas. El SIBIOTA con el cincel parabólico operaron en un suelo altamente compactado. Esto hizo que el roce del cincel con el suelo produjera un ruido muy particular de estallamiento y se levantara ocasionalmente en sectores de la parcela con la alta compactación reduciendo la profundidad de trabajo a pesar de que se utilizó el disco de corte el cual facilitó en gran medida la penetración del cincel en el suelo.

Sin embargo, la dureza del suelo combinada con una baja humedad afectó la penetración del cincel a la profundidad designada en el sector más duro. El cincel parabólico dejó surcos medianamente limpios, ya que parte del suelo removido se reincorporó nuevamente en la zanja por efecto del sistema radicular del Kikuyo y la poca humedad. Las herramientas no experimentaron ningún desperfecto o accidente durante la labranza y no se requirió de ninguna reparación y ajuste.

Durante el trabajo con el cincel en el sector más endurecido del suelo, se infiere que pudo haber ocurrido una “anomalía”, afectando la captura de la información por parte del SMETR, ya que el cincel parabólico, al trabajar más cercano a la superficie del suelo, pudo haber “saltado” constantemente debido a: a) un cambio significativo en el ángulo de ataque, haciendo que la punta del cincel rayara el material cementado del suelo superficialmente (flotando sobre el cementado sin estallar); y, b) a las vibraciones sutiles de las ruedas del SIBIOTA al pasar por la superficie accidentada con muchos huecos en la parcela B.

La **Tabla 5-6**, presenta la información recolectada de los ensayos de campo de siete variables de interés relacionados con las mediciones de potencia de los caballos de tiro: textura del suelo, resistencia al corte (kPa), humedad (%), profundidad de trabajo (m), velocidad (km/h), fuerza de tiro (N) y ritmo cardiaco (RC), bajo condiciones específicas de cada unidad de investigación (U.E.) y convertida a caballos de potencia (HP).

Tabla 5-6: Mediciones (promedio) de Potencia para un Cincel Parabólico con 2 Caballos de Tiro de 640 kg.**Tabla 5. Mediciones (promedio) de Potencia para un Cincel Parabólico
con 2 Caballos de Tiro de 640kg.**

U.E.	Textura del suelo	Resistencia al corte (kPa)	Humedad (%)	Profundidad (m)	Ritmo Cardíaco	Velocidad (km/h)	Fuerza de Tiro (N/kgf)	Potencia (W)	Equiv. (HP)	Altitude (msnm)	Temp (°C)
1.	franco limoso	130,0	89	0,15	127	4,5	1781,3/181,6	1654,7	2,2	3400	8 - 11
2	franco-limoso	108,0	50	0,15	149	5,4	2260,1/230,5	2519,4	3,4	2870	12 - 15
3	franco-limoso	219,4	36	0,15	145	4,3	2722,6/277,6	2407,7	3,2	2850	10 - 12
4A	franco-arcilloso	176,0	47	0,15	139	4,8	1639,9/167,2	1620,8	2,2	2560	15 - 17
4B	franco-arcilloso	228,0	27	0,06 a 0,08	129	4,7	2086,9/212,8	2016,1	2,7	2560	14 - 16

Notas: *

U.E.= Unidad experimental de investigación (Fincas).

#1 - La Represa; #2 - Garda; #3 - Doña Luna; #4A - Marengo1; y 4B - Marengo2.

R.C. = Ritmo Cardíaco.

U.E. #1 se utiliza en rotación cultivos y pastos cada 2 a 4 años

U.E. #2 Se utiliza para producción de pastos solamente. La parcela se ha cincelado regularmente dos veces al año en los últimos 3 años, a 10 cm de profundidad.

U.E. #3 Se utiliza para producción de pasto solamente. Productor señala que la parcela no se ha intervenido con herramientas de labranza desde que la tomo en arriendo hace 7 años.

U.E. #4 A y B. Potrero se utiliza para producción de pastos. Administrador señala que el potrero no ha sido intervenido con herramientas de labranza en los últimos 6 años.

5.7 RESUMEN Tabla 5-6

A. FACTOR SUELO

1. Evaluación de los suelos. Las muestras de suelo se tomaron a una profundidad no superior a 15 cm para evaluar puntualmente, las condiciones físicas del suelo antes de comenzar a realizar la labranza. Los tres factores: tipo y textura, humedad y compactación/resistencia al corte, están estrechamente relacionados entre sí y ejercen un gran impacto en la labranza del suelo.

2. Resistencia al corte: Los suelos con mayor resistencia al corte (kPa) fueron las parcelas correspondientes a las U.E.s #3 y #4B, las cuales se caracterizaron por tener porcentajes de humedad

menores con respecto a las otras U.E.s. La parcela #3 registró mayor potencia que la 4A donde la humedad y la textura del suelo fueron un factor determinante. Se reporta también que, a igual contenido de humedad, en un suelo franco arcilloso se requiere mayor potencia en su labranza, que en un franco limoso (Abbaspour et al. (2018). Revisando antecedentes históricos (IGAC, 2014; Jiménez et al., 1992) sobre la UI #4 se señala, que los suelos de dichas parcelas presentan condiciones de alta compactación alcanzando características de cementado.

A pesar de que la U.E. 4b (Marengo) fue identificada con el suelo de mayor compactación (cementado) y de menor humedad, los resultados indican valores promedios similares a 4A. Muy seguramente, se debió a que el cincel pudo penetrar solamente entre 6 y 8 cm en el suelo. Por las condiciones de baja humedad y suelo cementado, la profundidad de trabajo, área de suelo disturbado y fuerza de tiro, fueron afectados significativamente (Camacho-Tamayo & Rodríguez B., 2007, p. 66).

3. Humedad: El mayor porcentaje de humedad fue registrado en la U.E. #1. El valor se considera relativamente alto para realizar una labranza eficiente ya que se aleja del punto óptimo de plasticidad haciendo que el suelo en estado plástico se pegase a la herramienta afectando su eficiencia y la calidad del trabajo terminado. Desafortunadamente, la fecha coordinada para realizar la prueba de campo coincidió con la temporada de lluvias en la región. Pareciera que el porcentaje de humedad que más se aproxima al punto óptimo de plasticidad para una labranza efectiva fue la UI #2 lo que facilitó que el trabajo se hiciera a mayor velocidad generando una mayor potencia. Consecuentemente, la baja humedad demostrada por U.E. #4b asociada a la información histórica sobre alta compactación de sus suelos, influyó relativamente en el valor alto de fuerza de tiro, aunque se estaba labrando a menor profundidad de trabajo respecto a las otras U.E.s muy seguramente, si se hubiera conseguido una profundidad de trabajo de 15 cm, el valor de la potencia hubiera sido mucho mayor. Pero por las condiciones del suelo, la herramienta no logró alcanzar una mayor profundidad. El bajo porcentaje de humedad registrado por la U.E. #3 generó la menor velocidad con respecto a las otras U.E.s pero produjo la mayor fuerza de tiro con respecto a las demás.

Las muestras de suelo se sometieron al secado al horno según norma **USDA**, para determinar el porcentaje de humedad presente en el suelo al momento de iniciar el trabajo, para relacionar esta

información al esfuerzo que hacen los animales para jalar la herramienta, y con qué valores de humedad se le facilitó a la herramienta su penetración y estallamiento al suelo.

La humedad registrada en los suelos de las diferentes U.E.s osciló entre el 36% y 89%, para los suelos livianos y pesados. La veleta de cizalla registró valores de 108,0 a 219,4 kPa de resistencia al corte de suelos medianamente livianos y entre 176,0 a 228,0 kPa para los suelos pesados (altamente compactados). Simultáneamente, durante los trabajos de labranza, los animales exhibieron un ritmo cardíaco normal el que osciló entre un rango de 127 ppm y 149 ppm, valores muy similares a los resultados reportados por Nomura (1960), según lo mencionado por Hiraga & Sugano (2017, p. 7).

4. Tipo de suelo y textura. Las evaluaciones (in situ) de las características físicas del suelo se enfocaron en determinar el impacto que éste ejerció sobre la utilidad de las herramientas para realizar la labranza (capacidad de operar) y los animales para generar la energía (potencia) necesaria para operar la maquinaria en las actuales condiciones físicas del suelo.

5. Profundidad de trabajo. Esta fue fijada a 15 cm para exceder el sistema radicular del pasto Kikuyo, el cual se desarrolla entre 6 y 8 cm de profundidad, aproximadamente. La excepción a la profundidad de trabajo fue la U.E. 4B. A través de los datos recopilados por el SMETR, pudo observarse que cuando el cincel no penetraba, se registraban valores negativos esto debido a que el implemento se levantaba en el cabezal del recorrido lo cual provocaba que el sensor Sharp se saliera de su rango de operación, generando valores negativos. En los recorridos de trabajo se observaron valores medios a los 15 cm ajustados para la prueba.

La anomalía evidenciada por la profundidad superficial de 4B, la cual cambió a 0,06 – 0,08m, como resultado del suelo cementado, podría ser la excepción entre todos los resultados, causando una desviación de lo que pudo ser una tendencia. Si la profundidad de 4B se hubiese mantenido en 15 cm, la velocidad hubiese cambiado a un menor valor (debido a la alta compactación del suelo) y el resultado en fuerza de tiro y potencia pudieron haber sido muy diferentes y reflejar una tendencia más lógica.

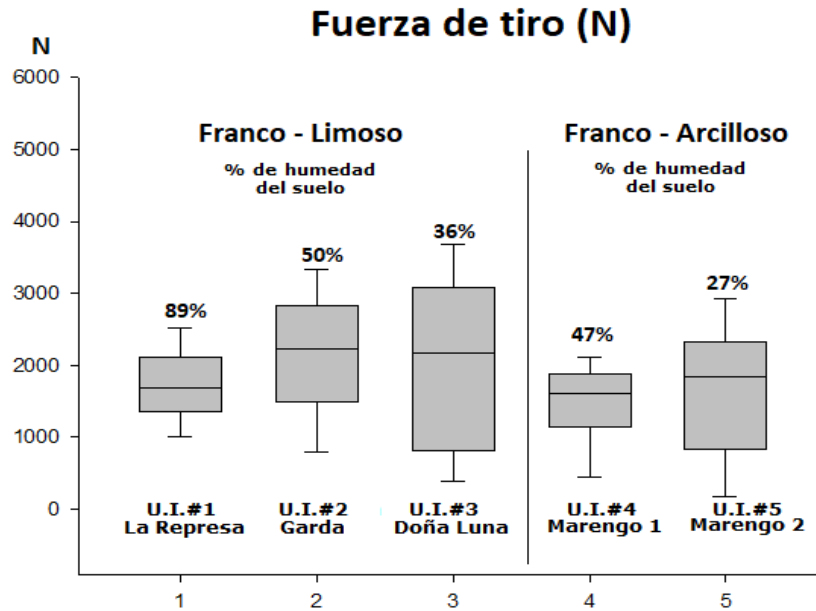
Aunque la utilización del brazo hidráulico como un elemento de control de la profundidad del cincel, y la configuración mecánica del sensor de distancia atenuaron las variaciones en la profundidad, se pudo observar una clara relación entre los incrementos del esfuerzo cuando la profundidad de trabajo era mayor.

Las pequeñas variaciones de profundidad de trabajo registradas por el SMETR fueron causadas por las irregularidades del terreno, movimientos en el axis longitudinal del carro y obstáculos encontrados en el terreno por el cincel, el cual se encontraba suspendido a una altura predeterminada, con respecto a la profundidad de trabajo y fijo en el punto de conexión al carro de enganche y el cilindro hidráulico (para bajarlo y levantarlo). Este tipo de acople significó que cuando las irregularidades del suelo alcanzaron tal magnitud, como fue el caso en el potrero de Marengo, el implemento fue elevado reiteradamente del suelo ocasionando cambios en la profundidad de trabajo y afectando la fuerza de tiro.

B. FACTOR FUERZA DE TIRO.

1. Los caballos generaron fuerzas medias de tiro relativamente similares entre las U.E.s., las cuales oscilaron entre 1639,9 N y 2722,6 N estableciendo un rango de potencia entre 2,2 y 3,5 HP.

En la **Gráfica 5-10**, se puede observar el diagrama de caja de la variable fuerza de tiro para las diferentes unidades experimentales. Al parecer el factor más influyente en la fuerza de tiro fue la humedad del suelo. Con un alto grado de humedad en el suelo se presentó menor dispersión en los resultados de fuerza de tiro, mientras que a menor humedad se presentó mayor dispersión. Es de notar que además de la humedad del suelo, el tipo de suelo ejerce influencia directa sobre la variable fuerza de tiro. Las U.E.s #3 y #4B registraron los porcentajes más bajos de humedad que las demás U.E.s. causando una mayor resistencia al corte y registrándose disminución de la velocidad e incremento en la fuerza de tiro.

Gráfica 5-10: Diagrama de caja para la Fuerza de tiro (N) para todas las unidades experimentales

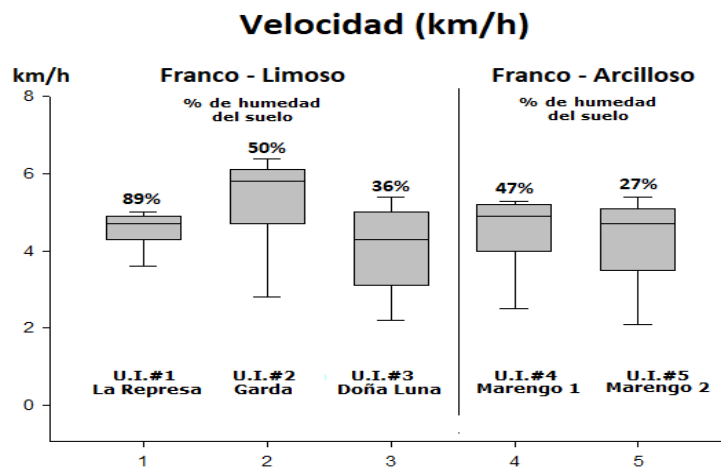
C. FACTOR VELOCIDAD

La mayoría de las velocidades (km/h) se mostraron muy próximas en rango a excepción de U.E. #2, en la cual se generó la mayor potencia debido principalmente a una mayor velocidad de trabajo. Existe una relativa aproximación entre las U.E.s #1, #3, #4A y B, pero en términos de fuerza de tiro (N) la U.E. #3 sobresale entre todas. La velocidad en las parcelas 4 A y B no parece seguir la correlación entre velocidad y fuerza, que a mayor velocidad mayor es la fuerza generada. Otra causal para entender los resultados algo anormales de velocidad es la posibilidad de que en los suelos con baja humedad el cincel no se desplazó suavemente rompiendo el suelo, pero estallando violenta e irregularmente, con un “tira y encoge” en la fuerza de tiro, debido a la poca elasticidad que ofrece el tipo de enganche entre los caballos y la maquinaria y ayudado por un terreno muy irregular.

