



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA



Evaluación de un prototipo articulado de cinceles para labranza vertical

Por:

DIEGO CRUZ HERNÁNDEZ

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial para
Obtener el Título de:**

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Saltillo, Coahuila México
Junio, 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

Evaluación de un prototipo articulado de cinceles para labranza vertical

POR:

DIEGO CRUZ HERNÁNDEZ

TESIS

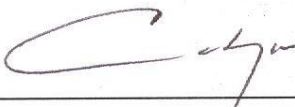
Que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Aprobado por el comité de tesis:



Dr. Santos Gabriel Campos Magaña
Asesor principal

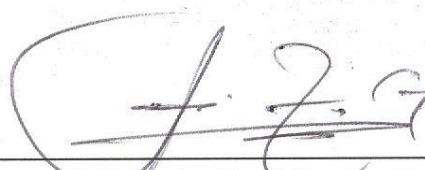


Dr. Martin Cadena Zapata
Asesor



M.C. Marco A. Reynolds Chávez

Director externo Agraria
"ANTONIO NARRO"



M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila México Junio, 2014



Coordinación de
Ingeniería

*“Nunca consideres el estudio como una obligación,
sino como una oportunidad para penetrar en el bello
mundo del saber”*

Albert Einstein.

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Terra Mater, La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por darme la oportunidad de ser parte de ella y alcanzar con éxito esta meta. Es para mí un gran orgullo pertenecer a esta institución.

Al Dr. Santos Gabriel Campos Magaña, por dirigir esta tesis. Agradezco su empeño, dedicación profesional, aportaciones teóricas, experiencias, consejos y llamadas de atención enmarcadas en torno a la investigación. Su exigencia y rigurosidad que han sido claves en este trabajo, ya que sin su dedicación y disponibilidad, sin duda no hubiera podido lograr esta meta.

A mis asesores, por el tiempo y las recomendaciones vertidas en la investigación: Dr. Santos Gabriel Campos Magaña, M.C. Marco Antonio Reynolds Chávez y Dr. Martín Cadena Zapata.

A todos los que contribuyeron para que este trabajo se realizara, Ing. Juan Antonio López López e Ing. Neftalí Cuervo Piña. Por su amistad, conocimientos brindados.

A mis compañeros y amigos, por los intercambios de opiniones, sugerencias y recomendaciones sobre los trabajos. A Gilbert Fresh López López, Lili Yaneth Ramón Mendoza, Julio Alberto Ruiz Hernández y Milton Raholid Vázquez Morales.

A los profesores, M.C. Héctor Uriel Serna Fernández, M.C. Juan Antonio Guerrero Hernández, Ing. Juan Arredondo Valdez, M.C. Tomas Gaitán Muñiz, Dr. Jesús Rodolfo Valenzuela García, M.C. Mario Alberto Méndez Dorado, Ing. Rosendo González Garza, Ing. Jorge Flores Berrueto, M.C. Blanca Elizabeth de la Peña Casas, quienes se esmeraron por dar lo mejor para mi formación profesional, por sus conocimientos teóricos brindados y experiencias compartidas.

A todos aquellos que me apoyaron de alguna forma en la realización de este trabajo. Gracias.

DEDICATORIAS

A mis padres: Sr. Zeferino Cruz Osorio y Sra. Silvina Hernández Gertrudis. Por haberme guiado en este camino tan difícil, por haberme brindado su confianza, por brindarme esta educación de la cual pueden sentirse orgullosos. Ya que gracias a ustedes he podido llegar a esta etapa; por su paciencia y comprensión, porque a pesar de las dificultades y carencias han realizado su máximo esfuerzo por brindarme lo mejor; reconozco su gran esfuerzo por educarme y formarme, por los valores que siempre me han inculcado. Esta tesis se las dedico con mucho cariño, y como símbolo de gratitud por su amor y apoyo incondicional que siempre me han manifestado.

A mis hermanas, que han sido un motor para lograr mis propósitos, gracias por su amistad, fortaleza y buenos momentos compartidos. A Marisol, Elena, Yolanda, Adriana y Rosa.

A mis Abuelos, por sus consejos y apoyo; Al Sr. Diego Antonio Cruz y Sra. María Antonia Osorio; Al Sr. Juan Hernández Catarina y Sra. Elena Santiago Gertrudis.

A Elizabeth Laureano Luna, por ser parte de mi vida y compartir momentos inolvidables, y por su comprensión.

Al Téc. Antonio Canales Cueva, por sus consejos, las llamadas de atención, sus experiencias compartidas dirigidas hacia un solo fin, una buena formación, por todo eso Gracias Amigo.

A toda mi familia, amigos y conocidos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE CUADROS	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	5
1.3 Hipótesis	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1 Agricultura de precisión	6
2.2 Labranza.....	6
2.2.1 Manejo de suelos con implementos de labranza	7
2.2.2 Labranza primaria	8
2.2.3 Labranza secundaria	9
2.2.4 Variabilidad del suelo.....	11
2.2.5 Sistema de labranza vertical.....	12
2.2.6 Labranza vertical.....	13
2.2.7 Conceptos y parámetros de la labranza vertical	13
2.2.8 Ventajas de la labranza vertical	14
2.2.9 Cinceles, su modo de acción, fuerzas y ajustes	16
2.2.10 Formas de cinceles.....	17
2.2.11 Factores que determinan la fuerza de arrastre en las herramientas de labranza.....	18
2.2.11.1 Los parámetros suelo/suelo y suelo/interface.....	18
2.2.11.2 La forma de la herramienta.....	20
2.2.11.3 Velocidad de avance.....	23
2.2.11.4 La vibración de la herramienta.....	24
2.2.11.5 Consumo de energía en la labranza.....	25
2.3 Profundidad crítica	28
2.4 Arreglos espaciales de cinceles.....	33

2.5 Transductores de fuerza	35
2.6 Registro y análisis de información	38
III. MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1 Localización del sitio de prueba	42
3.2 Prototipo articulado de cinceles	42
3.3 Parámetros técnicos de diseño del prototipo	43
3.4 Implemento integral de labranza.” Eco-byson” desarrollado por la empresa Tecnomec Agrícola S.A. de C.V.	44
3.5 Estructura flotante.....	45
3.6 Calibración de sensores, evaluación en laboratorio y campo.	46
3.6.1 Calibración individual de octagonal Rojo-Amarillo (ORA) y Verde-Azul (OVA)	46
3.6.2 Calibración Octagonal Verde (OV), Octagonal Amarillo (OA), Octagonal Rojo (OR) y dinamómetro de tiro (Axial)	46
3.6.2.1 Análisis de varianza	47
3.7 Determinación de la posición de la resultante	49
3.8 Equipos e instrumentos utilizados para la calibración de sensores y evaluación en campo.	50
3.8.1 Adquisición de datos.....	51
3.8.1.1 Descripción de la posición y función de los transductores.....	51
3.9 Procesamiento y análisis de la información	55
3.10 Evaluaciones en campo con diferentes arreglos del equipo de labranza vertical	57
3.10.1 Determinación de la resistencia al rodamiento	57
3.10.2 Requerimientos de la fuerza de tiro con dinamómetro Axial y transductor integral.....	58
3.11 Levantamiento de los perfiles de labranza.....	61
3.11.1 Obtención del área disturbada	62
3.11.2 Determinación de la resistencia específica.....	63
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1 Calibración de sensores octagonales extendidos.....	64
4.1.1 Resultados de calibración del Octagonal Rojo-Amarillo (ORA) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).	64