La **Gráfica 5-11** presenta el diagrama de caja para la variable velocidad de trabajo, y se observa un comportamiento que obedece a la resistencia al corte del suelo y al tipo de suelo, aunque estadísticamente no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, hay una tendencia a que a mayor compactación del suelo, la velocidad de trabajo fue menor (U.E. #3 y U.E. #4B). Además, en estos suelos se originó un vaivén, una acción de tensión y distensión

entre el carro de enganche y los caballos, cuando el cincel trataba de penetrar el suelo cementado, causando una reacción enérgica que pudo haber afectado la grabación del sensor de carga, generando datos fuera de los parámetros normales. Sería recomendable incorporar espirales amortiguadoras al final de los tiros de los arneses de los animales para disminuir o eliminar este tipo de anomalía.

Gráfica 5-11: Diagrama de caja para la Velocidad (km/h) para todas las unidades experimentales



D. FACTOR RITMO CARDIACO.

En principio, no se percibe una marcada diferencia de R.C. entre las U.E.s en relación con las variadas alturas (m.s.n.m.) de las parcelas de ensayo. A simple vista, pareciera que el ritmo cardiaco fue influenciado principalmente por la velocidad de trabajo y no por las alturas andinas como se había pensado inicialmente.

En general, se presentó una tendencia a que los animales redujeran la velocidad de trabajo en los suelos con mayor resistencia al corte. Pero, de los valores R.C. registrados no se puede concluir o determinar si existe alguna tendencia en relación con las otras variables excepto, que el sistema fisiológico de los caballos operó en un rango de entre 127 y 149 ppm para realizar este tipo de labranza con el cincel parabólico, por lo que podríamos concluir que basado en los parámetros establecido por la NRC (2007), la intensidad del trabajo en este experimento puede clasificarse entre moderado a intenso.

Nomura y Tominaga (1960) de la Universidad de Tokyo, reportaron que la relación entre la frecuencia cardiaca y la fuerza de tiro fue directamente proporcional y que la frecuencia cardiaca de los caballos entrenados (mayor experiencia) fue menor que de los animales poco entrenados (Hiraga & Sugano, 2017, p. 12). Similar experiencia con respecto a la diferencia de esfuerzo entre animales con y sin experiencia pudo observarse entre los reproductores Oscar y Marqués, en donde el esfuerzo de Oscar (color alazán) es mucho mayor que el de Marqués y se puede apreciar en el siguiente video: <https://youtu.be/azBsxV1yO8w>

Los equinos, al igual que el resto de los mamíferos son animales homeotermos, ya que deben mantener su temperatura corporal dentro de límites relativamente estrechos, independiente de las variaciones térmicas ambientales (Baêta & Souza, 2010). (Ver **Figura 5-15**)

Figura 5-15: Imagen térmica de un equino tomada con el sistema FLIR

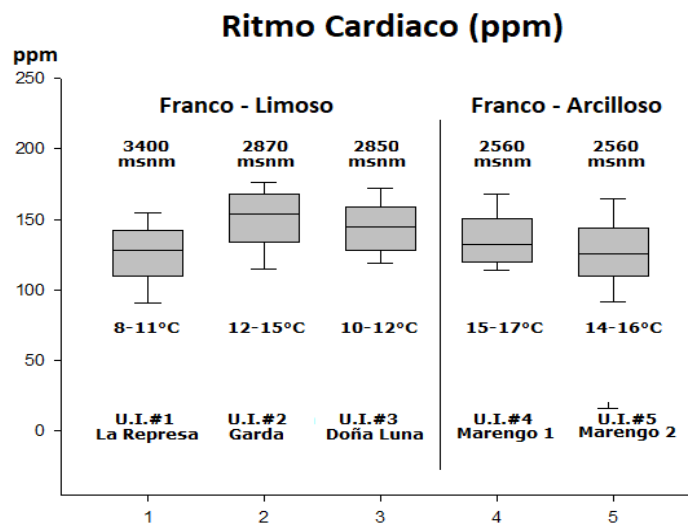


Fuente: Cortesía del Ing. Robinson Osorio, Ingeniería Agrícola, UNAL, 2019

El ejercicio y la actividad física aumentan la temperatura del cuerpo del caballo. La cantidad del calor producido depende del tipo e intensidad del trabajo. Cuanto más rápido sea el galope o más empinada la cuesta, y más exigente sea la labor, más aumenta el calor generado por el equino. Lo anterior sumado a un ambiente relativamente cálido puede producir estrés por calor, y la respuesta fisiológica del animal se expresa en vasodilatación (producto del aumento del ritmo cardiaco), sudoración y jadeo, con un aumento en el consumo de agua, y una disminución en el consumo de alimento y aumento en la fatiga.

La **Gráfica 5-12** muestra el diagrama de caja de la variable Ritmo Cardíaco, donde se observa que el Ritmo Cardíaco pudo haber sido afectado por el tipo de trabajo, pero aparentemente no fue afectado por las demás variables. Sin embargo, se observa una tendencia en la temperatura ambiental durante las labores de labranza, las cuales posiblemente afectaron levemente esta variable (8-11, 12-15, 10-12, 15-17, 14-16°C, para las unidades experimentales 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente), donde a mayor temperatura, se presentó un mayor ritmo cardíaco, esto debido a la necesidad de aumentar la vasodilatación para disipar calor al ambiente de manera más eficiente, como parte del proceso de termorregulación. Es de notar que aparentemente la altura (m.s.n.m.) no les afectó directamente, esto debido a que los animales son nativos de la altillanura Cundiboyacense y se encuentran adaptados a estas condiciones medio ambientales.

Gráfica 5-12: Diagrama de caja para el Ritmo Cardíaco (ppm) para todas las unidades experimentales



En cuanto al ritmo cardíaco y períodos de recuperación, éstos fueron estrechamente monitoreados para evitar la fatiga excesiva y para proteger a los animales de condiciones fisiológicas peligrosas (adversas). Se observó que el ritmo cardíaco durante los trabajos se mantuvo en un rango de 127 a 149 ppm (promedio) y para mantener la calidad de la fuerza de tiro los descansos no superaron 6 minutos. La yegua Tabby fue la excepción, porque demostró un RC muy alto debido a una posible parálisis nasal. En consulta con médicos veterinarios, se confirmó que los animales exóticos (externos al medio ambiente local) carecen de mayor adaptabilidad en una región tan agreste como

es el altiplano Cundi-Boyacense, y segundo, podrían existir razones de orden genético que apuntarían a que cierta línea sanguínea de la raza belga europea podría ser menos apta para el trabajo de labranza agrícola en alturas. Con respecto a los dos reproductores, estos respondieron muy bien a la demanda de energía y compartieron el peso de la labranza equitativamente y su recuperación fisiológica durante cada periodo de descanso fue rápida y su capacidad de trabajo fue consistente y complementaria. Ambos reproductores registraron un peso corporal similar de 638 y 634 kg, respectivamente.

Durante el inicio de cada prueba de campo, los caballos de tiro demostraron una alta capacidad de fuerza y velocidad de trabajo, pero su rendimiento declinó progresivamente con el transcurso del tiempo desde 5 a 4 km/hr. Los descansos durante el trabajo de cincelado, en promedio, fueron entre 5 a 8 minutos y se realizaron de acuerdo con la experiencia del operador cuándo la respiración indicaba una obvia fatiga. Cabe señalar que durante la jornada de trabajo la temperatura ambiental fue muy variada. Por ejemplo, en un periodo de 24 hr, la unidad experimental No.1 ubicada a 3.400 m.s.n.m., la temperatura ambiental marcó 11°C y estaba completamente nublado, húmedo y frío, mientras que en la finca No. 2 ubicada a 2.870 m.s.n.m., la temperatura ambiental marcó 15°C al mediodía, con mucho sol y calor, con un alto porcentaje de humedad.

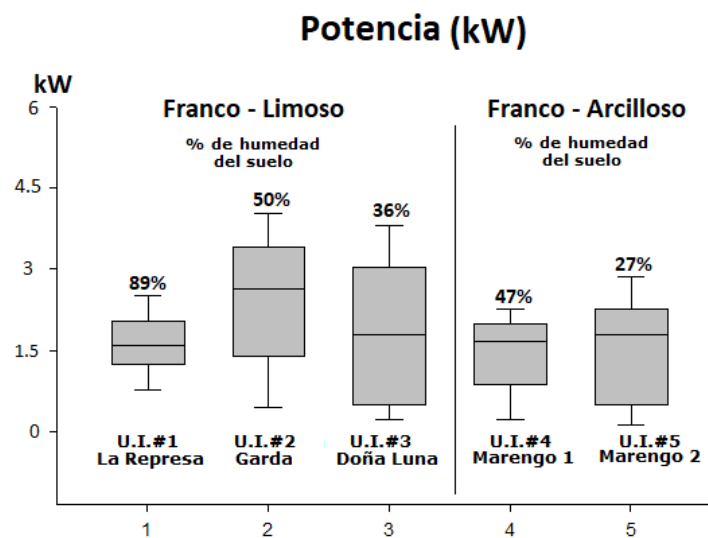
E. FACTOR POTENCIA

La potencia está directamente ligada a la relación fuerza de tiro vs velocidad. La mayor potencia (W) generada por los animales fue en la U.E. #2 resultado que influyo la alta velocidad (5,4 km/h), donde la fuerza de tiro presento un valor medio, de manera adicional se tuvo un porcentaje medio de humedad y un menor grado de compactación (resistencia al corte) del suelo. La U.E. #4A mostro una potencia relativamente baja comparada con las otras U.E.s pero muy seguramente se hubiera obtenido un valor mayor si los animales hubiesen trabajado a una mayor velocidad. Adicionalmente, debido a que la parcela de ensayo de la U.E. #2 ha sido cincelada cada 6 meses, durante los últimos cuatro años (a 10 cm de profundidad) sugiere que durante este periodo el suelo ha evolucionado para alcanzar un significativo nivel de descompactación, permitiendo un mejor desplazamiento del cincel a través del suelo a una mayor velocidad de trabajo.

Los resultados sugieren que, en suelos **franco-limosos**, en promedio, a una altura de **3400 msnm**, con una humedad del suelo de **58%**, profundidad de trabajo de **15 cm** y una velocidad de **4,7 km/h** se puede obtener una potencia de **2194,4 kW (2,9 HP)**. Para los suelos de tipo franco-arcillosos, no se pueden obtener resultados concluyentes debido a la poca información disponible (dos parcelas solamente), por consiguiente, no se ofrecen resultados promedios.

La **Gráfica 5-13** muestra el diagrama de caja de la variable Potencia, donde se observa que la potencia es afectada por la humedad en el suelo al igual que en la fuerza de tiro, con similares tendencias en los dos tipos de suelos, franco limoso y franco arcilloso. Siendo la potencia un resultado de conversión, no se puede evidenciar el origen claro de las disparidades entre los resultados para los dos tipos de suelos estudiados.

Gráfica 5-13: Diagrama de caja para la Potencia (kW) para todas las unidades experimentales



5.8 Evaluación del concepto SIBIOTA

El SIBIOTA con el cincel parabólico puede definirse como exitoso. Su operación en las parcelas que demostraron tener un suelo con una marcada dureza debido a la compactación fue eficaz y las herramientas y accesorios soportaron las reacciones de fuerzas e impactos generadas por la resistencia del suelo al corte. Se observó que el SIBIOTA no dejó rastros o marcas de las llantas del carro de enganche y de los cascos de los caballos en el suelo. El desempeño del SIBIOTA en el rayado

de potreros probó ser muy eficaz y eficiente. En principio, puede concluirse que el SIBIOTA representa una tecnología intermedia moderna en mecanización agrícola con caballos de tiro, haciéndola muy interesante, ya que oferta una capacidad adecuada de potencia para las necesidades de energía de la agricultura altiplánica colombiana.

El SIBIOTA fue transportado a los varios lugares de ensayos, ubicados entre 2560 a 3400 m.s.n.m. y en temperaturas ambientales de 8°C a 17°C, previa coordinación con los propietarios de las fincas. En fincas en donde se carecía de instalaciones adecuadas (ej. desembarcadero) el manejo de la carga y descarga se hizo dificultosa. Uno de los tantos desafíos que hay que enfrentar para acceder a los lugares donde se realizan las pruebas de campo.

5.8.1 Carro de enganche con cincel parabólico

La ergonomía del diseño ha permitido una mayor comodidad, seguridad y visibilidad a los operarios para operar la maquinaria e implementos y conducir a los animales en los potreros y alrededor de obstáculos. El carro de enganche con el cincel parabólico, batería de 12V y el sistema hidráulico registraron un peso total de 7639,38 N (**779 kgf**) (incluye el peso del operador de 63 kgf). Téngase presente que el dinamómetro registró la fuerza que se requería para mover el SIBIOTA y la fuerza que ejercía el cincel al roturar el suelo, en su condición actual de compactación y humedad. Obsérvese que la acción de mover el SIBIOTA a una velocidad, la denominamos “resistencia al desplazamiento” (vs “resistencia al rodamiento” en tractores), que es función de su peso, tipo de suelo y velocidad de operación.

Durante su fabricación se emplearon materiales de producción nacional disponibles en el mercado local para abaratar costos y su diseño modular, fácilmente permite la fabricación y/o el reemplazo de componentes/piezas, durante una reparación o modificación. Su fabricación y reparación pueden realizarse en cualquier taller artesanal o de fabricación metalmecánica, tanto en los centros semi-industriales como también, en talleres ubicados en pequeñas comunidades rurales.

5.8.2 Cincel parabólico con disco de corte

El diseño parabólico, peso y presión hidráulica del servo permitieron que el cincel en **condiciones de baja a mediana compactación** se mantuviera a la profundidad programada. La excepción es la parcela 4B en donde el cincel no pudo superar completamente el alto grado de resistencia al corte, indicado en la **Tabla 5-6** (228,0 kPa). La presión ejercida por el pistón hidráulico ayudó a mejorar la penetración del cincel en el suelo y a romper (cortar) a través del sistema radicular del pasto Kikuyo (y porción del suelo superficial) para mantenerse a una profundidad de 15 cm con relativa facilidad, mostrando una alta calidad en la labranza y el acabado del rayado. La punta del cincel roturó sin dificultad y soportó los impactos con obstáculos encontrados en el suelo (ej. piedras, postes, suelos muy duros). El peso del cincel parabólico fue adecuado para facilitar su penetración en las parcelas en donde los suelos demostraron una clara compactación y una resistencia al corte entre 108,0 y 228,0 kPa (**Tabla 5-6**). El cincel parecía tener un peso excesivo, pero demostró ser apropiado para penetrar eficazmente y pudo mantenerse cerca a la profundidad deseada, cada vez que la dureza del suelo la empujaba hacia la superficie. El ángulo (α) de ataque del cincel parabólico fue calculado manualmente. Se levantó el SIBIOTA sobre una plataforma de 15 cm de altura (profundidad de trabajo) luego se extendió el cincel completamente (simulando su penetración en el suelo) y se procedió a dibujar sobre un cartón la punta del cincel en relación con una escuadra de 90°, la cual se utilizó como el axis horizontal (suelo) para obtener un ángulo de **42°**.

El cincel se acopló al carro de enganche con un pin de 1" de diámetro a una bisagra y a un servo hidráulico, cuyas medidas fueron: 11/8" de diámetro por 12" de largo conectado al sistema hidráulico, el cual facilitó su manipulación para subirlo y bajarlo durante el transporte y durante los giros en los cabezales de los surcos. (Ver **Figura 5-16**)

Figura 5-16: Cincel parabólico con disco de corte y servo hidráulico.



Fuente: (Autor, 2019)

5.9 Desempeño y rendimiento de los caballos de tiro pesado

En general, los resultados empíricos obtenidos por medio del sistema de medición electrónica (SMETR) y el reloj POLAR, confirman la eficiencia en el desempeño y rendimiento de los caballos de tiro en general. A diferencia de los resultados de Collins & Caine (1926), obtenidos en pruebas realizadas en terrenos planos y de baja altitud (m.s.n.m.), los caballos de tiro pesado que participaron en este estudio operaron satisfactoriamente en altitudes altiplánicas de 2.560 a 3.400 m.s.n.m., mostrando una fatiga normal y una capacidad de fuerza similar a la de sus congéneres de los terrenos más bajos (próximos al nivel del mar). La literatura en general señala que el caballo de tiro tiene una capacidad para “arrastrar” cargas que representan entre el 10% y el 15% de su peso vivo, durante 8 horas de trabajo diario. (Collins & Caine, 1926, p. 223), (Miller, 2004). Sin embargo, el peso relativamente alto (799 kg) del componente mecánico del SIBIOTA en relación con el peso vivo total de ambos animales (1280 kg), indico una capacidad de fuerza de tiro equivalente al 17% (medido), pero de transporte sobre ruedas de caucho, en un periodo de cuatro horas de trabajo (con descansos regulares), en recorridos de hasta 120 metros, sin afectar su rendimiento y demostrando su capacidad y nobleza para jalar la herramienta agrícola. Los animales utilizados en el estudio exhibieron una obvia y normal fatiga y fueron limitados a trabajar el tiempo necesario para completar 1 hectárea de terreno con el cincel parabólico, lo que coincidió con las 4 horas de trabajo (promedio).

En la presente investigación no se cuantificó la potencia negativa de resistencia al desplazamiento de los caballos, pero muy seguramente fue menor al 7% de un tractor con respecto a la potencia total. Este tema sería muy pertinente para una futura investigación.

El impacto de las altitudes altiplánicas sobre la respiración (ritmo cardiaco) de los animales fue imperceptible. El tiempo de recuperación (respiración) de los animales a excepción de la yegua Tabby (quien necesitó hasta 14 minutos para normalizar su RC), fue de 6 a 8 minutos, parámetro considerado normal. La recuperación o estabilización del ritmo cardiaco de los animales es un factor muy importante a considerar durante los trabajos de labranza, porque es un indicativo del grado de fatiga del animal y de su capacidad física y fisiológica. Pero, los animales renovaron sus trayectos antes de completar el ciclo de recuperación para que este no influyera negativamente en la calidad del tiro, debido al letargo causado por un periodo relativamente largo de descanso. No existen estudios similares que puedan usarse comparativamente con estos resultados, por lo tanto, algunas conclusiones derivadas son apreciaciones del autor originadas por sus observaciones durante los ensayos de campo.

El rendimiento de los caballos en general fue muy consistente con los resultados obtenidos por Collins & Caine (1926). Ellos utilizaron arados de 14 pulgadas de corte (35,5 cm) con tres caballos para arar parcelas de pasto sudán, en suelos de mediana textura, generando fuerzas de tiro de aproximadamente 500 lbf (227kgf) a una profundidad de 6 pulgadas (15,24 cm) y desarrollando potencias de 2,15 a 2,26 HP (Ver **Tabla 1-2** y **Tabla 1-4**). Según los valores de potencia registrados en la presente investigación (Ver **Tabla 5-6**), estos sugieren que en promedio dos caballos de tiro de 640 kg pueden generar suficiente fuerza (230 kgf) para jalar un cincel parabólico a 15 cm de profundidad a una velocidad promedio de 5 km/h en suelos franco-limoso, con una humedad promedio del 58% por aproximadamente 4 horas (consumo de potencia de 2,9 HP). Para los suelos franco-arcilloso, los resultados no fueron muy concluyente, pero podría determinarse que en promedio el SIBIOTA podría generar una fuerza aproximada de 190 kgf, para cincelar un potrero a 11 cm de profundidad, a una velocidad promedio de 5 km/h, con una humedad de 37% entre 4.0 a 4.5 horas (consumo de potencia de 2,5 HP.).

Durante el inicio de los trabajos de campo, se hizo notorio que los animales mantuvieran un paso acelerado (alta velocidad) por un periodo de aproximadamente 30 minutos, la cual disminuyó

paulatinamente hasta alcanzar los promedios señalados en la **Tabla 5-6**, haciendo más frecuentes los periodos de descanso.

Los resultados antes citados pueden ser igualmente comparados con aquellos ilustrados en la **Tabla 1-3**, en donde se reportan valores de potencia de caballos de tiro, registrados por 11 investigadores de diferentes países, quienes, en promedio, han reportado que un caballo puede suministrar 1 HP (durante 6 a 8 horas de trabajo). Valor que también correlaciona con la presente investigación, donde cada caballo en promedio suministró 1,4 HP durante 4 horas de trabajo.

En principio, un caballo de tiro pesado de 640 kg podría suplir la fuerza de tiro necesaria para sustentar económicamente un predio de 0.5 a 3 hectáreas, o dos caballos de tiro pesado podrían fácilmente suplir la energía (potencia) requerida para trabajar en sistemas productivos comercialmente entre 5 y 10 hectáreas, realizando diferentes tareas agrícolas durante todo el año. Los costos iniciales para la inversión de dicha tecnología se pagarían con los ahorros generados por el no-uso del tractor, reducción en la cantidad de fertilizantes y límites en el uso de mano de obra (externa); aumento en la producción de leche, papa y hortalizas; y, se generarían rentas por medio de la oferta de servicios de mecanización con tracción animal y ventas de crías.

Inicialmente, la velocidad de los animales se cronometró manualmente para corroborar y comparar dicha información a los resultados obtenidos con el POLAR M400. Los resultados confirmaron que no existía discrepancia alguna con el reloj Polar M400 y la velocidad cronometrada con el desplazamiento normal de los animales fue la correcta. La cinta equina del reloj Polar se adhirió al caballo en la región torácica y los sensores se acomodaron según las recomendaciones del fabricante para una mejor recepción del ritmo cardíaco. Las áreas de los flancos del animal donde se ubicarían los sensores de la cinta se mojaron para una mejor recepción de la señal. El reloj POLAR registró la actividad cardíaca de los animales y cuyos resultados pueden calificarse como muy similares. Esto se aprecia por medio de las mediciones directas del ritmo cardíaco como indicador de la fuerza de tiro ejercida por cada uno de ellos.

Cabe señalar que los ensayos de campo se realizaron con un ejercicio a escala real. Los animales y la maquinaria operaron en un área aproximada de 10.000 m² para replicar el entorno en donde el agricultor se desempeñaría regularmente.

El diseño ergonómico de los arneses de trabajo agrícola permitió que se ajustaran bien al cuerpo de los animales, sin causarles daño físico como raspaduras, puntos de calor, inflamaciones, cortes, etc. Las retrancas ayudaron a controlar el peso del SIBIOTA, especialmente en laderas. Los materiales usados para su fabricación resistieron el deterioro por el uso y muestran un mínimo de desgaste con el uso normal y la intensidad de la radiación solar. La confección de aperos de tiro en talleres locales de talabartería, y debido a que carecen de experiencia, material de calidad (riata plastificada) y un mercado atractivo, no se fabrican. Los altos costos de importación incentivan a potenciales clientes a elegir arneses nacionales fabricados con materiales de llantas desechables y herraje de varilla doblada.

5.10 Evaluación de la compactación/resistencia al corte y/o penetración

Los suelos encontrados en la región no se diferenciaron mucho, en términos de compactación (dureza) y textura. Por otro lado, la fuerza realizada y el tiempo empleado en los trabajos dependieron de la ladera y el tipo de uso del suelo (pradera o barbecho), puesto que la presencia del pasto “Kikuyo” u otros de similar desarrollo radicular, acondicionaron el rendimiento de los animales.

Inicialmente, se pensó que la altura sobre el nivel del mar (msnm) podría ser un factor muy relevante por su posible impacto sobre el rendimiento fisiológico de los caballos durante los trabajos de campo. Pero para nuestra sorpresa los resultados demuestran que el impacto de la altura (msnm) sobre el desempeño de los animales fue imperceptible.

Como parte de las evaluaciones de campo y anterior al inicio del ejercicio de labranza, se introdujo la “sonda” de varilla de 3/8” de diámetro X 1 metro de largo, de acero inoxidable, cuyas apreciaciones “sensoriales” probaron ser muy prácticas para obtener una aproximación de la resistencia del suelo a la penetración, al corte y al grado de humedad presente en el suelo. Este

procedimiento sirvió para determinar el grado de esfuerzo que se podría anticipar de los animales. Se pudo apreciar que el mayor grado de compactación se encontró en los primeros 10 a 12 cm de profundidad y la varilla también indicó un cierto grado de humedad en el suelo. Este método resultó ser muy práctico para formarse una apreciación de la dureza del suelo, presencia de humedad, y la(s) profundidad(es) en donde se encontraría(n) ésta(s) condición(es), la cual podría ser utilizada por los agricultores para seleccionar y ajustar la(s) herramienta(s) de labranza.

Las condiciones de compactación/resistencia al corte influyen en el tamaño de los animales, el diseño y peso de los implementos a emplear. Es fundamentalmente necesario que en los diseños de las herramientas agrícolas par que estas penetren con facilidad y se mantengan a la profundidad deseada, especialmente en suelos muy compactados.

5.11 Factor “Kikuyo”

El pasto Kikuyo fue un factor exógeno que influyó en cierta manera, en la capacidad de tiro y por consiguiente en el rendimiento de los animales halando el cincel parabólico en el rayado de los pastizales, y acondicionó al SIBIOTA a las fuerzas de resistencia al corte del suelo en los primeros 10 cm de profundidad. La capa superficial de un suelo arcilloso asociado con el grueso y extenso sistema radicular del pasto Kikuyo presentó una condición de dureza a la penetración de la veleta y de la herramienta de labranza. El disco de corte permitió abrir el paso a la herramienta de labranza con menor esfuerzo y generó una angosta zanja evitando levantar porciones de pasto “enraizado” (cespedones). Un porcentaje alto de humedad en suelos arcillosos crea las condiciones para un suelo pegajoso que se adhiere a las herramientas de labranza haciendo la tarea de cortar o romper el suelo sea más exigente, requiriendo de más energía para llevarla a cabo.

5.12 Correlación velocidad – fuerza – potencia

En general y para todas las cinco unidades experimentales, al comparar los resultados de las correlaciones de Pearson entre las variables velocidad – fuerza – potencia, se presentó en cada unidad experimental una mayor correlación de la fuerza con potencia que la velocidad con la potencia. Lo anterior indica que al incrementarse la fuerza de tiro tiene como resultado directo el incremento de la potencia, pero no ocurre en la misma proporción con la velocidad de trabajo, muy posiblemente por factores fisiológicos de los animales, los cuales al sentir incremento de la fuerza

tienden en algunos momentos a reducir su velocidad de trabajo (factor que difiere respecto a un tractor agrícola, que generalmente tiende a conservar la velocidad con incrementos de la fuerza).

5.13 Impacto de la tecnología de mecanización a tracción animal

La tecnología de la mecanización agrícola a tracción animal puede impactar positivamente en áreas de interés estratégico de la agricultura y la economía rural a nivel departamental y nacional. El impacto del uso de caballos de tiro sobre las áreas de interés estratégico tiene relación con el objetivo #3 de esta tesis y se les identifica como áreas de interés estratégico: agronómica, social, económica, energética y tecnológica. La evaluación en profundidad no ha sido factible a corto plazo, ya que se necesitarían estudios adicionales muy puntuales, los que requerirían de tiempo adicional para determinar el grado de impacto que los animales de tiro pueden generar sobre dichas variables. Sin embargo, basado en experiencias históricas internacionales, anteriores a la mecanización moderna con fuerza motriz cuando la mecanización de la agricultura se practicaba con animales de tiro, se puede inferir que el empleo de caballos de tiro podría tener un renovado impacto, amplio y positivo, en las actividades de desarrollo agrícola y rural de la agricultura local y de manera muy puntual de las siguientes variables:

A. Impacto agronómico:

El objetivo principal es generar una agricultura sostenible que permita mejorar la productividad agrícola con un mínimo impacto al medio ambiente. Para lograrlo, se deberán “reparar” algunas de las áreas críticas de la agricultura local, relacionadas principalmente con el suelo y su manejo, siendo éstas: disminución de la compactación y la erosión del suelo; y aumentar la capacidad de infiltración y almacenaje de aguas lluvias y controlar las escorrentías en laderas.

La mecanización agrícola con caballos de tiro es una opción muy válida en las actividades de producción de los tres sistemas productivos de importancia económica para la región Cundi-Boyacense, como son: leche, papa y hortalizas. El caballo de tiro tiene la capacidad para trabajar de manera eficaz y eficiente en la labranza de calidad con herramientas modernas, bien diseñadas y fabricadas con materiales de buena calidad para las necesidades de una agricultura local. Los animales de tiro pueden trabajar en cultivos, en hileras y en laderas suaves con pendientes <20° con seguridad, en tareas diversificadas, tales como: fumigación, cosecha y conservación de forraje,

fertilización de potreros y cultivos, control mecánico de malezas, transporte de cosechas, etc. La disponibilidad y uso de abono animal para aportar materia orgánica al suelo se distribuiría en los suelos en producción, disminuyendo de esta manera el empleo de abonos químicos; empleando herramientas para el control mecánico de las malezas y disminuyendo el uso de herbicidas en los sistemas productivos de papa y hortalizas. Adicionalmente, debemos considerar el efecto que el cambio climático tendrá en las formas que se practica la agricultura actualmente, con cambios en los patrones y cantidad de lluvias e intensidad solar y la manera que esto impactaría en la producción de los alimentos.

a. Producción lechera. El mayor desafío de la industria lechera es la producción de forrajes de alta calidad y rendimiento de forraje (aforo). El manejo del ganado lechero y equino, bajo condiciones de confinamiento o semi-confinamiento facilitaría el trabajo de labranza, permitiendo que los potreros queden libres para la producción de forrajes, aumentando el aforo y el manejo adecuado de estos pastos para su pronta recuperación después del corte. El uso de caballos facilitaría el manejo del abono para aplicarlo regularmente con una carreta en los potreros. Similarmente, el establo proporcionaría la infraestructura para acomodar el cuarto de ordeño y enfriamiento para las cantinas de leche (tanque refrigerador), elevando su calidad de entrega, lo cual podría ser premiado con mejores precios de compra. Las actividades de labranza se orientarían a los trabajos de: rayar el suelo, sembrar (en hilera), fertilizar/abonar, fumigar y transportar la leche. El sistema de confinamiento aportaría cantidades importantes de abono animal (caballos y ganado) para la fertilidad de los suelos en producción.

b. Producción de Papa. Los animales de tiro pueden ser utilizados para arar el suelo, abrir surcos o preparar camellones, controlar mecánicamente las malezas, fumigar, cosechar y transportar la cosecha, se realizaría oportunamente a un costo menor, comparado con los costos de servicio y disponibilidad de un tractor. También, reduciría la compactación y erosión del suelo ocasionada por el tráfico de vehículos y maquinaria pesada durante la preparación del suelo, la siembra y la cosecha. El impacto del trabajo de los animales de tiro en laderas con pendientes $< 20^\circ$ sería muy positivo, porque estos se adecuarían a la geografía del terreno con facilidad y ocuparían el espacio dejado por el tractor.

c. Producción de Hortalizas. Los caballos de tiro pueden utilizarse eficazmente en la preparación del suelo, formación de surcos y camellones, trasplante de plántulas de hortalizas, control mecánico de malezas, fumigación y transporte de la cosecha. La separación entre hileras podría reducirse para acomodar un mayor número de plantas por m² en comparación al uso de un tractor. La compactación del suelo se reduciría significativamente, debido al menor tráfico de vehículos y al uso de implementos más livianos. Los agricultores, al disponer de las herramientas agrícolas en forma inmediata podrían realizar trabajos de labranza rápida y oportunamente. El control mecánico de las malezas reduciría el uso de químicos y ayudaría a lograr cosechas más sanas y de mejor calidad. La producción hortícola con tracción animal no se limitaría a campo abierto sino también bajo condiciones de invernaderos.