4.1.2 Resultados de calibración del octagonal Verde-Azul (OVA) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).	71
4.2 Resultados de calibración de los transductores octagonales del sensor integral.	78
4.2.1 Resultados de calibración del sensor Octagonal Amarillo (OA) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).	80
4.2.2 Resultados de calibración del sensor Octagonal Verde (OV) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).	87
4.2.3 Resultados de la calibración del sensor Octagonal Rojo (OR) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).	93
4.3 Resultados de calibración del dinamómetro de Tiro (Axial)	98
4.4 Análisis de varianza	101
4.5 Determinación de la posición de la fuerza resultante del sistema integral de transductores	102
4.6 Evaluaciones en campo.....	102
4.6.1 Determinación de resistencia al rodamiento	102
4.6.2 Evaluación de diferentes arreglos empleando el transductor integral.....	104
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
VI. LITERATURA CITADA	108
VII. ANEXOS.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Fuerza de arrastre de un implemento acoplado al tractor.....	2
Figura 2.1 a) Arado de cincel rastrojero, b) Vibro-cultivador con placa niveladora y desterronador, c) Cultivador de campo rastrojero (Friedrich, 1997).....	14
Figura 2.2 Relación del contenido de humedad del suelo con la resistencia de terrones, la masa del suelo y al deslizamiento al interfaz suelo/metal (Ashburner y Sims, 1984).....	19
Figura 2.3 Efectos del contenido de humedad sobre el esfuerzo de deslizamiento suelo/metal (Ashburner y Sims, 1984).	19
Figura 2.4 Efecto del pulimiento de la superficie de contacto sobre el ángulo de fricción suelo/metal (Ahsburner y Sims, 1984).....	20
Figura 2.5 Efecto del ángulo de ataque (α) sobre la fuerza de arrastre (F_x) de un diente (McKyes, 1985).	21
Figura 2.6 Relación del ángulo de ataque de un diente angosto con la fuerza de arrastre F_x y la fuerza vertical F_z ; a) arena con 3.8% de humedad; b) franco arenoso con 9.4 de humedad; c) arcilla con 18.2% de humedad (McKyes, 1985).	21
Figura 2.7 Manera en que la mala ubicación de una rueda de soporte de la herramienta sobrecarga la zona de falla del suelo y aumenta la fuerza de arrastre (Ashburner y Sims, 1984).	22
Figura 2.8 El diseño o uso inapropiado de las herramientas puede producir una sobrecarga innecesaria que aumenta la fuerza de arrastre (Ashburner y Sims, 1984; McKyes, 1985).	23
Figura 2.9 La relación de la fuerza de arrastre de un diente con la velocidad depende del contenido de humedad, siendo una relación cuadrática con baja humedad y exponencial a alta humedad. Los resultados son para suelo arcilloso con LIP 39%. Humedad: X 18.2%, O 28%, □ 38.7%, Δ 48.9 % (de Dios, 1972; McKyes, 1985).	24
Figura 2.10 Una comparación entre un muro de contención y una falla de suelo con cuchilla de corte (McKyes, 1989).	29
Figura 2.11 La diferencia en movimiento patrón de suelo entre una cuchilla ancha y una cuchilla de corte estrecha (McKyes, 1989).....	29
Figura 2.12 Modelo de falla del suelo tridimensional (McKyes and Ali, 1977).	30
Figura 2.13 Ilustración de la profundidad crítica en el corte del suelo (O'Callaghan and Farrelly, 1964).....	31

Figura 2.14 El modelo de la fuerza para la falla de profundidad crítica de Godwin (1974).....	33
Figura 2.15 Diagrama de adquisición y procesamiento de datos (Pacheco, 2012)....	38
Figura 2.16 Diagrama de bloques del sistema de instrumentación del tractor (Kheiralla and Azmi, 2002).....	40
Figura 3.1 Medición de parámetros para pruebas de implementos bajo condiciones de campo (Hinojosa 2003).	41
Figura 3.2 Diseño conceptual del prototipo articulado de arado de cinceles.	43
Figura 3.3 Marco del Eco-Byson utilizado para las pruebas de 4 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad de labor y para la prueba con 7 cinceles a una profundidad de trabajo de 0.30 m.	44
Figura 3.4 Estructura flotante (Pacheco, 2012).....	45
Figura 3.5 Estructura flotante acoplada al sistema transductor integral con el prototipo articulado de cinceles.....	46
Figura 3.6 Marco de calibración del sensor integral.....	48
Figura 3.7 Calibración del dinamómetro de tiro axial.	48
Figura 3.8 Banco de calibración.....	52
Figura 3.9 Calibración de los octagonales.	54
Figura 3.10 Frecuencia de muestreo y comportamiento de sensores con respecto a los pesos aplicados.....	54
Figura 3.11 Frecuencia de muestreo y comportamiento de sensores en campo.	55
Figura 3.12 Recorrido del tractor con el implemento levantado para determinar la resistencia al rodamiento.	58
Figura 3.13 Tractores utilizados para las pruebas con el dinamómetro Axial (Fuerza de tiro).....	59
Figura 3.14 Superficie total por prueba.	61
Figura 3.15 Distancias de los puntos muestreados para la toma de perfil de labranza (PM)	62
Figura 3.16 Regla graduada y toma de medidas para determinar la profundidad de labranza.	63
Figura 4.1 Marco de calibración con sensores Octagonal Rojo Amarillo.	65
Figura 4.2 Calibración del sensor Octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.54 m.	65
Figura 4.3 Calibración del sensor Octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.59 m.	66

Figura 4.4 Calibración del sensor Octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.64 m.	66
Figura 4.5 Línea ajustada del sensor octagonal Rojo Amarillo a 0.54 m de brazo de palanca y su constante de calibración.	69
Figura 4.6 Línea ajustada del sensor octagonal Rojo Amarillo a 0.59 m de brazo de palanca y su constante de calibración.	69
Figura 4.7 Línea ajustada del sensor octagonal Rojo Amarillo a 0.64 m de brazo de palanca y su constante de calibración.	70
Figura 4.8 Ecuación general de línea ajustada del sensor Octagonal Rojo Amarillo y su constante de calibración.....	70
Figura 4.9 Marco de calibración con sensores Octagonal Verde Azul.	71
Figura 4.10 Calibración del sensor Octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.54 m.	72
Figura 4.11 Calibración del sensor Octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.59 m.	72
Figura 4.12 Calibración del sensor Octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.64 m.....	73
Figura 4.13 Línea ajustada del sensor octagonal Verde Azul a 0.54 m de brazo de palanca su constante de calibración.	76
Figura 4.14 Línea ajustada del sensor octagonal Verde Azul a 0.59 m de brazo de palanca su constante de calibración.	76
Figura 4.15 Línea ajustada del sensor octagonal Verde Azul a 0.64 m de brazo de palanca su constante de calibración.	77
Figura 4.16 Ecuación general de línea ajustada del sensor octagonal Verde Azul y su constante de calibración.	77
Figura 4.17 Distancia de centro a centro entre el (OR) y los octagonales del bastidor (OA) y (OV).	78
Figura 4.18 Distancia de centro a centro de los (OA) y el (OV) en el marco de calibración.....	79
Figura 4.19 Distancia del brazo de palanca (DBT) del punto central del octagonal hasta el punto de enganche para la carga.	79
Figura 4.20 Calibración de los transductores (OV), (OA) Y (OR) junto con el octagonal Verde Azul.	80
Figura 4.21 Gráfica escalonada de calibración (OA) a 0.54 m del brazo de palanca.	81
Figura 4.22 Gráfica escalonada de calibración (OA) a 0.59 m del brazo de palanca.	81
Figura 4.23 Gráfica escalonada de calibración (OA) a 0.64 m del brazo de palanca.	82