B. Impacto socioeconómico:

La transformación de la agricultura de la región andina oriental es muy necesaria para responder a la pobreza endémica del sector rural, con la generación de empleos especializados y mejor remunerados. Una agricultura transformada con renovados valores socioculturales, conocimientos técnico-científicos y una economía rural mejor desarrollada con oportunidades para todos, facilitaría el consenso general para fomentar cambios con nuevas prácticas agrícolas de carácter sustentable y promoviendo mayores conocimientos entre los agricultores y la mano de obra rural. Esta condición ayudaría a potenciar el sector rural para generar una mayor prosperidad en las comunidades agrícolas en general.

Sería muy beneficioso rescatar la herencia y los valores agrarios de la cultura local (regional) e incorporar o adoptar aquellos aspectos de la cultura agraria europea que podrían ser útiles para la transformación agrícola de la región Cundi-Boyacense y otras regiones agrícolas de Colombia. Estudios realizados fuera de la región Latinoamericana, informan de beneficios importantes obtenidos por pequeños agricultores con el uso de caballos de tiro. Los costos de inversión y operación con caballos de tiro, versus el tractor, son muy razonables (Ver Anexo F). Pero el beneficio más significativo a corto, mediano y largo plazo sería la generación de empleos especializados. Un pequeño (y mediano) agricultor que opte por adquirir un paquete tecnológico a tracción animal, se le empoderaría personalmente para que éste pueda utilizar más eficientemente su tiempo disponible, creándose las oportunidades de un segundo empleo si opta por ofrecer a los

vecinos de su comunidad sus servicios de labranza con sus propios animales y herramientas agrícolas, surgiendo una nueva actividad económica el arrendamiento de máquinas y equipos o el servicio completo de mecanización.

Se trata de promover una economía circular en donde los recursos limitados de la comunidad se reciclan, estos se usan y reinvierten en la prosperidad de la comunidad. Al generarse oportunidades para una menor dependencia en recursos externos al sistema productivo local, el pequeño productor podría capitalizarse más fácilmente lo que le permitiría reinvertir en tierra, equipos, animales, etc. Es importante considerar que, al no tener la necesidad de arrendar un tractor para labrar el terreno, el agricultor se ahorraría el pago del arriendo (aproximadamente \$50.000/hora). Adicionalmente, él podría utilizar o dar empleo a toda su familia y de esta manera, minimizaría su dependencia en trabajadores externos a la finca. Además, si los productores agrícolas pudiesen contar con varios caballos de tiro, estos proporcionarían una importante cantidad de abono que se traduciría en un ahorro significativo en las compras de fertilizantes químicos u orgánicos, para esparcir en las parcelas en producción.

C. Impacto medio ambiental:

El uso de caballos de tiro se considera muy apropiado en el contexto de una agricultura sustentable biodinámica y de conservación. El impacto medio ambiental se considera mucho menor que aquellos causados con el uso de la maquinaria automotriz. Las prácticas de labranza con animales de tiro tienden a ser menos dañinas al medio ambiente, debido al diseño, tamaño, peso y geometría de las herramientas. Los caballos de tiro, por su menor peso que el tractor y las herramientas más pequeñas y livianas, pueden contribuir a reducir la compactación y ayudar con un mejor control de la erosión. Correcciones prácticas e inmediatas que tienen como propósito superar factores puntuales en las prácticas tradicionales de labranza, son enfocadas a minimizar daños al suelo y mejorar el manejo de las aguas lluvias para evitar severas escorrentías y conservarlas para su uso. Por medio de prácticas de labranza responsable y aceptable para los agricultores, éstas podrían ser incorporadas, como parte de una estrategia nacional (estratégico), para resolver dos áreas críticas que demanda el medio ambiente: el uso excesivo de combustibles fósiles, químicos y las emisiones de carbón en la agricultura.

Resultados de un estudio comparativo entre la tracción automotriz y animal, indican que la diferencia significativa entre la tecnología automotriz vs animal, fue la producción de CO₂ de 5.70 y 2.73 (emisiones GEIS), respectivamente (Hurga et al., 2011, p. 3). La tecnología a tracción animal con caballos de tiro utiliza muy poco combustible fósil y tiene la capacidad de producir su “propio”, por medio de buenos forrajes y granos para la alimentación animal. La tracción animal, consume energía para la fabricación de arneses, herraduras, concentrados, medicinas, fertilizantes, etc. El gran desafío para los pequeños y medianos productores es mecanizar el agro a cero costos para el medio ambiente y asegurar la longevidad de la población activa (productiva) y la comunidad rural en general, por medio de una agricultura sostenible. La mecanización con caballos de tiro permitiría prácticas de labranza conservacionistas para reducir la compactación y la erosión de los suelos andinos; la reducción de carbono causada por el uso de combustibles y las quemaduras de los rastrojos de las cosechas.

La gran incertidumbre asociada al cambio climático es como éste afectaría el calendario agrícola de siembras y cosechas, y la adaptabilidad de las plantas a la intensidad solar y la disponibilidad y frecuencias de las lluvias. La tracción animal permitiría que una gran mayoría de agricultores tengan a su disposición una fuente energética para la mecanización de sus trabajos agrícolas oportunamente con un enfoque conservacionista, sin el uso de combustibles y químicos agrícolas de origen fósil y con herramientas más apropiadas. Los caballos aportarían al mejoramiento económico y medio ambiental, al intercambiar el consumo de energía fósil por el combustible vegetal (pasto y granos) y reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

D. Impacto energético: La necesidad medio ambiental por una reducción en el consumo de combustibles, posiciona el uso de animales de tiro como una excelente opción tecnológica, la que podría alcanzar un importante nivel de “autonomía energética”. El uso del combustible ACPM (diésel) “...representa entre 40% y 50% del costo total de la operación horaria del tractor” (Hetz & Reina, 2013, p. 7), y allí radica la necesidad por emplear otras opciones para reemplazarlo con fuentes de energía más barata, como es el caso de la tecnología a tracción animal.

En una pequeña finca diversificada de los EE. UU., en donde se utilizan de manera mixta caballos de tiro con un tractor de 36 cv (con maquinaria e implementos agrícolas), reportan un consumo promedio de combustible ACPM de **3.62 l/ha**, muy similar al reportado por Boto et al. (2005, p.

16), pero con un tractor de 48 HP utilizando un cincel. Según información brindada por un comerciante local de maquinaria agrícola de Bogotá, un tractor Kubota de 23 HP consumiría aproximadamente 0.85 a 1.0 galón/hora (3.5 a 4.0 l/h) y utilizaría 3 horas para cincelar una hectárea de terreno “blando”, a 15 cm de profundidad. Basado en estos ejemplos, podemos asumir que el consumo de combustible se estimaría entre 10 a 12 litros de ACPM/ha, a un costo aproximado de entre \$24,000 a \$29,000 (pesos colombianos) por hectárea. Es de notar que el consumo en l/ha de combustible del tractor de la finca de EE.UU fue aproximadamente la mitad del tractor Kubota, muy posiblemente por la razón que el agricultor reportó valores promedios de labores agrícolas, y en una labor de cincelada se consume de manera constante alta cantidad de combustible, por ser una labor de alta exigencia energética.

En un escenario agrícola local es muy común utilizar los “Servicios de Mecanización Agrícola” de un tractor de 70 HP con un equipo de cinceles (tres cinceles) de 2.0 m de ancho. El consumo aproximado de combustible (ACPM) de un tractor Kubota de 68 HP (M-7040) se estima entre 1,8 a 2,0 gal/h (6,8 a 7,6 l/hr), y el tiempo que necesita para cincelar una hectárea de terreno blando es de dos horas, a 60 cm de profundidad, el costo aproximado de combustible sería de \$36,000 a \$44,000 por hectárea. El contrato de servicio de un tractor es muy común para la mayoría de los pequeños productores de papa de la región CundiBoyacense.

El consumo de energía automotriz vs animal puede ser mayor para realizar el mismo trabajo. Resultados del estudio comparativo realizado por Huerga et al. (2011, p. 3), reseñan que la tracción automotriz produjo 8.2 MJ/ha y consumiendo 102,6 MJ/ha, en contraste los caballos produjeron 8.2 MJ/ha y consumieron 90,77 MJ/ha, creando un ahorro de 12 MJ/ha aproximadamente. Para el caso descrito del tractor Kubota de 23 HP y consumiendo 10 l/ha de ACPM, y considerando el poder calorífico del ACPM de 35,86 MJ/l se tendría un consumo de 357 MJ/ha, lo cual corresponde a un alto consumo energético, como es el trabajo de cincelar un potrero con pasto.

Los caballos de tiro podrían utilizarse como una estrategia para reducir el empleo de maquinaria de combustión interna y los costos asociados con el uso de energía “fósil”. La mecanización con caballos de tiro aportaría la opción de mecanización con energía más limpia y económica, la cual

permitiría fortalecer el actual sistema productivo y así economizar en recursos limitados, para cubrir otros gastos críticos.

NOTA: *El criadero Los Brabantes utiliza un carro de enganche “motorizado”, de 25 HP con sistema hidráulico para operar una guadaña (cortadora de pasto), una enfardadora de pasto y un arado rotativo (rotovo). El consumo de gasolina se considera “en demanda”, ya que el motor se prende, solamente, cuando se va a operar la maquinaria señalada y su transporte hacia y desde los potreros se jala con dos caballos.*

E. Impacto tecnológico. Los caballos de tiro pueden trabajar en tareas múltiples relacionadas con la labranza y el transporte agrícola. Debido a la simplicidad de la tecnología a tracción animal, los productores y trabajadores agrícolas pueden operar animales y herramientas con mínima dificultad. Como se ha podido evidenciar durante las pruebas de campo, los animales y las herramientas pueden trabajar en terrenos planos y laderas suaves ($< 15^\circ$) hasta 3.400 m.s.n.m. La opción de emplear enganches de más de dos caballos, para operar maquinaria para el cubrimiento más ancho en terrenos con mayor superficie (ej. 20 hectáreas), esto debe limitarse a terrenos. Esta opción puede responder a las necesidades requeridas de un mediano agricultor.

Una limitante al empleo de caballos de tiro pesado en laderas de mucha pendiente es el gran tamaño de sus cascos y el alto centro de gravedad (CG). La ladera empinada causa mucho estrés en las articulaciones y ligamentos de las extremidades de los animales debido a que sus cascos no hacen contacto completo con el suelo y con un centro de gravedad alto por su gran altura, deben equilibrar sus cuerpos para no perder el equilibrio mientras trabajan. Si comparamos estos antecedentes a los bovinos, equinos criollos y mulares, podemos notar que los tamaños de sus cascos son mucho más pequeños, los que se acomodan con mayor facilidad a las gradientes empinadas encontradas en laderas. El menor CG (más cerca al suelo) también ayuda a la estabilidad de los animales. Los animales herrados que trabajen en laderas deberán hacerlo con mucho cuidado, especialmente cuando el pasto o la grama están mojados, para evitar que éstos se resbalen. Por esta razón es importante seleccionar y reproducir animales con las cualidades que los hagan más aptos para el trabajo agrícola en montaña (altura), con características similares de recuperación cardíaca, respiratoria y fisiológicas (ej. peso, sexo, tamaño, edad). Un programa de reproducción caballar de tiro pesado y semipesado, que sirva el propósito de mejorar el capital

genético local de las yeguas criollas, sería muy necesario para fomentar el uso de la tracción animal con caballos de tiro.

El mantenimiento y la reparación de la maquinaria pueden ser relativamente fáciles y menos costosos, y pueden realizarse en talleres locales de herrería o de fabricación metalmecánica. La disponibilidad de los animales de tiro para transitar por los potreros y realizar trabajos a pocos días después de intensas lluvias ejemplifica su versatilidad. Es de anotar que las lluvias excesivas tienen mayor efecto en el desempeño adecuado de los equipos que son operados por los tractores agrícolas, pues su potencia se reduce significativamente por el patinamiento e incremento de la resistencia al rodamiento. De manera adicional causando impacto negativo en el suelo agrícola, al incrementarse los niveles de compactación, y también aumentando el desgaste de las llantas por la del deslizamiento de estas con el suelo, propiciando incremento del consumo de combustible. Esos efectos tan críticos no se presentan en la tracción animal, pues no hay patinamiento, aunque si hay efectos del avance de los animales cuando sus patas y las llantas del equipo se hunden excesivamente en el suelo (resistencia al rodamiento, aunque los equipos son relativamente livianos). La simplicidad de la maquinaria e implementos agrícolas facilitaría su fabricación y reparación en talleres locales, permitiendo una rápida disponibilidad de las herramientas para que los agricultores realicen sus trabajos oportunamente.

Los conductores (palafreneros) de los animales de tiro deben ser entrenados para que estos sean manejados correctamente y los equipos operados de manera segura, eficaz y eficiente. La conducción de los animales de tiro y la operación de las herramientas de labranza, requieren de destrezas que necesariamente deben aprenderse a través de una capacitación para aquellos interesados a incursionar en el arte de trabajar con tracción animal. El SIBIOTA puede funcionar como una plataforma didáctica para el desarrollo de capacidades y conocimientos actualizados en técnicas de labranza, seguridad industrial y la tecnología a tracción animal en general, por la simplicidad del sistema.

Un programa de reproducción equina (y mular) de tiro es fundamental para la “promoción/estimulo”, a nivel local y nacional de mecanización agrícola a tracción animal. Un contrato ministerial entre el Ministerio de Defensa y el Ministerio de Agricultura, tal como se hizo

en Chile, podría ayudar a la implementación del programa y promover el uso de caballos de tiro en las faenas agrícolas.

Un programa de transferencia de la tecnología de mecanización agrícola a tracción animal debería ser formulado bajo un concepto “participativo” e integral, de un sistema productivo diversificado basado en el uso de energía renovable y apoyo/sostenimiento técnico a nivel local. Un ejemplo para estudiar y adoptar en cierta manera sería el concepto Amish, de comunidades agrarias “tradicionales”. Las comunidades Amish, basan su estilo de vida en fuertes valores religiosos y comunitarios o asociativos, acompañados por importantes conceptos de la explotación agrícola diversificada, como el marco de sostenimiento económico de toda la comunidad. El modelo Amish de asociatividad e interdependencia fomenta la participación masiva de la comunidad entera, la práctica de una economía circular con la participación del núcleo familiar en todas las actividades de la finca y siendo la utilización de caballos de tiro como fuente de energía renovable y de bajo costo, alguna de sus importantes características.

El ejemplo para rescatar del concepto productivo agrícola Amish, es la capacidad del agricultor y su familia para vivir en relativa prosperidad. Fundamentalmente, el concepto Amish es un sistema agrícola autosuficiente, sustentable y muy productivo en comparación a la agricultura convencional a base del tractor como se ha mencionado en el párrafo 1.10.3.E. Los miembros de la comunidad Amish son reconocidos por ser excelentes agricultores, muy versátiles y conectados con el manejo del suelo para producir muy buenas cosechas. La combinación del uso de caballos de tiro, con mano de obra familiar y un conocimiento agrícola ejemplar reproducido por más de 300 años, les permite poseer la capacidad de prosperar con la práctica de una agricultura racional (sustentable).

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

6.1.1 General

La tracción animal con caballos de tiro es una tecnología en mecanización agrícola que merece ser considerada como una excelente opción de energía sustentable y útil para el desarrollo agrícola y rural. El uso de caballos de tiro podría mejorar varios rubros de la agricultura local (y regional) como el promover buenas prácticas de labranza y otros. En ese aspecto, el SIBIOTA representa un avance en mecanización agrícola tradicional, con la capacidad para potenciar lo agronómico, social, económico y tecnológico del sector rural, para lograr su desarrollo y eventual transformación en una agricultura sustentable moderna.

El impacto del sistema biomecánico de labranza agrícola a tracción animal (SIBIOTA) puede ser muy trascendental para la economía rural CundiBoyacense, ya que resuelve en gran medida las necesidades de una mayor eficiencia productiva, una reducción en la compactación, erosión de los suelos, fomento al empleo agrícola y reducción al uso de energía fósil.

El SIBIOTA, representa una innovación tecnológica en mecanización agrícola, nivel intermedio, la que se ajusta a la capacidad económica y los conocimientos técnicos de una gran mayoría de agricultores. Su reproducción local puede realizarse rescatando lo tradicional y fusionarlo con lo moderno para ofrecerle al sector agrícola una opción tecnológica apropiada a sus necesidades agrícolas y a costos razonables. La tecnología de la tracción animal con caballos de tiro es una excelente alternativa a la energía automotriz porque utiliza combustibles vegetales (pastos y granos) vs. combustibles fósiles, y permite un incremento de potencia/ha, mucho mayor que la mano de obra rural. Puede compatibilizar con el medio ambiente y ser reproducible con recursos localmente disponibles (ejemplos: yeguas criollas y talleres artesanales).

Resultados del análisis de rendimiento del SIBIOTA confirman que respondió en gran medida a los objetivos de la investigación, así mismo algunos de los resultados obtenidos deberían ser considerados como pautas para futuros estudios sobre el tema. Según la información recaudada, ésta señala la factibilidad de emplear exitosamente caballos de tiro pesado en la labranza agrícola en la región andina Cundi-Boyacense.

Los tres caballos utilizados en el estudio demostraron inequívocamente poseer la fuerza de tiro y la nobleza necesaria para trabajar con el cincel parabólico de manera eficiente, eficaz, en tiempo razonable y mostrando una fatiga normal. Durante el transcurso del trabajo, se observó una disminución paulatina e imperceptible de la fuerza de tiro conforme transcurrió la jornada y un aumento en la fatiga de los animales, que también puede tener una marcada diferencia en la generación de la fuerza de tiro cuando se trabaja en potreros largos versus cortos.

El carro de enganche probó ser una herramienta multifuncional y altamente eficiente, cómoda, bien balanceada y con buena visibilidad. El sistema hidráulico instalado fue de gran utilidad para manejar la profundidad del cincel parabólico y para operar con otros implementos, tales como: surcadora, sembradora, fumigadora, etc. El peso del carro de enganche con el cincel parabólico y el operador sumo un total de 7639,38 N (**779 kgf**), y el peso vivo de los dos animales se determinó en 12552,51 N (1280 kgf), una proporción FT/PV del 17% la que se interpreta como razonable, ya que el peso de la maquinaria fue sostenido por las ruedas de caucho. Según investigadores como Collins & Caine (1926) and Miller (2000), quienes recomiendan parámetros del 10% al 15% del peso vivo de los animales para operar entre 8 y 10 horas de trabajo, estos se refieren a una “carga en arrastre” (versus “sobre ruedas”).

El uso del cincel parabólico demostró ser menos dañino que un roto-cultor (rotovo) o un arado de disco. Los suelos se han descompactado, facilitando la conservación y la retención de aguas lluvias y aumentando la oxigenación del suelo debido al incremento en porosidad, fomentando un aumento substancial en el aforo de pasto.

El Sistema de Medición Electrónica en Tiempo Real (SMETR), funcionó adecuadamente en condiciones de campo. Los sensores utilizados produjeron lecturas en rangos confiables, sobre la

generación de fuerza de dos animales de tiro pesado. El paquete electrónico puede ser reproducido localmente y a bajo costo, para ser utilizado en estudios similares de tracción animal. El uso del sistema "POLAR" para monitorear el ritmo cardiaco de los animales fue muy útil porque permitió identificar parámetros físicos y fisiológicos de los animales, durante los trabajos de labranza, periodos de recuperación y descanso. Este accesorio puede ser muy útil para identificar/seleccionar reproductores con mayor capacidad (virtud) de tiro para los trabajos de labranza en la región altiplánica.

Las condiciones de suelos con alta compactación demandaron de mayor fuerza de tiro. Los animales se esforzaron al máximo y las herramientas tuvieron el peso necesario para mantenerse a la profundidad deseada evitando ser desviadas hacia la superficie debido a la dureza del suelo, como sucedió con el lote 4B, en Marengo, un suelo con muy baja humedad y un alto nivel de cementación.

La adopción de la tecnología a tracción animal necesitaría de una importante "redefinición" en las técnicas de producción de pequeñas y medianas explotaciones, diseñando sistemas productivos que se ajusten al uso de animales de tiro y herramientas tradicionales y nuevas de labranza, lo que permitiría una mayor eficiencia y eficacia en los sistemas productivos. Dada la necesidad "socioeconómica" de incorporar la mano de obra disponible del sector rural, a los actuales sistemas productivos, la tracción animal fomentaría oportunidades laborales especialmente para la familia del pequeño productor y cuando sea necesario, para los trabajadores rurales.

El omnipresente pasto Kikuyo, fue identificado como un factor exógeno muy relevante a los trabajos de labranza, ya que éste influyó en la condición física del suelo con relación al desempeño y rendimiento de los animales y las herramientas de labranza. El pasto Kikuyo afectó directamente el trabajo del SIBIOTA, independiente del grado de compactación, ya que acondicionó la resistencia del suelo al corte/roturación, en los primeros 10 cm de profundidad. La capa superficial del suelo se presentó muy dura a la penetración de las herramientas de sondeo y de labranza, debido a su complejo y grueso sistema radicular. Cuando el pasto Kikuyo se produce en suelos de carácter arcillosos la tarea de cortar o romper se hace más tediosa y demanda de más energía para realizarla. El cincel parabólico equipado con un disco de corte y un cilindro hidráulico para su

manejo facilitó la penetración de la herramienta y ayudó a que se mantuviese a la profundidad programada.

Los trabajos de rayado de pastizales en su mayoría se realizaron bajo condiciones de alta humedad. Interesantemente, el SIBIOTA no tuvo ninguna dificultad en realizar su trabajo y no dejó indicios en el suelo de rastros o marcas de llantas y/o cascos de caballos, como la haría el tractor con la asociada maquinaria en condiciones similares. Esto subraya la capacidad y la flexibilidad del SIBIOTA cuando opera en climas cambiantes.

Los caballos de tiro pueden jugar un rol “catalizador” muy importante en el desarrollo agrícola y económico de la región Cundi-Boyacense, estimulando la producción agrícola de manera sustentable, generando un impacto positivo en la agricultura y la economía familiar rural.

El impacto positivo de la tecnología a tracción animal podría extenderse a un amplio espectro del entorno rural e incluye lo agronómico, tecnológico, social, económico y cultural de manera convincente, y también incluye la práctica de una agricultura sustentable y autosuficiente. La fuerza laboral rural deberá ser entrenada para operar prototipos de mecanización como el SIBIOTA. Programas de entrenamiento fomentarían el uso de esta tecnología, y al mismo tiempo incentivarían la permanencia de los jóvenes en el campo y limitando el éxodo hacia los centros urbanos.

Las regiones andinas de Colombia, tales como: Cundinamarca, Boyacá, Antioquia y Nariño, en donde la labranza agrícola se realiza con mínima mecanización y es altamente dependiente del uso de la mano de obra, el mejoramiento de las actuales herramientas de tiro animal mejoraría las capacidades humanas para aumentar su eficiencia y su productividad. Los agricultores que posean recursos para la práctica de la tracción animal también podrían suplementar sus ingresos ofreciendo servicios de labranza con sus animales y herramientas adquiridos.

6.2 RECOMENDACIONES

1. Fomentar el trabajo coordinado de instituciones afines con el tema de la mecanización agrícola, en general (por ejemplo: UNAL; AGROSAVIA; MINAG, COLCIENCIAS, UMATAS, SECRETARIAS DE AGRICULTURA y otros.)
2. Formular una política de Estado para promover el uso de la tracción animal, como tecnología renovable de mecanización agrícola y fuente de energía limpia.
3. Establecer un “Centro de Excelencia para la Mecanización Agrícola Andina” para la investigación y desarrollo, donde se consideraría el uso mixto de mecanización motorizada y la tracción animal.
4. Establecer un Programa de Remonta Equina y Mular con reproductores y vientres importados, y vientres locales.
5. Articular el uso de caballos de tiro como una excelente opción energética, con programas, proyectos y afines para su desarrollo. (Ing. E. Cortes, UNAL -Medellin).
6. Incorporar el tema de la tecnología a tracción animal en programas educacionales, a todos los niveles.
7. Hacer del uso de la tracción animal parte de la estrategia de un plan de desarrollo agrícola integral a nivel departamental y nacional.
8. Vincular la tracción animal con programas de fuentes de energías alternativas para disminuir el uso de combustibles fósiles.
9. Orientar las labores de labranza para que comiencen con el periodo anterior a la época de lluvias (ej. después de las cosechas) para disponer el tiempo necesario para completarlas.

- 10.** Vincular el programa de mecanización agrícola con caballos de tiro a un programa de labranza de conservación para optimizar el almacenaje de humedad y nutrientes en el suelo. Lafond et al. (1994) citado por Uribe y Rouanet (2002).
- 11.** Promover la tracción animal como una tecnología apropiada de mecanización para el cultivo de forrajes, papa y hortalizas en laderas.
- 12.** Promover el uso de la tracción animal como complemento a la mano de obra rural disponible.
- 13.** Fomentar la capacidad y capacitación semi-industrial y artesanal para la fabricación de máquinas e implementos a tracción animal.
- 14.** Promover la asociatividad entre agricultores.
- 15.** Crear programas de educación y entrenamiento en mecanización agrícola a tracción animal.
- 16.** Conducir estudios adicionales para resolver inquietudes generadas por el presente estudio.
- 17.** Aprovechar mejor el Sistema Nacional de Innovación (Ley 1876 de 2017), para formular proyectos o integrarse a planes estatales.
- 18.** Aprovechar los incentivos fiscales del estatuto tributario.

A. Anexo: Rendimientos Promedio (Horas) para Completar 1 Hectárea con Variadas Labores Agrícolas.

La comparación de las horas requeridas para completar las labores agrícolas en una fanegada, entre dos caballos de labor (tiro pesado) y un tractor de 45HP, se dan a conocer en la tabla siguiente (**Tabla A**). El tiempo requerido para completar dichas labores agrícolas utilizando animales más pequeños (tiro ligero/400 kg), sería sustancial.

Tabla A: Tiempo (h) Estimado para Completar una Hectárea.

FAENA	2 CABALLOS (800 kgs)	TRACTOR (45 HP)	COMENTARIOS
1. CINCELAR	4 horas	2-3	
2. SURCAR (PAPA)	4	2	
3. APORCAR (PAPA)	3	2	
4. SEMBRAR PASTO	2	1	Sembradora manual
5. ABONAR PASTO	1-2	1	Caladora/abonadora
6. FUMIGAR PAPA	1-3	1	
7. FUMIGAR PASTO	1-2	1	Fumigadora motorizada
8. COSECHAR PAPA	5	3	Arrancadora mecánica
9. CORTAR PASTO	2	1	Segadora mecánica
10. HILERAR PASTO	2	1	Hileradora, 2 m (ancho)

Fuente: Autor (2019)

B. Anexo: Formulario Registro Manual de Datos

<u>Finca:</u>	<u>Altitud (msnm):</u>	<u>Pendiente (%):</u>
<u>Temperatura ambiental:</u>	<u>Radiación solar:</u>	<u>Tiempo:</u>
<u>Tipo/tamaño de caballos:</u>	<u>Numero de caballos:</u>	<u>Peso:</u>
	<u>Distancia</u> <u>punto</u> <u>de</u>	
<u>Angulo de tiro:</u>	<u>tiro/implemento:</u>	
<u>Pulsaciones (trabajo/descanso):</u>	<u>Ritmo cardiaco:</u>	<u>Recuperación (min):</u>
<u>Tipo Labranza:</u>	<u>Calidad de trabajo:</u>	
<u>Herramienta:</u>	<u>Profundidad de trabajo:</u>	<u>Velocidad (km/hr):</u>
<u>Fuerza de tiro (kgf):</u>	<u>Potencia (w):</u>	<u>Ancho de trabajo:</u>
<u>Tiempo para completar 1 ha:</u>	<u>Velocidad de trabajo:</u>	<u>Pulsaciones x min.:</u>
		<u>Resistencia al corte</u>
<u>Tipo de Suelo:</u>	<u>% de humedad del suelo:</u>	<u>(Veleta):</u>
<u>Textura</u>		
<u>(ligera/mediana/pesada):</u>		<u>Observaciones:</u>
Fuente: Autor (2018)		

C. Anexo: Costos Iniciales Asociados al Uso de Caballos de Tiro

Se han elaborado varias opciones de paquetes a tracción animal y cuyas diferencias se relacionan más con el tamaño de los caballos de tiro que la maquinaria agrícola. Las siguientes son las opciones:

Costos de inversión inicial (Aproximado).

a. OPCION 1: Caballos de Tiro de Raza (Pesados/800 kgs).