Figura 4.24 Línea ajustada del sensor (OA) F_x y su constante de calibración a 0.54 m del brazo de palanca.....	85
Figura 4.25 Línea ajustada del sensor (OA) F_x y su constante de calibración a 0.59 m del brazo de palanca.....	85
Figura 4.26 Línea ajustada del sensor (OA) F_x y su constante de calibración a 0.64 m del brazo de palanca.....	86
Figura 4.27 Ecuación general de línea ajustada del sensor octagonal Amarillo y su constante de calibración.	86
Figura 4.28 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OV) a 0.54 m del brazo de palanca.....	87
Figura 4.29 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OV) a 0.59 m del brazo de palanca.....	88
Figura 4.30 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OV) a 0.64 m del brazo de palanca.....	88
Figura 4.31 Línea ajustada del sensor (OV) F_x y su constante de calibración a 0.54 m del brazo de palanca.....	91
Figura 4.32 Línea ajustada del sensor (OV) F_x y su constante de calibración a 0.59 m del brazo de palanca.....	91
Figura 4.33 Línea ajustada del sensor (OV) F_x y su constante de calibración a 0.64 m del brazo de palanca.....	92
Figura 4.34 Ecuación general de línea ajustada del sensor octagonal Verde y su constante de calibración.	92
Figura 4.35 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OR) a 0.54 m del brazo de palanca.....	93
Figura 4.36 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OR) a 0.59 m del brazo de palanca.....	93
Figura 4.37 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OR) a 0.64 m del brazo de palanca.....	94
Figura 4.38 Línea ajustada del sensor (OR) F_x y su constante de calibración a 0.54 m del brazo de palanca.....	96
Figura 4.39 Línea ajustada del sensor (OR) F_x y su constante de calibración a 0.59 m del brazo de palanca.....	97
Figura 4.40 Línea ajustada del sensor (OR) F_x y su constante de calibración a 0.64 m del brazo de palanca.....	97
Figura 4.41 Ecuación general de línea ajustada del sensor octagonal Rojo y su constante de calibración.	98

Figura 4.42 Grafica escalonada de calibración del transductor (Axial).	98
Figura 4.43 Línea ajustada del sensor (Axial) F_x y su constante de calibración.	100
Figura 4.44 Gráfica de la ecuación de la posición de la resultante de las fuerzas monitoreadas	102
Figura 4.45 Recorrido del tractor con el implemento arriba para determinar la resistencia al rodamiento.	103
Figura 4.46 Gráficas obtenidas de los sensores integral y Axial en estado dinámico.	104

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1 Comparación entre sistemas de labranza para la medición de diferentes parámetros.....	15
Cuadro 3.1 Especificaciones del prototipo utilizado parámetros técnicos de diseño del prototipo articulado de arado de cinceles.....	43
Cuadro 3.2 Especificaciones del implemento integral de labranza Eco-Byson.....	44
Cuadro 3.3 Valores de ajuste de las ganancias y voltaje de excitación antes de la obtención de datos para el DBK-43a.	51
Cuadro 3.4 Arreglos espaciales de cinceles realizados bajo condiciones de campo.	60
Cuadro 4.1 Valores nominales de las galgas, características ajustadas en el DaqBook 2000 y valor de la constante de calibración para cada octagonal.	64
Cuadro 4.2. Datos de calibración del octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.54 m.....	67
Cuadro 4.3. Datos de calibración del octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.59 m.....	67
Cuadro 4.4. Datos de calibración del octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.64 m.....	68
Cuadro 4.5. Datos de calibración del Octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.54 m.	73
Cuadro 4.6. Datos de calibración del octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.59 m.	74
Cuadro 4.7. Datos de calibración del octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.64 m.	75
Cuadro 4.8 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (OA) a 0.54 m del brazo de palanca.	82
Cuadro 4.9 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (OA) a 0.59 m del brazo de palanca.	83
Cuadro 4.10 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (OA) a 0.64 m del brazo de palanca.	84
Cuadro 4.11 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (OV) a 0.54 m del brazo de palanca.	89
Cuadro 4.12 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (OV) a 0.59 m del brazo de palanca.	89

Cuadro 4.13 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (OV) a 0.64 <i>m</i> del brazo de palanca.	90
Cuadro 4.14 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (OR) a 0.54 <i>m</i> del brazo de palanca.	94
Cuadro 4.15 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (OR) a 0.59 <i>m</i> del brazo de palanca.	95
Cuadro 4.16 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (OR) a 0.64 <i>m</i> del brazo de palanca.	95
Cuadro 4.17 Datos de respuesta en <i>mV</i> del sensor (Axial).	99
Cuadro 4.18 Constantes obtenidas de los sensores y constante obtenida para el (OR) con la proporción.	100
Cuadro 4.19 Datos de constantes de los octagonales que constituyen el transductor integral obtenidos para realizar el análisis de varianza.	101
Cuadro 4.20 Análisis de varianza.....	101
Cuadro 4.21 Tabla de medias.....	101
Cuadro 4.22 Análisis espectral del sensor Axial para determinar la resistencia al rodamiento; Media (M) + Espectro (E) en V, Media + Espectro por la constante (K) del sensor Axial en unidades de fuerza (<i>kN</i>).	103
Cuadro 4.23 Concentrado de las fuerzas monitoreadas por los sensores para los diferentes arreglos evaluados	106

RESUMEN

El presente trabajo forma parte del proyecto **Labranza Inteligente**, el cual se lleva a cabo en el departamento de Maquinaria Agrícola de la UAAAN. Dicho proyecto contempla entre sus objetivos: Construir un prototipo de labranza vertical con control automático de profundidad manipulado mediante el registro de información satelital, mapas de diagnóstico y prescripción de los niveles de energía por sitio específico. El propósito del presente trabajo fue la evaluación y determinación de la fuerza de tiro en la labranza vertical con diferentes arreglos de cinceles, a través del uso de transductores integrales como dispositivos de monitoreo, aplicados en un prototipo de arado de cinceles con sección trasera articulada capaz de aplicar laboreo a profundidades variables, con diferentes anchos de trabajo y número de cuerpos de cinceles, con y sin el uso de alas expansoras. Las variables cuantificadas fueron fuerza de tiro, área disturbada y resistencia específica del suelo. Los dinamómetros empleados para el transductor integral, así como, para las mediciones de fuerzas en forma independiente muestran un coeficiente de correlación superior al 99% en todos los casos. Así mismo, el sensor integral detecta los momentos producto de las cargas y los brazos de palanca a diferencia de los sensores octagonales individuales que no son sensibles a la posición de las fuerzas. Para las pruebas del grupo uno de arreglos se muestra las magnitudes de las fuerzas con uno y dos cinceles sin alas a diferentes profundidades de evaluación. Para el caso de un cincel las fuerzas van desde 2.42 kN a 10.76 kN para profundidades de 0.20 m a 0.40 m respectivamente. Parea el caso de dos cinceles estas fuerzas van desde 7.35 kN a 11.41 kN para profundidades de 0.30 m a 0.40 m . En el segundo grupo de arreglos evaluados, que incluyen 2 cinceles frontales a 0.20 m y un cincel trasero con arreglos, sin alas, con alas medianas y alas grandes a las profundidades de 0.20 m , 0.30 m y 0.40 m . En este caso se aprecia claramente el efecto de la profundidad de laboreo del cincel trasero para cada uno de los arreglos sin alas y con diferentes tamaños de alas. La magnitud de la fuerza se incrementa de 7.97 kN a 14.69 kN para los arreglos de 2CF201CT40SA en comparación con el arreglo de 2CF201CT40AG. En los arreglos 2CF201CT30AM y 2CF201CT30AG;

2CF201CT40AM y 2CF201CT40AM se tuvo una magnitud promedio de 9.335 kN y 14.25 kN respectivamente. No mostrando diferencias significativas en el empleo de alas de 0.45 m a 0.60 m de ancho de trabajo. En el tercer grupo evaluado se muestran los arreglos de 4 cinceles frontales combinados con dos cinceles traseros con alas y tres cinceles traseros sin alas, empleando el marco del ECOBISON para la evaluación de los arreglos. Los resultados obtenidos en la evaluación con el arreglo de 4CF202CT30AM y 4CF202CT30AG se aprecian una clara disminución de la resistencia específica para estos arreglos en comparación con el arreglo de 4CF303CT30SA. Para los primeros se obtuvo una resistencia específica media de 34.69 kNm^{-2} en comparación con 52.35 kNm^{-2} para el arreglo de 4CF303CT30SA lo cual representa una disminución de 33.73 % de resistencia específica.

Palabras clave: Evaluación de cinceles, Transductor integral, labranza vertical y fuerza de tiro.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el incremento de los costos de los productos derivados del petróleo (combustible), ocasiona que actividades como la preparación de suelo en la agricultura busque alternativas para alcanzar la producción y sustentabilidad de los alimentos. Se requiere para las labores primarias de suelo altos consumos de combustible, tan solo en una sola labor se tienen registros superiores a los 35 litros por hectárea (IDAE, 2005). Por eso en los últimos años se ha incrementado el interés por el uso eficiente de la energía, la conservación de los recursos suelo y agua principalmente donde es escasa, lo que ha traído un cambio en actitudes con respecto a las prácticas de manejo del suelo y los residuos. Cada año se da más énfasis al uso de las labranzas mínimas y a la preparación de la cama de siembra en la agricultura de temporal (FAO, 2002).

La labranza primaria en la preparación del suelo tiene un gran impacto, debido a que la remoción es alta y afecta en gran medida las propiedades físicas del suelo y directa e indirectamente las propiedades químicas y biológicas. Por otra parte, es la actividad agrícola que demanda la mayor cantidad de combustible fósil (IDAE, 2006). Es importante señalar que la preparación de los suelos debe favorecer la producción de los cultivos y mantener la calidad de los mismos.

Hoy en día, debido al uso excesivo e inadecuado de los implementos de labranza, se provoca la degradación de suelo y genera la baja rentabilidad de los cultivos; la búsqueda de soluciones a esta problemática ha conducido al estudio e implantación de sistemas de labranza de tipo conservacionista (no inversión del suelo), incluyendo a la labranza vertical, con el fin de disminuir el impacto sobre el medio ambiente y especialmente sobre el suelo. Por lo anterior es importante conocer diferentes parámetros operativos de los implementos de labranza y su incidencia en el suelo (Camacho y Rodríguez, 2007).

Con relación a esta problemática, el propósito del presente trabajo es la evaluación y determinación de los requerimientos de resistencia específica del suelo en la

labranza vertical basado en el principio de profundidad crítica, a través del uso de transductores integrales como dispositivos de monitoreo, aplicados en un prototipo de arado de cinceles con sección trasera articulada para profundidades variables, con diferentes anchos de trabajo y número de cuerpos de cinceles) con y sin el uso de alas expansoras.

1.1 Antecedentes

Una prioridad para la evaluación de implementos apegados a los lineamientos institucionales del Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA), como órgano rector, es contar con instrumentos para satisfacer los requerimientos de prueba de los diferentes parámetros a medir durante la evaluación del desempeño de los equipos de labranza. Una de las pruebas es la determinación de la fuerza de tiro, actualmente el método aprobado en México (Norma de Arados NMX-O-182-SCFI-2003) requiere de un dinamómetro de tiro el cual es colocado entre dos tractores, un tractor con el implemento a evaluar en posición de trabajo y otro como fuente de potencia figura (1.1).

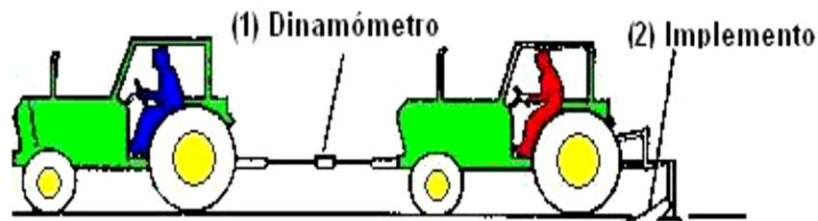


Figura 1.1 Fuerza de arrastre de un implemento acoplado al tractor.

Godwin y Spoor citado por Campos (2000) indican que uno de los aspectos más importantes en la evaluación de nuevos diseños de herramientas de labranza, es el proceso de medición de las magnitudes de las fuerzas que actúan en dichos implementos, la característica de la falla, así como el volumen de disturbación y sección transversal del suelo como producto de la geometría de la herramienta, controlando variables del suelo como son humedad y densidad.

Ante esta situación, es posible desarrollar e implementar un instrumento integral confiable que reemplace la utilización de dos tractores, como es especificado en el desarrollo de normas, con la finalidad de reducir costos y aumentar la confiabilidad de los resultados. Esto a través de instrumentos y sensores, se obtendrá información que servirá para dar servicio a fabricantes de equipo agrícola, así como generar información para desarrollar nuevas tecnologías donde no se pierda o consuma demasiada potencia y combustible, que en un momento determinado redunde en gastos para el productor agropecuario y disminuya por un lado su capacidad económica y por consiguiente aumenta su capacidad de producción del mismo (Campos, 2000).

Al - Jalil *et al.* (2001), diseñaron y fabricaron un enganche de tres puntos capaz de medir tres fuerzas que actúan en el tractor – implemento en tres dimensiones, que ayudaría a diseñar herramientas de labranza y evaluar el funcionamiento del tractor. Tomando en cuenta la importancia que tienen las pruebas y evaluaciones de la maquinaria agrícola, para su correcta selección, de tal forma que se garanticen los mejores índices técnico – económicos durante su explotación bajo condiciones específicas de cada país, y considerando el interés para México, el objetivo fundamental de evaluación técnica de equipos es proveerle al agricultor de escasos recursos económicos equipo confiable que rinda un beneficio neto positivo y atractivo.

Bonifaz (2012) rediseño, construyó y evaluó un sensor integral con capacidad de 80 kN para las fuerzas horizontal y vertical así como 70 kN de transferencia de peso. Los elementos que lo integran son tres anillos octagonales extendidos y un marco de enganche de tres puntos, categoría II. La calibración del transductor integral se hizo tanto con cargas individuales como con cargas combinadas en dos direcciones y en un plano. Los resultados de la calibración con cargas individuales, mostrados en sus ecuaciones de respuesta Newtons vs (mV), muestran una alta linealidad con un

coeficiente de correlación R-sq del 99% para ambas cargas, tanto en el plano vertical (Fy) como el plano horizontal (Fx).

Pacheco (2012) desarrolló y evaluó un transductor integral para la medición de la fuerza de tiro en un prototipo de labranza vertical con arreglos de hasta seis cinceles con y sin alas expansoras basado en la propuesta de Hinojosa (2003), el cual está constituido por tres transductores octagonales de anillo extendido denominados Octagonal verde (OV), Octagonal Amarillo (OA) y Octagonal Rojo (OR) cada uno con capacidad de 40 *kN* con un factor de correlación por encima del 99 %.

Pérez (2013) para determinar los requerimientos de fuerza en la labranza vertical desarrollo y evaluó dos transductores integrales de 40 *kN* de capacidad cada uno, para la medición de la fuerza en dos direcciones y el Momento, en la cual utilizó dos cinceles frontales sin alas a 0.20 *m* de profundidad y un cincel trasero, con seis arreglos diferentes (sin alas, con alas medianas y grandes) trabajando a 0.20 *m* y 0.30 *m* de profundidad. Las constantes de calibración de los octagonales bajo condiciones de laboratorio fueron para FX(13.58), FY(20.33), Momento(4.37) en el caso del octagonal Rojo-Amarillo, para el octagonal Verde-Azul, FX(15.29), FY(6.88) ambos octagonales con un coeficiente de correlación superior al 99% en la eficiencia del monitoreo y detección de las fuerzas.

1.2 Objetivos

- **Objetivo general**

Evaluar un prototipo integral de arado de cinceles con sección trasera articulada para laboreo primario del suelo a profundidades variables.

- **Objetivos específicos**

Determinar la resistencia específica del suelo con diferentes arreglos de cinceles y las fuerzas a las que se ve sometido el prototipo de labranza vertical.