2 Caballos de raza (hembras)	30.000.000
2 Aperos, importados, tipo Amish (completos)	5.500.000
1 Carro de enganche c/sistema hidráulico	16.000.000
2 Juegos de balancines (paloniles)	450.000
1 Arado reversible de vertedera (12")	15.000.000
1 Rastrillo pulidor de cinceles tipo "S"	7.000.000
1 Sembradora de maíz, 2 surcos	15.600.000
1 Fertilizadora/sembradora/caladora VICON	8.500.000
1 Cortadora de pasto, 1.5m, p/2 caballos (importada)	28.640.000
1 Rastrillo hilerador de pasto	19.500.000
1 Cultivadora de una hilera p/un caballo (x5)	1.800.000
1 Arado arrancador de papas (10")	1.600.000
1 Fumigadora (kit), 300 litros, 7m cobertura	9.500.000
1 Carreta/zorra (remolque) de 1.500 kgs	<u>3.500.000</u>

Inversión Total: \$162.590.000

b. OPCION 2: Caballos de Tiro de Raza (semi-pesados/600 kgs).

2 Caballos semi-pesados de raza (hembras)	16.000.000
2 Aperos, importados, tipo Amish (completos)	5.500.000
1 Carro de enganche c/sistema hidráulico	16.000.000
2 Juegos de balancines (paloniles)	450.000
1 Arado reversible de vertedera, (12")	15.000.000
1 Rastrillo pulidor de cinceles tipo "S"	7.000.000
1 Sembradora de maíz, 2 surcos	15.600.000
1 Fertilizadora/sembradora/caladora VICON	8.500.000
1 Cortadora de pasto p/2 caballos (importada)	28.640.000
1 Rastrillo hilerador de pasto	19.500.000
1 Cultivadora de una hilera p/1 caballo (X5)	1.800.000
1 Arado arrancador de papas (10")	1.600.000
1 Fumigadora (kit), 300 litros, 7m cobertura	9.500.000
1 Carreta/zorra/enganche (remolque) de 1.500 kgs	<u>3.500.000</u>

Inversión Total: \$148.590.000

c. OPCION 3: Caballos de Tiro de Media Sangre (Tiro liviano/400 kgs).

2 Caballos (hembras) media sangre	\$10.000.000
2 Aperos (híbridos) de caucho (modificados)	3.600.000
1 Carro de enganche/ "zorra"	5.000.000
2 Juegos de balancines (paloniles)	450.000
1 Arado reversible de vertedera, (8")	15.000.000
1 Rastra de discos "off-set"	14.000.000
1 Sembradora de maíz, 2 surcos	15.600.000
1 Fertilizadora/sembradora/caladora VICON	8.500.000
1 Cortadora de pasto, 1.5m, p/2 caballos (importada)	28.640.000
1 Rastrillo hilerador de pasto	19.500.000
1 Cultivadora de una hilera p/un caballo (X3)	1.600.000
1 Arado arrancador de papas (7")	1.200.000
1 Fumigadora (kit), 200 litros, 5m cobertura	8.500.000
1 Carreta/zorra/enganche (remolque) de 1.500 kgs	<u>3.500.000</u>

Inversión Total: \$135.290.000

d. Tractor (Opción 1)

1 Tractor agrícola de 45 HP (Kubota)	\$56.700.000
1 Arado de cincel (vibratorio, 2 cinceles)	5.300.000
1 Rastra pulidora de 13 cinceles	7.000.000
1 Sembradora de maíz, 2 hileras	15.600.000
1 Fertilizadora/sembradora/caladora VICON	8.500.000
1 Encaladora, 750 kgs	7.600.000
1 Cortadora de pasto, Khun, 2.0 mts de ancho	23.000.000
1 Rastrillo hilerador de pasto, 3.4 mts.	19.500.000
1 Cultivadora, 2 surcos	9.000.000
1 Fumigadora, 400 litros, 10 mts cobertura	12.000.000
1 Surcadora/arrancadora de papas (enganche 3 puntos)	3.000.000
1 Tráiler (Remolque) de 2.000 kgs	<u>7.100.000</u>

Inversión Total: \$174.300.000

e. Tractor (Opción 2)

1 Tractor Agrícola de 23 HP (Kubota B2320)	\$ 39.200.000
1 Arado de Cincel Vibratorio, Acvtl-2	\$ 4.200.000
1 Rastra pulidora Hidráulica Disco Dentado 20*	\$ 8.300.000
1 Fertilizadora/sembradora/caladora VICON	\$ 8.500.000
1 Fumigadora Ko 200	\$ 12.600.000
1 Cultivadora, 2 surcos	\$ 9.000.000
1 Cortadora de pasto, Khun, 2.0 mts de ancho	\$ 23.000.000
1 Encaladora, 750 kgs	\$ 7.600.000
1 Rastrillo hilerador de pasto, 3.4 mts.	\$ 19.500.000
1 Surcadora Sci-2 Cat 1	\$ 2.900.000
1 Remolque Basculante	<u>\$ 7.100.000</u>

Subtotal \$ 127.019.500

Nota: Estudio no científico e informal realizado por Hugo Sanhueza Leal el año 2013 con actualizaciones en abril de 2018 y noviembre de 2019.

*El costo del transporte para la entrega de animales y maquinaria, no está incluido.

**El costo de compra de una máquina enfardadora para hacer pacas de 60kgs es de aprox. \$34M y se necesitaría agregar el costo aproximado de \$15M para la modificación de un carro de enganche para “motorizarlo” con un motor diésel de 35 HP.

***Costos de interés de créditos para la adquisición de cada paquete tecnológico no se incluyen.

Notas: La idea fundamental que se debería rescatar de este estudio es que cuando se desee adoptar/adquirir una tecnología agrícola, éstas deberían ser investigadas y analizadas entre todas aquellas opciones disponibles en el mercado, para poder tomar una decisión informada y “razonable” en términos de lo que es estrictamente necesario, apropiado y económicamente factible con relación al sistema productivo que se desea mecanizar. Tanto la tecnología de los caballos de tiro como la del tractor ofrecen similar calidad de trabajo a diferentes costos. Igualmente, no importa el tipo de tecnología que se emplee, siempre y cuando ésta sea de utilidad y sirva como una eficaz herramienta de trabajo para el pequeño y mediano agricultor.

Fuente: Autor (2019)

D. ANEXO: COSTOS APROXIMADOS DE INVERSION, OPERATIVOS Y MANTENIMIENTO PARA USO DE CABALLOS DE TIRO EN 3 SISTEMAS PRODUCTIVOS

A. INVERSION INICIAL (ACTIVOS Y PASIVOS):

1. Leche:

a. Caballos semi pesados(x2)	18.00M
b. Arneses "criollos"	3.60M
c. Plataforma (SIMATA o CPH)	20.00/4.5M
d. Cincel parabólico TEBBEN	5.50/4.0M
e. Juego de balancines (paloniles) doble	0.35M
f. 2 balancines/paloniles sencillos	0.15M
g. Fumigadora 340 litros	10.50M
h. Carreta/zorra	4.50M

Total: 46.1M

2. Papa:

i. Caballos semi pesados (x2)	18.0M
j. Arneses	3.6M
k. Plataforma: SIMATA/CPH	20.0/4.5M
l. Arado reversible 10"	21.00M
m. Surcadora	0.35M
n. Fumigadora 340 litros	10.50M
o. Juego de balancines (paloniles) dobles	0.35M
p. 2 balancines (paloniles) sencillos	0.15M
q. Par de discos cóncavos para tapar	0.30M
r. Arrancadora de papa	0.35M
s. Carreta/zorra	<u>4.50M</u>

Total: 62.60M

3. Hortalizas:

a. Caballos semi pesados (x2)	18.00M
b. Arneses	3.60M
c. Plataforma: SIMATA/CPH	20.00/4.5M
d. Arado reversible 10"	21.00M
e. Fumigadora 340 litros	10.50M
f. Juego de balancines (paloniles) dobles	0.35M
g. 2 balancines (paloniles) sencillos	0.15M
h. Forma-cama/aporcador (discos cóncavos)	0.30M
i. Carreta/zorra	<u>4.50M</u>
	Total: 60.90M

Nota: El precio del SIMATA es de 20M versus 4.5M (Carro portaherramientas)

B. OPERACIONAL (ANUAL)

1. Sueldo (1 operario)	14.40M/año
2. Alimentación de Equinos (0.180/equino/mes) (concentrado, sales minerales, suplementos, etc.)	2.16M/año/equinos
3. Sanidad/salud	
a. Vacunas (0.05M/animal/año)	0.10M/año
b. Desinfecciones	0.20M/año
c. Botiquín	0.30M/año
4. Herraaje:	
a. Aplomar - cada 1-2 meses (0.06/equino)	0.56M/año/2 equinos
b. Herrar – cada 3 meses (0.12/equino)	<u>0.56M/año/2 equinos</u>
	Total:19.0M

C. MANTENIMIENTO.

a. Instalaciones.	0.10/año
b. Maquinaria.	0.20/año
c. Herramientas.	0.10/año
d. Lubricantes.	0.05/año
e. Arneses. (cocer, aceitar, etc.)	0.10/año

f. Comederos.	0.05/anual
g. Bebederos.	<u>0.05/anual</u>

Total: 0.65M

D. OTROS.

a. Entrenamiento y educación (personal y animal). 4.00M	
b. Crédito – interés.	XXX
c. Visita Veterinario (4 visitas por año)	0.80M/año
d. Depreciación de la maquinaria agrícola	<u>XXX</u>

Total:

Fuente: Autor (2018)

E. ANEXO: Requerimientos (Ha) de Caballos de Tiro en Fincas “Amish”

Requerimientos (Ha) de Caballos de Tiro en Fincas “Amish” del Condado de Geauga, Ohio (EE.UU.).				
Trabajo de Campo	#Caballos	Promedio Ha/Día	Promedio Caballo/Ha/Horas	Operador Ha/Hora
Arar	5	3	10	2
Discar	5	9.5	3.1	0.6
Rastra de clavos	5	9.5	3.1	0.6
Sembrar Maíz	2	9	1.3	0.7
Sembrar granos	2	11	1.1	0.6
Fertilizar	2	30	0.40	0.2
Fumigar	2	45	0.26	0.1
Cultivar	3	9	2	0.7
Recolectar Mazorcas de Maíz	2	0.50	24	12
Segar Maíz para Ensilaje	3	2	9	3
Transportar Ensilaje de Maíz	5 (2 colleras/enganches)	2	15	12*

Segar Granos Pequeños	3	7	2.6	0.9
Transportar Granos Pequeños	6 (3 colleras x enganches)	6	6	6*
Cortar Pasto para Heno	2	9	1.3	0.7
Venta Heno	2	15	0.8	0.4
Rastrillar Heno	2	15	0.8	0.4
Hacer Pacas de Heno	3	14	1.3	0.4
Transportar Heno	2	12	1	1*
Transportar Abono	2	1	2 h/diarias	1 h/dia
Cortar y Transportar Leña	2	3	2 h/cuerda (3,6 m3)	2 h/cuerda
* 2 personas/equipo/enganche				

Fuente: (James, 2003) "Horse and Human Labor Estimates for Amish Farms." Ohio State University Extension. Burton, Ohio.

F. ANEXO: Requerimientos de Tiempo para Varias Actividades Agrícolas Utilizando Caballos de Tiro.

A continuación, se presenta un resumen de la información tabulada en tres sistemas productivos (fincas) en los Estados Unidos, en las que se utilizan principalmente caballos de tiro. Después de un año de observaciones realizadas para contabilizar el uso de caballos de tiro en la producción diversificada de hortalizas, lechería y forestal, se llegó a las siguientes conclusiones:

a) Las horas individuales de uso de cada animal fueron registradas para subrayar el total de horas de uso de energía (fuerza) animal. “Por ejemplo, tres horas de arado con dos caballos fue tabulado como, seis horas de labranza primaria mientras que una hora con rastra de disco usando tres caballos fue registrada como tres horas/caballo de labranza secundaria”.

b) A diferencia de las horas de mano de obra, el tiempo utilizado para aperar/des-aperar a los animales no fue incluido en el total de las horas de uso de los caballos de tiro. A este tiempo le llamamos “tiempo administrativo”.

c) El llamado “tiempo no productivo” (ejemplo: el tiempo de traslado a los potreros o cuando los animales descansan durante entre cada carga y desparrame de abono o cuando están cargando y transportando pasto cortado) fue asignado a la mano de obra y los caballos, individualmente.

FINCAS	Cedar Mountain	Maple Hill	Beech Grove	Promedio (min)
Desparramar Estiércol	73.5	69	39.75	61
Labranza Primaria	40	57	148.5	82
Labranza Secundaria	66.25	84	109.75	87
Cultivar	14.5	19.25	48.5	27
Sembrar	0	12.5	73.5	29

Guadañar e Hilarar	15	73.5	56	48
Misceláneos	0	19.5	112	44
Total (horas)	209.25	334.75	588	

Nota: Se debe mencionar que existe la posibilidad de que el uso de los equinos de tiro se limite a las tres temporadas de primavera, verano y otoño. La temporada de invierno se dedica a la cosecha de madera de los bosques, mantener/ reparar la maquinaria y permitir que los animales se recuperen, etc.

G. ANEXO: Velocidades Típicas Recomendadas (Aproximadas) Para Operar Implementos De Labranza Con Caballos De Tiro.

<u>Implemento de labranza</u>	<u>Velocidad (promedia) de campo (km/hr)</u>
	<u>2 caballos (2500 a 3300 msnm)</u>
Arado de vertedera:	3 a 5
Arado de cincel:	3 a 5
Cincel parabólico:	3 a 5
Rastra de discos en Tándem:	3 a 5
Rastra de dientes flexibles:	3 a 5
Cultivadora:	3 a 5
Cosechadora de papa:	3 a 5
Carreta con pasto de corte:	4 a 5
Rotovo:	4 a 5
Fumigadora:	4 a 5
Guadaña Motorizada:	4 a 5

Fuente: Modificado de Miller, (2002) (Workhorse Handbook, 2nd Edition); Sanhueza, Criadero Los Brabantes, (2018).

H. ANEXO: Pesajes de Animales, Maquinaria e Implementos

Resultados de los pesajes se presentan a continuación:

1. Peso vivo de los animales:

- a. Tabby = **790 kg**
- b. Marqués = **638 kg**
- c. Oscar = **634 kg**

2. Tamaños de los cañones y corvejones:

- a. Tabby: 35 cm (14.5") / 58 cm (23")
- b. Marqués: 34 cm (13.5") / 56 cm (22")
- c. Oscar: 26 cm (10.0") / 52 cm (20.5")

3. Tamaños de las herraduras:

- a. Tabby: **#8** (europeo) o **#45** (Nacional)
- b. Marqués: **#7** (europeo) o **#41** (Nacional)
- c. Oscar: **#7** (europeo) o **#41** (Nacional)

4. Pesaje de la maquinaria e implementos:

- a. Carro de enganche con cincel, batería y sistema hidráulico = **716 kg**
- b. Kit- fumigadora (portátil) = **101 kg**
- c. Operador = **63 kg**
- d. Arneses/aperos = **25.5kg**
- e. Cincel parabólico = **130 kg**

I. Anexo: Varios Cálculos

1. Fuerza de tiro. Para calcular la fuerza generada por dos caballos de tiro pesado operando con el carro SIMATA 7639,38 N (779 kgf) y un cincel parabólico, en un suelo-medio, se utiliza la siguiente fórmula:

$$A. \text{ Fuerza Neta} = \text{Fuerza Máxima (Medida)} \times 9.8 \frac{N}{kgf} = N$$

$$= 255 \text{ kgf} \times 9.8 \text{ N} = 2500 \text{ N}$$

$$B. \text{ Fuerza Horizontal} = \text{Fuerza Neta} \times \cos(\alpha)$$

$$= 2500 \text{ N} \times \cos(16.46^\circ) = 2397.5444 \text{ N}$$

Nota: La fuerza máxima, fue medida con la celda de carga; $9.8 \frac{M}{s^2}$ es una constante para resolver N; 1 Newton = 1kg/m/s².; 1 kg Newton = 1.000 Newtons.; α : ángulo de tiro.