Verificar el funcionamiento y confiabilidad del sensor integral en el monitoreo de fuerzas en labranza de suelos.

1.3 Hipótesis

Mediante el uso del prototipo integral de cinceles con sección trasera articulada es posible aplicar laboreo primario a profundidades variables.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Agricultura de precisión

La introducción a la Agricultura de Precisión, en EEUU, por los años 1991-1993, diseñó un esquema de utilización de las herramientas posicionadas por GPS que terminaba en una aplicación de insumos en forma variable (Aplicación de Dosis Variable: ADV) como única alternativa que disponía el productor para recuperar la inversión. En la actualidad se posee mayor conocimiento acerca del aprovechamiento agronómico de los datos de rendimiento grabados espacialmente (mapas de rendimiento) (Daberkow *et al.*, 2002). La agricultura de precisión o manejo de sitio específico, es la utilización de herramientas que permiten la obtención y análisis de datos geo-referenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de insumos (López, 2012).

2.2 Labranza

La labranza tiene como objetivo general, el modificar por medios mecánicos las condiciones físicas originales del suelo para mejorarlas, de acuerdo a los fines perseguidos. La labranza tiene efectos directos sobre los procesos y propiedades físicas del suelo, e indirectos sobre el crecimiento de los cultivos. A pesar de que los principios en los que se sustentan los diferentes sistemas de labranza, son los mismos independientes de otros factores biofísicos y socioeconómicos (Karwasra, 1991).

El sistema de labranza a seleccionar debe además de incrementar los rendimientos del cultivo, reducir los riesgos de producción, facilitar la conservación de suelos y agua, mejorar el desarrollo del sistema radicular, mantener niveles adecuados de materia orgánica, y controlar o revertir procesos de degradación. Para ello es fundamental conocer los efectos de cada sistema de labranza, los cuales

dependerán de factores climáticos, de suelos, y de cultivos. Un adecuado conocimiento de los suelos, clima y sistemas de cultivo utilizados por el agricultor, es indispensable para el desarrollo y selección de sistemas de labranza para cada situación (Boone, 1988).

2.2.1 Manejo de suelos con implementos de labranza

Actualmente la investigación brinda una mejor capacidad de explicar el efecto de labranza sobre suelos, aunque definitivamente no todos los procesos se entienden bien. La labranza es una actividad que modifica la estructura de la capa superficial del suelo, sin embargo existen efectos directos e indirectos que se logran con la labranza, entre los cuales se encuentran; facilitar la producción de los cultivos, el control de malezas, acondicionar la superficie del suelo para permitir una buena irrigación y una cosecha más fácil, además de facilitar la incorporación de materia orgánica, fertilizantes, pesticidas, entre otros (Hoogmoed, 1999).

El hombre incorpora la labranza cuando intenta controlar la vegetación natural, con el fin de poder desarrollar especies de su interés. Los principales objetivos de la labranza son el control de malezas, preparación de la cama de siembra y el acondicionamiento de las propiedades físicas del suelo (FAO, 2000).

A pesar de los rápidos logros en los recientes años, la labranza está muy lejos de ser considerada una ciencia exacta. Aunque uno de los principales objetivos de la labranza es proporcionar un óptimo entorno en el crecimiento de las plantas, no está en consideraciones de especificar e identificar cuantitativamente las condiciones deseadas en el suelo (Soane y Pidgeon, 1975).

Los sistemas de labranza se clasifican según (Friedrich, 1997) en:

2.2.2 Labranza primaria

La labranza primaria es la labranza tradicional que se extiende a toda la capa arable. Esta sirve para eliminar compactaciones superficiales, abrir el suelo y crear una estructura grumosa para acumular agua y muchas veces también incorporar, a través de la arada, plagas, malezas y semillas de malezas (Friedrich, 1997).

La profundidad de la labranza primaria depende de la fuerza de tracción disponible. Con tracción animal es normalmente entre 10 y 20 cm; con el tractor, especialmente con el aumento de potencia de los tractores modernos, se llega en algunos países hasta 40 cm. Existe una amplia polémica sobre la profundidad de la labranza primaria. En general no se debería aumentar la profundidad de labranza sólo porque se dispone de la potencia necesaria. En suelos con una capa de suelo delgada esto puede literalmente destruir el suelo, lo que ocurre frecuentemente cuando se usan tractores. El incremento de cosecha que coincide a veces con una profundización de la capa arable, sólo en pocos casos es sostenible. Esto depende mucho de la fertilidad y la profundidad del suelo. Por otro lado: con una buena estructura del suelo las raíces de las plantas llegarán a las partes más profundas sin necesidad de una labranza profunda (Friedrich, 1997).

La labranza primaria adquiere importancia en la preparación del suelo debido a que la remoción es alta y que esta labor afecta en gran medida sus propiedades físicas, y directa e indirectamente las propiedades químicas y biológicas. Los cambios promovidos por la labranza deben favorecer la producción de los cultivos y mantener la calidad física del suelo, pero debido al uso inadecuado de los implementos de labranza se provoca la erosión y degradación física de éste. La degradación física del suelo puede ser definida como la pérdida de la calidad de la estructura del suelo (FAO, 2000).

Esa degradación estructural puede ser observada tanto en la superficie con el surgimiento de finas costras, por debajo de la capa arada, donde surgen capas

compactadas. Con esa degradación Cabeda (1984) menciona que las tasas de infiltración de agua en el suelo se reducen, mientras las tasas de escorrentía y de erosión aumentan.

Las principales causas de la degradación de las características físicas del suelo son Cabeda (1984):

Cobertura inadecuada de la superficie del suelo, que expone los agregados de la superficie del suelo a la acción de lluvias; como consecuencia ocurre el colapso estructural de estos agregados, formándose costras con espesor medio de un milímetro, que reducen drásticamente la infiltración de agua.

Excesiva labranza y/o labranza con humedad inadecuada: la labranza en exceso y superficial lleva a la rotura de los agregados, favoreciendo la formación de costras, escurrimiento y el transporte de partículas (erosión). La reducción de la rugosidad provocada por la labranza.

2.2.3 Labranza secundaria

La labranza secundaria sirve para preparar el suelo para la siembra. Esto incluye la formación de la superficie, la nivelación, la formación de camellones o surcos para irrigación y para establecer la cama de siembra. La cama de semilla debería extenderse solamente sobre un horizonte muy delgado hasta la profundidad prevista de la siembra. Normalmente la labranza secundaria nivela y pulveriza el suelo y una profundización de la misma solamente llevaría a una pérdida innecesaria de humedad. Cuando el suelo está todavía suelto hay que incluir también una recompactación en la labranza secundaria. La creación de una cama de siembra tradicional surge a consecuencia de la insuficiencia de la técnica para sembrar en un terreno virgen. Hoy en día esta tecnología está suficientemente avanzada para permitir la siembra de la mayoría de los cultivos sin ninguna labranza. Además se

debe considerar que la labranza secundaria deja, en un clima tropical, una superficie pulverizada en condiciones críticas con gran peligro de erosión (Barber, 1997).

Los tipos principales de sistemas de labranza (Barber, 1997), son:

Labranza convencional: El principio de la labranza convencional se basa en la inversión del suelo con el objetivo de controlar las malezas, seguido por varias operaciones para la preparación de la cama de siembra.

Labranza reducida: es el sistema de labranza donde hay menor frecuencia o menor intensidad de labranza en comparación con el sistema convencional. Esta definición es bastante amplia y por lo tanto los sistemas de labranza que varían en los implementos, frecuencia, e intensidad pueden ser considerados como la labranza reducida. Los tipos de implementos y el número de pasadas también varía; la consecuencia es que en algunos sistemas quedan muy pocos rastrojos y en otros más de 30%. Por ello, algunos sistemas de labranza reducida son clasificados como labranza conservacionista mientras que otros no. En general, los sistemas de labranza reducida no ocupan el arado vertedera ni el arado de discos.

Labranza en bandas: En este sistema se preparan hileras para la siembra de sólo 5 a 20 cm de ancho y 5 a 10 cm de profundidad. El suelo entre las hileras no es disturbado, solamente se controlan las malezas y queda con una cobertura protectora de malezas muertas y rastrojos.

Labranza en camellones: En este sistema los camellones pueden ser anchos o angostos, y los surcos pueden funcionar de dos maneras: atrapar y acumular la lluvia en zonas semiáridas, o drenar el exceso de agua en zonas húmedas. Por lo tanto el sistema debe ser diseñado para necesidades específicas, o sea para conservar humedad, para drenar humedad o para aceptar humedad como en sistemas de riego por gravedad.

Labranza cero: en este sistema de siembra se aplica la no inversión de suelos, con la aplicación directa de los equipos de siembra, seguida de la aplicación de

fertilización química en un manejo que puede ser pre o post emergente de la siembra.

Labranza profunda-siembra: Este sistema es parecido a la labranza cero con la excepción que la sembradora tiene un subsolador montado entre el disco cortador y en los discos dobles van acoplados los abresurcos. Además se deberían montar ruedas de presión atrás del doble disco abresurco para cerrar el corte. Este sistema tiene todas las ventajas de la labranza cero y ha sido desarrollado especialmente para suelos endurecidos y compactados. Las limitaciones son la disponibilidad de las máquinas y la alta potencia de tiro requerida.

Labranza de subsolación: La labranza de subsolación se debería considerar como una práctica de recuperación de suelos degradados debido a problemas graves de compactación. Por lo general, la subsolación no es una labranza que se puede usar cada año en la rutina de la preparación de suelos (Barber, 1997).

2.2.4 Variabilidad del suelo

El manejo del suelo afecta a los microorganismos y a los procesos que éstos llevan a cabo. Los parámetros biológicos y bioquímicos se han mostrados como excelentes y rápidos indicadores de la calidad del suelo. Muchos estudios han indicado que bajo laboreo de conservación la biomasa microbiana y la actividad de numerosas enzimas del suelo aumentan con respecto a las medidas bajo laboreo tradicional en la capa más superficial del suelo (Dick, 1994) (0-10 cm, sin embargo este hecho no es tan evidente en capas más sub-superficiales).

La redistribución del suelo por arrastre mecánico durante las operaciones agrícolas de laboreo ha sido reconocido como un proceso *per se* de intensa degradación del suelo (erosión mecánica o erosión por laboreo), que en último término da lugar a una profunda transformación de los paisajes edáficos, así como de la geomorfología e hidrología superficial de los paisajes agrícolas (Govers *et al.*, 1999). Los modelos empíricos actualmente disponibles en la literatura, que describen los mecanismos de

redistribución mecánica del suelo, ponen de manifiesto que la mayoría de los aperos de labranza, comúnmente utilizados en muy diversas condiciones agronómicas, generan tasas de movilización de suelo muy elevadas (Lindstrom *et al.*, 1992; Govers *et al.*, 1999; De Alba, 2001; Torri *et al.*, 2002). Un ejemplo es el caso del laboreo con el apero convencional de vertedera, que produce la movilización de una capa continua de suelo de hasta 30 ó 40 cm de profundidad (según la profundidad de laboreo) que cubre toda la superficie del campo de cultivo. Una única pasada de vertedera, a una profundidad media de laboreo de 30 cm, da lugar a la movilización de un total de 4050 toneladas de suelo por hectárea labrada (considerando una densidad aparente del suelo de 1.35 g/cm³); mientras que si la profundidad de laboreo fuera de 40 cm la cantidad total de suelo movilizadascendería a 5400 t/ha. Como consecuencia de la intensidad del proceso, los efectos acumulados a medio y largo plazo han dado lugar a una drástica transformación de la dinámica física y biológica del suelo tanto en el interior de los campos de cultivo como a escala de ladera y de paisaje (Torri *et al.*, 2002; De Alba *et al.*, 2004).

2.2.5 Sistema de labranza vertical

En los Estados Unidos durante los años 1950 el arado convencional (vertedera y discos) empezó a ser reemplazado por el arado a cincel, (Phillips y Young, 1973).

Este último, es un tipo de la labranza vertical que se encuentra en la labranza de conservación, la cual se refiere a un sistema donde toda la tierra está preparada con implementos que no invierten el suelo y causan poca compactación. FAO (2000).

Herrera A. y Aguilar Z. (2002), señalan que la principal característica de la labranza vertical es que utiliza implementos flexibles de alta resistencia, que utiliza brazos o flejes equipados con puntas en lugar de discos para aflojar el suelo.

2.2.6 Labranza vertical

La labranza vertical del suelo es uno de los métodos más apropiados para trabajar el suelo sin que los horizontes cambien su posición relativa, no quedando una separación neta entre la parte removida y la que no lo está. El efecto de fracturación puede extenderse en profundidad o lateralmente cuando el suelo está seco y se utiliza la herramienta apropiada, todo ayudado por el efecto de vibración de los elementos mecánicos que actúan.

La labranza vertical al trabajar verticalmente el suelo y mantener cobertura vegetal sobre la superficie contribuye a su conservación, puesto que favorece la infiltración, elimina costras, limita la evaporación evitando el movimiento superficial del suelo por el agua y el viento (Biblioteca digital de la universidad de chile, documento electrónico en línea).

http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_agronicas/villar04/parte10/01.html.

La labranza vertical tiene la particularidad de no invertir totalmente el perfil de suelo hasta su profundidad de trabajo, manteniendo residuo en superficie y produciendo condiciones de rugosidad superficial al mismo tiempo que penetra en la zona compactada determinada por herramientas de labranza convencional (Agamennoni, 1996).

2.2.7 Conceptos y parámetros de la labranza vertical

Al evaluar algunas propiedades físicas del suelo luego de la introducción de la labranza vertical en un suelo bajo siembra directa, Elizondo *et al.*, (2001) mencionan que la introducción de éste tipo de labranza en un suelo tratado con siembra directa, no produce deterioro de las condiciones físicas del suelo. También mencionan que en la labranza vertical no existen altos valores de resistencia mecánica o resistencia

a la penetración de implementos comparándola con altos valores en la siembra directa.

La principal característica de la labranza vertical es que utiliza brazos o flejes equipados con puntas en lugar de discos para aflojar el suelo sin invertirlo, dejando en la superficie una cobertura protectora formada por los residuos del cultivo anterior y por las malezas arrancadas. Los implementos principales en la labranza vertical son el arado cincel rastrojero, el vibro-cultivador y el cultivador de campo rastrojero (Figura 2). Se debe notar que la terminología empleada para los implementos ilustrados sigue la usada por los fabricantes o aquella más comúnmente usada. Las ilustraciones sirven para clarificar las definiciones empleadas (Barber *et al.*, 1993).

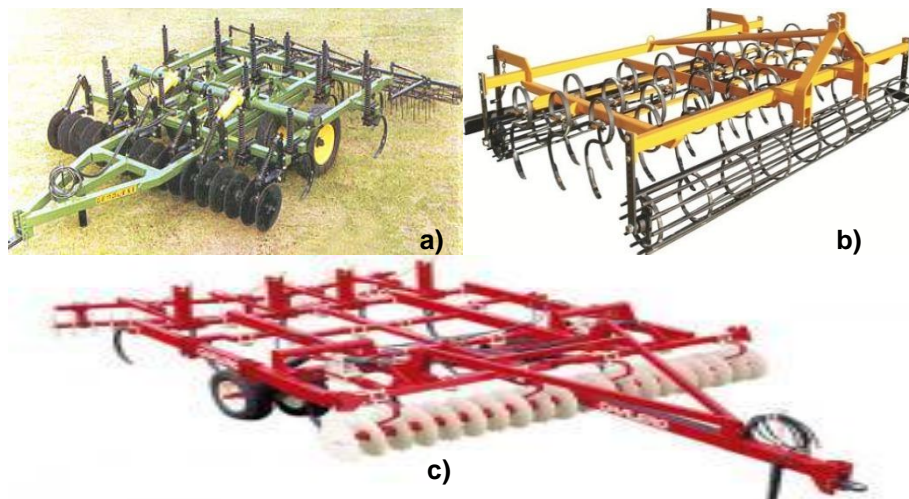


Figura 2.1 a) Arado de cincel rastrojero, b) Vibro-cultivador con placa niveladora y desterronador, c) Cultivador de campo rastrojero (Friedrich, 1997).