2. Capacidad de trabajo. Para calcular la capacidad de trabajo de los animales, se multiplica la fuerza aplicada por la distancia recorrida y su resultado se expresa en unidades internacionales Newton (N) metro. (Walters, 2016)

$$\text{Trabajo (N)} = \text{fuerza de tiro} \times \text{distancia}$$

Ejemplo: Un par de caballos de tiro aplican 2,5 kN de fuerza para jalar un peso o carga, para caminar una franja de 120 metros de largo.

$$T = 2,5 \text{ kN} \times 120 \text{ m} = 300 \text{ Nm} (0.030 \text{ HP})$$

3. Potencia de tiro. Para calcular la potencia del(os) animal(es), se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Potencia neta}[W] = \text{Fuerza de tiro}[N] * \text{velocidad} [m/s]$$

Para obtener la potencia de tiro “efectiva”, se agrega el coseno del ángulo de tiro (α):

$$Potencia\ de\ tiro[W] = Fuerza[N] * velocidad\left[\frac{m}{s}\right] * \cos 14.74$$

Ejemplo:

$$Pt (W) = 2390 N \times \cos(16.46^\circ) \times 1.38 \frac{m}{s} = 2204.627718 W$$

Conversión de Pt (W) a HP:

$$= 2204.627718 W \times \frac{1hp}{745.7} = 2.95 HP$$

$P =$ Potencia de tiro animal (W)

$F =$ Fuerza de tiro animal (N)

$\vartheta =$ Velocidad (m/s)

$\alpha:$ ángulo de tiro.

1 caballo de fuerza (HP) = 745.7 Watts

Collins and Caine (1926)

4. Velocidad de trabajo. Para calcular la velocidad de trabajo se utiliza la siguiente formula:

Ejercicio:

$$1.4285 \frac{m}{s} = \frac{50m}{35s} \times \frac{60s}{1m} \times \frac{60m}{1hr} \times \frac{1km}{1000m} = \frac{50}{35} \times \frac{3600}{1000} = \frac{180,000}{35000} = 5.14km/hr$$

5. Convertir: km/h a m/s.

$$5 \frac{km}{hr} \times \frac{1000m}{1km} \times \frac{1hr}{3600s} = 22.222 \frac{m}{s}$$

$$\frac{5 \times 1000m}{3600} = 1.38 \frac{m}{s}$$

1 km = 1000 metros

1 hr = 3600 segundos

J. ANEXO: Prueba con Veleta de Cizalla (250 kPa)

1. FINCA: LA REPRESA - Zipaquira

0 cm: 7.5; 5.3; 3.3; 4.1; 5.9; 5.6; 4.4; 4.2; 2.8; 3.6; 5.5; 6.6 = 5.9

5 cm: 6.4; 5.4; 5.4; 3.6; 6.4; 5.0; 5.5; 4.6; 3.8; 4.3; 4.9; 4.4 = 6.0

10 cm: 5.5; 5.6; 4.8; 6.0; 7.3; 5.9; 4.8; 5.5; 4.3; 3.8; 4.0; 5.2 = 6.3

15 cm: 7.4; 6.0; 5.2; 12.0; 12.0; 6.0; 6.6; 3.8; 6.5; 4.0; 5.9; 4.7 = 8.0

20 cm:

Promedio: 6.5 = 130.0 kPa

2. Finca: MAGUARE - Sopo

0 cm: 7.6; 6.6; 5.2; 4.0; 6.6; 6.1; 7.6; 7.6; 8.2; 8.0 = 6.8

5 cm: 10.0; 11.4; 9.7; 8.6; 5.3; 6.1; 7.8; 10.6; 7.7; 9.3 = 8.7

10 cm: 11.0; 12.0; 11.6; 12.0; 12.0; 7.2; 9.7; 11.2; 10.8; 11.5 = 10.9

15 cm: 11.6; 12.0; 11.4; 12.0; 12.0; 12.0; 10.4; 12.0; 11.2; 10.2 = 11.5

20 cm: XX

Promedio: 9.4

3. FINCA: GARDA.

0 cm:

5 cm: 3.1; 3.4; 5.0; 3.7; 6.2; 4.8; 4.0; 3.1; 7.8; 3.8 = 4.5

10 cm: 3.5; 4.2; 6.2; 4.0; 6.0; 5.5; 6.2; 5.0; 7.0; 7.2 = 5.5

15 cm: 3.2; 5.4; 6.8; 5.5; 4.9; 6.6; 5.5; 5.6; 6.6; 5.4 = 5.6

20 cm: 6.0; 5.7; 8.0; 6.0; 4.8; 6.4; 4.4; 5.4; 8.5; 4.6 = 6.0

Promedio: 5.37 = 108,0 kPa

4. FINCA: Doña Luna

0: CXL

5 cm: 6.8; 9.6; 8.2; 10.0; 8.0 = 8.5

10 cm: 10.6; 12.0; 12.0; 12.0; 10.2 = 11.4

15 cm: 12.0; 12.0; 13.0; 11.6; 13.8 = 12.5

20 cm:

Promedio: 10.78 = 219,4 kPa

5. ESTACION EXPERIMENTAL MARENGO (UNAL)

Sector A:

0 cm: 2.0; 4.0; 5.5; 12.0; 6.0 (+2 vueltas) = 5.9

5 cm: 10.0; 10.2; 5.0; 12.0; 10.0 (+2 vueltas) = 9.4

10 cm: 10.0; 12.0; 12.0; S/R; S/R (muy duro) = 11.3

Sector B:

15 cm: 12.0 (+2); 12.0 (+1); 12.0 (+4); S/R; S/R (muy duro) = 12.0

20 cm: 8.5; 12.0 (+3); 12.0 (+3); S/R; S/R = 10.8 kPa

Promedios: A: 8.8 = 176.0 kPa

B: 11.4 = 228.0 kPa

K. ANEXO: Análisis de Humedad

Para la prueba de "secado al horno" se utilizó la siguiente fórmula:

$$(Mh-Ms)/(Ms-Mr) \times 100 =$$

Nota: (Mh= muestra húmeda; Ms= muestra seca; Mr= recipiente vacío)

1. FINCA LA REPRESA:

#1. Mh:

#2. Mh:

#3. Mh:

#4. Mh:

#5. Mh:

#6. Mh:

#7. Mh:

PROMEDIO: 89%

2. GARDA-2:

#1. Mh: 121.93g; Ms: 77.57g; Mr: 2.59g = 59.16%

#2. Mh: 94.46g; Ms: 60.49g; Mr: 2.57g = 58.65%

#3. Mh: 98.13g; Ms: 62.47g; Mr: 2.60g = 59.56%

#4. Mh: 102.44g; Ms: 65.46g; Mr: 2.61g = 58.83%

#5. Mh: 102.92g; Ms: 62.50g; Mr: 2.60g = 67.48%

#6. Mh: 102.15g; Ms: 62.37g; Mr: 2.56g = 66.51%

#7. Mh: 101.69g; Ms: 62.22g; Mr: 2.57g = 66.17%

#8. Mh: 101.91g; Ms: 62.18g; Mr: 2.57g = 66.65%

#9. Mh: 135.74g; Ms: 71.62g; Mr: 2.59g = 92.88% (saturación muy alta debido a concentración de aguas-lluvias en el terreno bajo)

#10. Mh: 118.50g; Ms: 63.26g; Mr: 2.60g = 91.06% (saturación muy alta debido a concentración de aguas-lluvias en terreno bajo)

PROMEDIO: 63% (no se incluyeron los valores de las muestras #9 y #10).

3. FINCA DOÑA LUNA (GUASCA):

#1. Mh:144.0g; Ms: 106.0g; Mr: 3.0g = 36.90%

#2. Mh:134.0g; Ms: 102.0g; Mr: 3.0g = 32.32%

#3. Mh:120.0g; Ms: 84.0g; Mr: 3.0g = 44.44%

#4. Mh:135.0g; Ms: 101.0g; Mr: 3.0g = 34.69%

#5. Mh:149.0g; Ms: 115.0g; Mr: 3.0g = 30.35%

PROMEDIO: 35.74%

4. ESTACION EXPERIMENTAL MARENGO (MOSQUERA):

#1. Mh: 113.51g; Ms: 78.71g; Mr: 5.54g = 47.56%

#2. Mh: 96.81g; Ms: 67.29g; Mr: 5.36g = 47.66%

#3. Mh: 76.72g; Ms: 54.19g; Mr: 4.77g = 45.58%

#4. Mh: 68.76g; Ms: 55.28g; Mr: 4.74g = 26.67%

#5. Mh: 70.41g; Ms: 56.19g; Mr: 5.48g = 28.04%

PROMEDIOS: Sector A: 47%; Sector B: 27%

L. ANEXO: Cálculo para el Consumo de ACPM/Hora de Tractor de 50 HP

Para planificar el consumo por hora y el costo por galón de ACPM, asociado con el funcionamiento normal de un tractor (independiente del tipo de implemento a utilizarse) se recomienda seguir el siguiente ejemplo y fórmula:

Ejemplo: Consumo de ACPM (diésel)/hora de un tractor de 50 caballos de fuerza (HP):

- a. $0.044 \text{ (ACPM)} \times 50 \text{ (HP)} = 2.2 \text{ galones/hora}$
- b. *Precio comercial del ACPM (diésel) = \$9.000/galón. (pesos colombianos)*
- c. *Precio ACPM por hora:*
 $\$9.000 \text{ galón (ACPM)} \times 2.2 \text{ gal} = \underline{\$19.800/\text{hora.}}$

El resultado del ejercicio de cálculo indica que agricultor o proveedor de servicios de mecanización, incurriría un gasto aproximado de \$19.800 (pesos colombianos) en ACPM (diésel) por hora trabajada.

**Fuentes: Hanna (2005) Iowa State University, University Extension PM 741 y Lazarus W. (2015), University of Minnesota, Extension.*

Nota: En la región Cundi-Boyacense el costo promedio de arriendo de un tractor de 70 a 80 HP es de aprox. \$50.000/hora.

Este ejercicio sugiere que por cada hectárea trabajada con un cincel (4 horas) con caballos de tiro, se podrían ahorrar aproximadamente 2.2 galones (8.3 litros) de combustible (ACPM)/hora, a un costo total de \$19.800 pesos. El uso de animales de tiro en general, permite una autosuficiencia en combustibles cuyo rédito podría reinvertirse para un mejor posicionamiento económico de los agricultores durante el inicio de cada temporada agrícola, permitiéndole disponibilidad de dinero (liquidez) para la compra de semillas de calidad, fertilizantes, herramientas agrícolas, etc.

M. ANEXO: Mediciones de Capacidad de Tiro.

La capacidad de fuerza de tiro es en función del peso vivo de los animales. Para determinar la demanda promedio de tiro del(os) animal(es) para jalar/transportar una carga X se debe conocer la siguiente información: fuerza de tiro (medida o aproximada) y el peso vivo total de los animales (si son mas de uno).

Utilizaremos la columna fuerza de tiro de la Tabla 5-6, y el peso total de 1280 kg de dos caballos de tiro de 640 kg cada uno.

Tabla 5-6. Mediciones de Potencia (promedio) para un Cincel Parabólico con 2 Caballos de Tiro de 640 kg cada uno.

U.E.	Textura del suelo	Resistencia al corte (kPa)	Humedad (%)	Profundidad (m)	Ritmo Cardíaco	Velocidad (km/h)	Fuerza de Tiro (N/kgf)	Potencia (W)	Equiv. (HP)	Altitude (msnm)	Temp (°C)
1.	franco limoso	130,0	89	0,15	127	4,5	1781,3/181,6	1654,7	2,2	3400	8 - 11
2	franco-limoso	108,0	50	0,15	149	5,4	2260,1/230,5	2519,4	3,4	2870	12 - 15
3	franco-limoso	219,4	36	0,15	145	4,3	2722,6/277,6	2407,7	3,2	2850	10 - 12
4A	franco-arcilloso	176,0	47	0,15	139	4,8	1639,9/167,2	1620,8	2,2	2560	15 - 17
4B	franco-arcilloso	228,0	27	0,06 a 0,08	129	4,7	2086,9/212,8	2016,1	2,7	2560	14 - 16

1. Para calcular la demanda/capacidad promedio de fuerza de tiro, se utilizó la siguiente fórmula:

- Sumar columna fuerza de tiro y dividir por 5: **214 (kgf)**
- Identificar peso vivo total de los dos animales: **1280 kg**
- Fuerza de tiro: $214 / 1280 = 0.167$ (**17%**)

2. Resultados de la demanda/capacidad (medida) de fuerza de tiro por U.E.:

$$\text{UE. \#1: } 181,6/1280 = 14\%$$

$$\text{UE. \#2: } 230,5/1280 = 18\%$$

$$\text{UE. \#3: } 277,6/1280 = 22\%$$

UE. #4A: $167,2/1280 = 13\%$

UE. #4B: $212,8/1280 = 17\%$

3. Demanda/capacidad (medida) de fuerza de tiro (promedio) en los suelos franco-limosos: 18%

4. Demanda/capacidad (medida) de fuerza de tiro (promedio) en los suelos franco-arcillosos: 15%

Nota: Literatura relacionada con el tema señala recomendaciones de investigadores, como Collins & Caine (1926) y Miller (2000), sobre un porcentaje estándar de peso a arrastrar que oscila entre el 10 al 15%, en relación con el peso vivo de los animales.

N. Anexo: Costos Aproximados Para Cincelar 1 Hectárea Con Tractor Vs 2 Caballos De Tiro

1. Tractor de 108 hp con arado cincel 3 puntos:

a. Profundidad de la labranza:

- 15 cm en suelo duro
- 60 cm en suelo blando

- B. Costo de combustible (utilizado) por hora: \$12.000 a \$14.000/h
- Costo del servicio: \$45.000/h

- C. Rendimiento: 4 horas en suelo blando y 6 horas en suelo duro.