2.2.8 Ventajas de la labranza vertical

La labranza vertical sostiene mejor la productividad de los suelos debido a la presencia de los rastrojos en la superficie que protegen el suelo contra los procesos de erosión. Esta cobertura de rastrojos también impide la formación de costras superficiales (planchado) que pueden provocar una baja emergencia de los cultivos. Los implementos de labranza vertical causan poca compactación, es decir no forman

una capa dura en el subsuelo (piso de arado) que limita la profundización de las raíces. En cambio los discos de labranza convencional ocasionan capas duras.

Debido a que la labranza vertical no invierte el suelo, hay menos descomposición de la materia orgánica y menos pérdida de humedad, que es muy importante para la siembra (Barber, 1997). (Ver Cuadro 2.1). Para un ejemplo de los efectos de la labranza vertical sobre el contenido de humedad en el suelo, la cobertura de rastrojo y el rendimiento de maíz en comparación con otros sistemas de labranza.

Cuadro 2.1 Comparación entre sistemas de labranza para la medición de diferentes parámetros.

Sistema de labranza	Humedad (%)	Cobertura de rastrojos (%)	Rendimiento de Maíz (Tonha ⁻¹)
Labranza cero	13	90	5,77
Labranza vertical	12	36	5,58
Arado de cincel-disco	9	14	4,70
Labranza convencional	6	3	3,57

Fuente: Cook y Lewis, 1989

La FAO en el (2000) menciona que una de las grandes ventajas en este sistema de labranza vertical, es que el suelo queda normalmente con una buena cobertura de rastrojo de más del 30 % sobre la superficie.

La eficacia operativa del sistema de labranza vertical es más alta que la de labranza convencional, sobre todo debido a que el vibro-cultivador trabaja con mayor velocidad y tiene mayor ancho de trabajo que la rastra de discos. Por consiguiente, es posible preparar entre 50% hasta 80% más de superficie por día con labranza vertical, si se compara con labranza convencional. (Barber *et al.*, 1993).

Es importante destacar que este tipo de labranza es un sistema ventajoso en un amplio rango de tipos de suelo, inclusive en los que tienen problemas de drenaje y

que son susceptibles a la compactación. Oussible *et al.*, (1992), mencionan que el incremento en la compactación podría restringir el abastecimiento de agua, aire, y la disponibilidad de nutrimentos.

En la implementación de estos arados es importante tener en cuenta la humedad del suelo, que es un factor que incide directamente en la fuerza de tracción y requerimiento de potencia en la preparación de este. Los suelos secos presentan agregados con alta cohesión, siendo más alta en suelos arcillosos, requiriendo mayor fuerza de tracción para ser disturbados. La cohesión disminuye a medida que el contenido de agua incrementa, aumentando entonces la adhesión de las partículas del suelo sobre la superficie de la herramienta y afectando la fuerza de tracción. (Mouazen y Ramón, 2002).

2.2.9 Cinceles, su modo de acción, fuerzas y ajustes

Los cinceles, por su modo de acción, son la herramienta de labranza que más se parece al arado de madera. Al introducir el cincel en el suelo causa la compresión de éste. El suelo finalmente escapa hacia arriba dejando una zona de rotura que parte de la punta del cincel aproximadamente en un ángulo de 45° en suelos secos. Por lo tanto, el cincel sirve para roturar el suelo. Los cinceles usados con tracción animal se limitan prácticamente a este tipo de acción. Aplicando velocidades mayores el suelo es también movido a los lados. Esta acción puede ser apoyada por ciertos tipos de punta del cincel. Por esta razón los arados de cinceles para tractores usados a velocidades alrededor de 10 - 12 kmh^{-1} tienen una buena acción mezcladora.

Las fuerzas que actúan sobre un cincel en el suelo dependen mucho de la forma y sobre todo del ángulo de ataque. Un ángulo de ataque agudo mejora la penetración y reduce la fuerza de tracción. Además mejora el efecto de la roturación y la mezcla del suelo porque lleva una parte del material del suelo de horizontes inferiores hacia arriba. Esta característica puede ser una desventaja en situaciones donde la punta

del cincel toca material húmedo de horizontes inferiores y los transporta a la superficie en forma de pequeños cilindros o terrones que después son difíciles de desmenuzar. Mientras el cincel simple no necesita mucha fuerza de tracción y se presta para la tracción animal, el uso de grupos de cinceles para la homogeneización del suelo y la mezcla a altas velocidades está limitada a tractores relativamente potentes. Esto resulta de la necesidad de cubrir con el implemento al menos el ancho del tractor y de usarlo a altas velocidades (Friedrich, 1997).

2.2.10 Formas de cinceles

Cinceles rígidos: 1. Los subsoladores son cinceles grandes y fuertes que pueden llegar hasta profundidades mayores de 1 m. Su uso por la alta fuerza de tracción necesaria se limita al tiro con tractores. Se distingue la forma tradicional (vertical), la forma parabólica y el "Paraplow". Para mejorar la roturación y emparejar el perfil del horizonte de trabajo de cinceles verticales o parabólicos se pueden usar rejas de alas abiertas.

2. Arados de cincel, existen tanto para tracción animal con un máximo de tres cinceles o para tractores. Son usados para roturar y - en el caso del tractor - mezclar la capa arable. Según el tipo de suelo y el efecto deseado pueden ser equipados con una variedad de puntas. Sin embargo para esta labor normalmente se usan puntas angostas.

3. Cultivadores con cinceles rígidos, son usados para la labranza secundaria y el deshierbe, para tracción animal con hasta cinco cinceles y para tractor. Las rejas en este caso son más anchas como pata de ganso o alas abiertas con anchos de hasta más de 1 m para el control superficial de malezas en zonas áridas.

Cinceles vibratorios; Estos cinceles son tanto para tracción animal como para uso con tractor. Las formas más pesadas se usan para mezclar el suelo, las más livianas para la labranza secundaria, la preparación de la cama de siembra y el deshierbe (Friedrich, 1997).

2.2.11 Factores que determinan la fuerza de arrastre en las herramientas de labranza

Las fuerzas aplicadas a una herramienta de labranza para producir un efecto dado en el suelo pueden ser medidas con exactitud, pero no se puede predecir con confiabilidad los efectos de los cambios en el diseño de la herramienta. Consecuentemente, no debe ser una sorpresa saber que el diseño de los equipos de labranza es más un arte que una ciencia (Ashburner y Sims, 1984; Gill and Vanden Berg, 1967; Triplett and Van Doren, 1977).

La fuerza de arrastre depende básicamente de cinco factores principales: los parámetros suelo/suelo; los parámetros suelo/interface; la forma de la herramienta; la velocidad de avance; y la vibración de la herramienta.

2.2.11.1 Los parámetros suelo/suelo y suelo/interface

Se destaca la importancia de la humedad del suelo y su incidencia sobre la factibilidad y eficiencia de labranza, y sobre la resistencia de la masa del suelo y los agregados, como se muestra en la figura (2.2) y (2.3). Las posibilidades de manejar los parámetros suelo/interface removiendo la oxidación y lubricando la cara del diente como se muestra en la figura (2.4).