2. SIBIOTA con un cincel parabólico:

- A. Profundidad de la labranza:

- 15 cm

- B. Costo del alimento/3 comidas diarias:

- pasto cortado: \$1.500
- Heno: \$3.000
- Concentrado (4 kg): \$5.150
- Suplementos: \$2.000
- TOTAL: \$11.650/diario

- C. Costo del servicio: \$70.000/ha

- D. Rendimiento: 1 ha/día

O. ANEXO: PAQUETE TECNOLÓGICO BÁSICO DE \$43.3M A 59.3M.

• 2 CABALLOS (1/2 a 3/4 SANGRE):	\$12.000.000 (\$15.000.000)
• 2 APEROS/ARNESES, IMPORTADOS:	\$ 8.000.000
• 1 CARRETA MÚLTIPLE PROPOSITO	\$ 6.000.000
• 1 CARRO PORTAHERRAMIENTAS/(SIBIOTA):	\$ 5.000.000 (\$21.000.000)
• 1 CINCEL	\$ 1.800.000
• 1 RASTRA DE PUAS:	\$ 3.000.000
• 1 KIT FUMIGADORA, PORTATIL:	\$ 3.000.000
• 1 CALADORA:	<u>\$ 4.500.000</u>
TOTAL	\$ 43.300.000/\$59.300.000

BIBLIOGRAFÍA

- Abi-Saab Arrieche, R. (2012). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO, EN EL SISTEMA PRODUCTIVO ORGÁNICO LA ESTANCIA, MADRID, CUNDINAMARCA, 2012. Utilizando indicadores de Calidad de Suelos.*
- Acevedo, E., Carrasco, M. A., Leon, O., Martinez, E., Silva, P., Castillo, G., Ahumada, I., Borie, G., & Gonzales, S. (2005). "Criterios de calidad de suelo agrícola." *SAG - Ministerio de Agricultura de Chile*, Article (En revisión).
- Altieri, M., & Nicholls, C. I. (2000). Teoría y práctica para una agricultura sustentable. *Agroecología. Red de Formación Ambiental Para América Latina y El Caribe.*
- Araya, K. (1985). SOIL FAILURE BY INTRODUCING SEWAGE SLUDGE UNDER PRESSURE. *American Society of Agricultural Engineers*, 28, 397–400.
- Arredondo Arredondo, J. J., Ortiz Laurel, H., RösselKipping, D., & Morales García, D. (2003). "Evaluación del Desempeño de Tres Tipos de Arado de Tiro Animal." *Agrociencia*, 37, 187–194. agrocien@colpos.mx Colegio de Postgraduados México
- Ashburner, J. E., & Sims, B. G. (1984). "Elementos de Diseño del Tractor y Herramientas de Labranza."
- Bachmann, J., Contreras, K., Hartge, K. H., & MacDonald, R. (2006). "Comparison of soil strength data obtain in situ with penetrometer and with vane shear test." *Soil and Tillage Research*, 87, 112–118.
- Baêta, F. C., & Souza, C. F. (2010). *Ambiência em edificações rurais: conforto animal.* Universidade Federal de Viçosa.
- Bautista Cruz, A., Etchevers Barra, J., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004, May). "La Calidad del Suelo y sus Indicadores." *Ecosistemas*, 13, 90–97. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=149>
- Boto, J. A., Pastrana, P., & Suarez de Cepeda, M. (2005). "Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España." *IDAE.*
- Caballero Peña, J., Sanhuesa Leal, H., & García-Navarrete, O. (2018). "Sistema de Medición de Rendimiento para Maquinaria Agrícola y Caballos de Tiro Pesado."
- Cadena Zapata, Martin Campos, G., Demuner Genaro, Zermeño-Gonzalez, A., López, A., & Gaytán Muñiz, T. (2013). "Uso de energía integrando Sistemas de Labranza y Mejoradores de suelo

- en zonas semiáridas de México". *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22, 54–57.
- Camacho-Tamayo, J. H., & Rodríguez B., G. A. (2007). "Evaluación De Implementos De Labranza A Diferentes Velocidades De Operación Y Contenidos De Agua Del Suelo." *AGRICULTURA TÉCNICA*, 67, 60–67.
- Campos M., S. G., A., R. C. M., Martín, C. Z., A., L. L. J., Neftalí, C. P., & Ramírez F. Gabriela. (2015). "Desarrollo de un sistema integral de medición de fuerzas para la evaluación de implementos de labranza." *Terra Latinoamericana*, 33, 139–149.
- Campos Magaña Santos Gabriel. (2000). "*Fuerzas y Análisis Cinemático de Discos Planos Empleados en la Labranza de Conservación con Tiro Animal.*"
- Carrasco, J. J., Squella, F. N., Riquelme, J. S., Hirzel, J. C., & Uribe, H. C. (2012). "Técnicas de Conservación de Suelos, Agua, y Vegetación en Territorios Degradados." *INIA*, 48.
- Castellanos, M. (2012). "Manual de Preparación de Suelos con Tracción Animal." In *Programa de Manejo Integrado de Plagas en América Central*. Escuela Agrícola Panamericana.
- Collins, E. V., & Caine, A. B. (1926). "*Testing Draft Horses.*". 20 N° 240.
- Cruz León, A. (1997). "*La Fuerza de Tracción Animal en el Medio Rural Mexicano.*" Universidad Autónoma del Estado de México.
- DANE. (2014). *Censo Nacional Agropecuario* (2nd ed.).
- Dörner, J. (2019). *Comunicación personal vía internet.*
- Dörner, J., Horn, R., Dec, D., Wendroth, O., Fleige, H., & Zuñiga, F. (2017). Land-Use-Dependent Change in the Soil Mechanical Strength and Resilience of a Shallow Volcanic Ash Soil in Southern Chile. *Soil Science Society of America Journal*, 81.
- Estrada-Herrera, R., & Hidalgo-Moreno, Claudia Guzmán-Plazola, Remigio Almaraz Suarez, José Navarro-Garza, Hermilio Etchevers-Barra, J. D. (2017). "Indicadores de Calidad de Suelo para Evaluar su Fertilidad." *Agrociencia*, 51, 813–831.
- FAO. (1972). *Propiedades Físicas del Suelo Disponible*. Portal de Suelos de La FAO. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- FAO. (1994). "Principios y prácticas de prueba y evaluación de máquinas y equipos agrícolas." *Boletín Técnico*, 110.
- FAO. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal El significado de la porosidad del suelo. *BOLETÍN DE SUELOS DE LA FAO* 79.
- FAO. (2013). Agricultural Mechanization in Sub Saharan Africa: Guidelines for preparing a strategy Guidelines for preparing a strategy. *Integrated Crop Management*, 22.
- FAO. (2020). *Secuestro de carbono en el suelo*. Portal de Suelos de La FAO. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/secuestro-de-carbono-en-el-suelo/es/>

- Fernández, M. A., Arias I, R., & Nissen M, J. (2002). La Mecanización Agrícola En La Pequeña Agricultura, Un Estudio De Caso; Cunco IX Región Chile. *Agro Sur*, 30, 43–54.
- Galindez, A. O. (1981). *“Diagnosis de los Implementos Agrícolas Tradicionales, Modificaciones y Nuevos Diseños en el Arado de Palo en el Valle del Mantaro.”* Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Gebresenbet, Gilma Kaumbutho, P. G. (1997). *“Comparative Analysis of the Field Performances of a Reversible Animal-Drawn Prototype and Conventional Moldboard Ploughs Pulled by a Single Donkey.”*
- Goe, M., & McDowell, R. (1980). *“Animal Traction: Guidelines for Utilization.”* New York College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University.
- Gómez López, H. (1997). *ESTADÍSTICA EXPERIMENTAL Aplicada a las Ciencias Agrícolas* (1st ed.). Universidad Nacional de Colombia.
- Hetz, E., & Reina, L. (2013). “Consumo y alternativas de ahorro de combustible en la utilización de tractores agrícolas.” *La Técnica N° 9*, 6–11.
- Hiraga, A., & Sugano, S. (2017). “Studies on the exercise physiology of draft horses performed in Japan during the 1950s and 1960s.” *Journal of Equine Science*, 28, 1–12.
- Huerga, I. R., Venturelli, L., Butti, M., & Esparza, S. L. (2011). *“Ambiente y Energía: Comparación de Dos Fuentes de Tracción en Labor de Siembra de los Sistemas Productivos de la Agricultura Familiar.”*
- IGAC. (2000). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca.*
- IGAC. (2005). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá.*
- IGAC. (2014). *Levantamiento Agrologico del Centro Agropecuario Marengo (CAM).*
- Inostroza, F., J., & Méndez L., P. (2009). *“III. Preparación de Suelo.”*
- James, R. E. (2003). *“Horse and Human Labor Estimates for Amish Farms.”*
- Jiménez, J., Puentes, H., & Leiva Fabio R. (1992). “Efectos de Tratamientos de Labranza sobre la Resistencia a la Penetración de un Andisol.” *Agronomía Colombiana*, 9, 30–39.
- Kasisira, L. L. (2005). *“Force Modelling and Energy Optimization for Subsoilers in Tandem.”* University of Pretoria.
- Kendell, C. (2005). “Economics of Farming with Horses.” *Rural Heritage, Spring, 2005.*
- King, F. H. (1907). *Physics of Agriculture. By Author*, 592.
- Llambi, L. D., Soto-W, A., CelleriBert, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). “Ecología, Hidrología y Suelos de Páramos.” *Proyecto Páramo Andino.*
- Luce, L. C., Johnson, J. B., & Fouts, J. D. (1982). *Draft Horse Handbook* (Washington State University

Extension and US Department of Agriculture. (ed.)).

MacDonald, W. (1909). *“Dry-Farming: Its Principles and Practice.”*

Makudiuh, K. W. (2016). *“Rake Angle Effect on Draft Power Requirement: Case of a Sub-Soiler in Nitisols” (Efecto del Angulo de Cincel Sobre los Requerimientos de Fuerza de Tiro: Estudio de un Subsolador en Nitisol)*. University of Nairobi.

Mamani, P., Botello, R., Condori, B., Moya, H., & Devaux, A. (2001). “Efecto del Tipo de Labranza con Tracción Animal en las Características Físicas del Suelo, Conservación de la Humedad y en el Crecimiento y Producción del Cultivo de la Papa.” *Revista Latinoamericana de La Papa*, 12, 130–151.

Medina M. Carlos. (2016). “Efectos de la Compactación de Suelos por el Pisoteo de Animales, en la Productividad de los Suelos.” *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 8, 88–93.

Miller, L. R. (2004). “Work Horse Handbook.” *Small Farmers Journal*, 368.

Decreto con Fuerza de Ley 192: CREA LA DIRECCION GENERAL DE FOMENTO EQUINO Y REMONTA, DEPENDIENTE DEL MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL., Pub. L. No. 4993 (1953).

Morlon, P. (1992). *“Comprender la agricultura campesina en los Andes centrales (Perú - Bolivia). (Comprendre l’agriculture paysanne dans les Andes centrales (Pérou, Bolivie).*

Naderloo, L., Alimadani, R Akram, R, Javadikia, P ZeinaliKhanghah, H. (2009). “Tillage depth and forward speed effects on draft of three primary tillage implements in clay loam soil.” *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7 (3,4).

Nkakini, S. O. (2015). *Draught Force Requirements of a Disc Plough at Various Tractor Forward Speeds in Loamy Sand Soil, During Ploughing*. University of Science and Technology Port-Harcourt.

Nordell, A. and E. (2012). Cultivating Questions: The Cost of Working with Horses. *Small Farmer’s Journal*, 36–3.

Ortiz-Laurel, H., & Cowell, P. A. (2007). “Power Output Measurement on Draught Horses.” *Agricultural Engineering International: The CIGR E-Journal*, IX.

Peerlings, J., van der Weerden, T., & van Hoof, W. (2007). “Het Trekpaard.” *Roodbont Uitgeverij*, 239.

Revista Semana. (2018a). *“Agricultura.”*

Revista Semana. (2018b, May). *“Agricultura.”*
<http://theinventors.org/library/inventors/blfarm1.htm>

Riquelme, J. S., Ruiz, C. S., & Aliaga, C. D. (1991). “Arado Cincel de Tiro Animal.” *IPA QUILAMAPU* N° 47.

Riquelme Sanhueza, J., & Jiménez Carrasco, J. (2011). “Laboreo Conservacionista de Suelos: Arados Cincel y Subsolador para el Establecimiento de Cultivos en la VIII Región.” *Técnicas de*

- Conservación de Suelos, Agua y Vegetación En Territorios Degradados*. INIA.
- Rivera, D. S. (2018). "Determinación de Resistencia al Corte Mediante Ensayo de veleta Manual en Suelos Alofónicos de la Región del Ñuble (Chile)." Universidad de Chile.
- Rydberg, T., & Jansen, J. (2002). Comparison of horse and tractor traction using energy analysis. *Ecological Engineering*, 19, 13–29.
- Sanchez Cruz, J. A. (2004). *Descripción y características de la maquinaria y equipo Agrícola utilizado en el sistema de labranza de conservación*.
- Sanhueza, H. S. (2018). *Estudio Sobre Costos Comparativos (Aproximados) para Adquisición de la Tecnología del Caballo de Tiro y el Tractor* (No. 3). Article 3.
- SARE. (2001). Stubble mulch blade plow. In *Steel in the Field* (p. 128).
- Schmit, P., & Moscardo, A. (2015). "Side Delivery Rake, REPOSSI 68/5, for Horse Traction."
- Shrivastava, A. K., Goering, C. E., & Rohrbach, R. P. (2006). "Engineering Principles of Agricultural Machines." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- Starkey, P. (1989). "Harnessing and Implements for Animal Traction: An Animal Traction Resource Book for Africa." *Deutsches Zentrum FÄir Entwicklungstechnologien - GATE*.
- Stiver, L. (2017). "Introducción a los suelos: La calidad de los suelos".
- USDA. (1999). "Guía para la Evaluación de la Calidad de los Suelos."
- USDA. (2000). *No Title*.
- Usman, A. M., Haque, M. A., & Umar, B. (2004). Design, Construction and Evaluation of an Animal Drawn Disk Harrow. *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, 4, 37–44.
- Valbuena López, M. S. (2006). "Instrumentos de Política para Incentivar en los Productores de Papa la Reconversión Tecnológica como Alternativa para Generar Procesos de Manejo y Uso Sostenible de los Ecosistemas de Paramo." Universidad Nacional de Colombia.
- Venturelli, L., Moltoni, A., Esparza, S., Huerga, I., Giordano, G., & Valderrama, Pedro Regazzoni, J. (2009). "Tracción de Implementos en la Agricultura Familiar. Desarrollo de Instrumental para Medir Fuerza de Tiro y Potencia."
- Volverás-Mambuscay B, Amézquita-Collazos E, C.-Q. J. (2016). "Indicadores de Calidad Física del Suelo de la Zona Cerealera Andina del Departamento de Nariño, Colombia." *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17, 361–377.
- Walters, R. D. (2016). "Soil, Draft and Traction." *Technical Note #21*.
- Wong, M. B., Martínez, J. A., Cañizares García, J., Lamas Rodríguez, A. G., & Lora, D. C. (2016). Evaluación de tecnologías de preparación de suelos con tracción animal. *Revista Ingeniería Agrícola*, 6, 9–13.
- Yepes, V. P. (2019). "¿Que es un caballo de potencia?" PoliBlogs.

http://enciclopedia.us.es/index.php/Caballo_de_vapor

Zhang, J. G., Raper, R. L., Balkcom, K. S., Arriaga, F. J., Kornecki, T. S., & Schwab, E. . (2007). "Drawbar Power Requirements and Soil Disruption of In-Row Subsoiler Points For Conservation Tillage." In *USDA-ARS National Soil Dynamics Laboratory*.