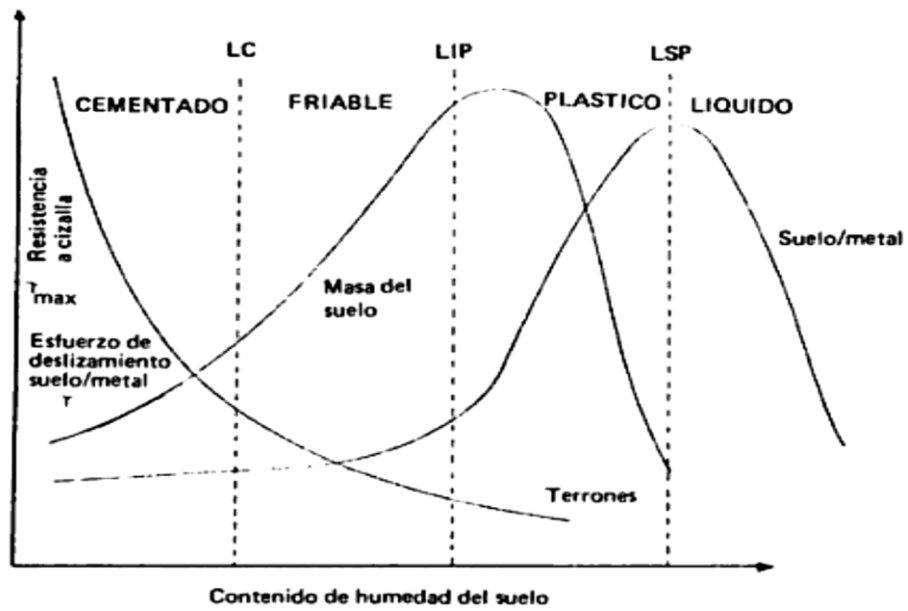


Figura 2.2 Relación del contenido de humedad del suelo con la resistencia de terrones, la masa del suelo y al deslizamiento al interfaz suelo/metal (Ashburner y Sims, 1984).

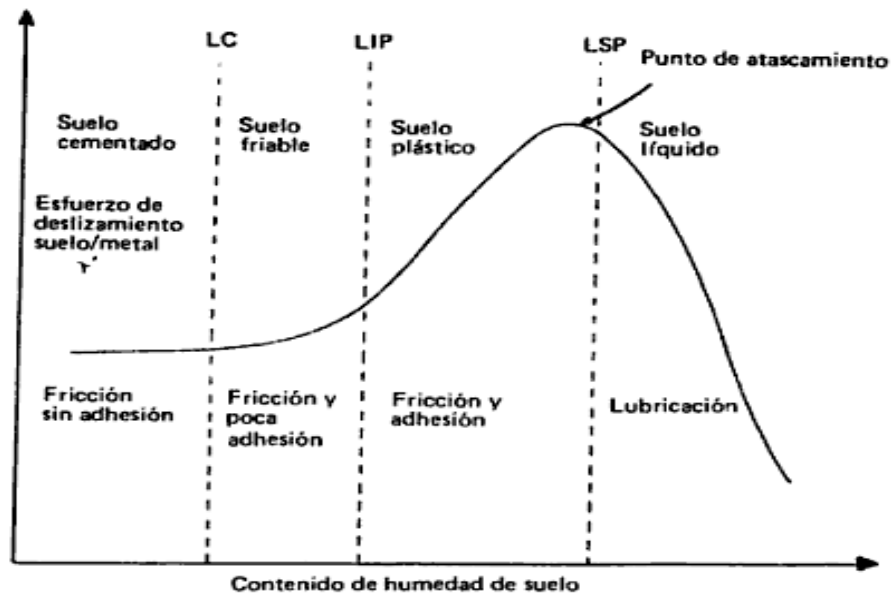


Figura 2.3 Efectos del contenido de humedad sobre el esfuerzo de deslizamiento suelo/metal (Ashburner y Sims, 1984).

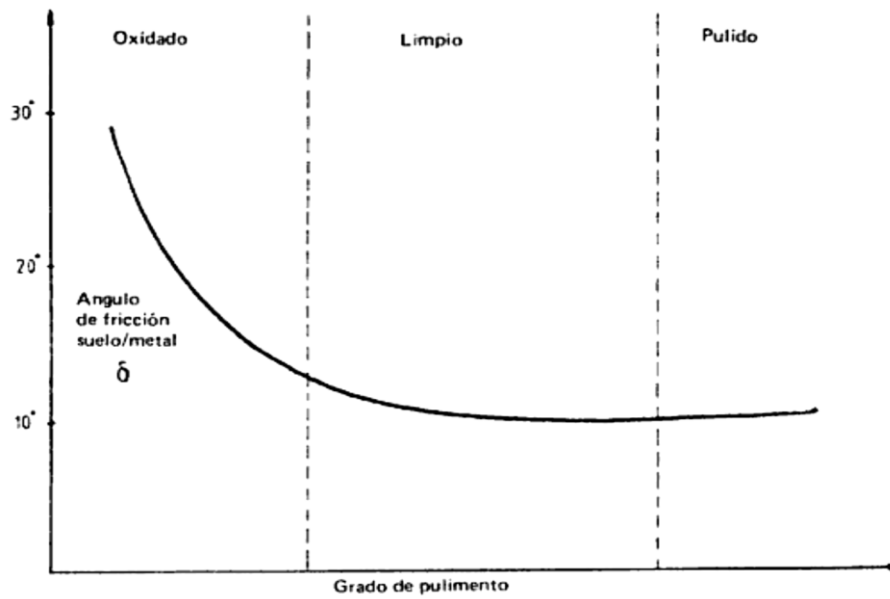


Figura 2.4 Efecto del pulimento de la superficie de contacto sobre el ángulo de fricción suelo/metal (Ahsburner y Sims, 1984).

2.2.11.2 La forma de la herramienta

El ángulo de ataque y el ancho del diente afectan la fuerza de arrastre, como se muestra en la figura (2.5) y (2.6). Generalmente la fuerza de arrastre aumenta suavemente para los ángulos de ataque de 10° hasta los 50°, pero ángulos mayores producen un fuerte crecimiento de la fuerza de arrastre; ello significa que debe seleccionarse un ángulo menor que 50°, siempre y cuando se efectúe la labranza deseada (McKyes, 1985).

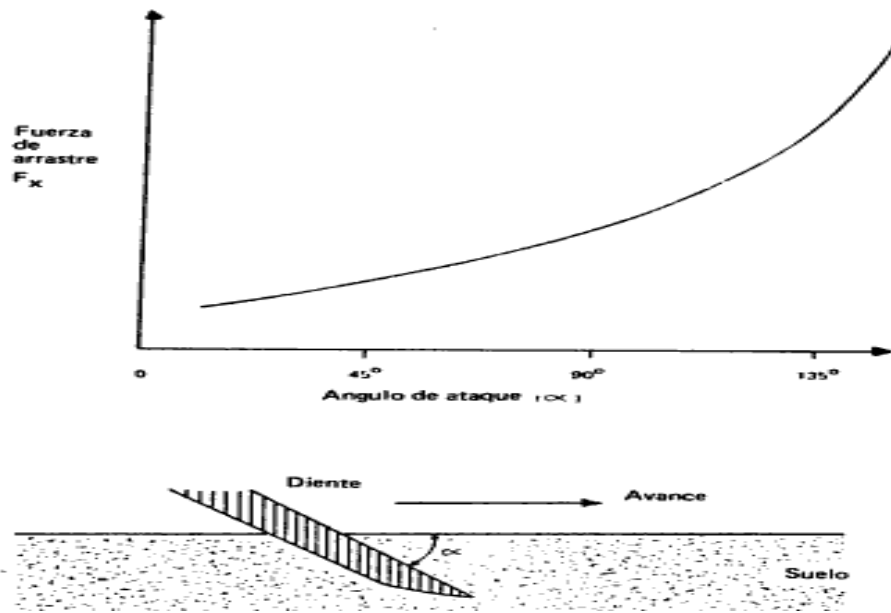


Figura 2.5 Efecto del ángulo de ataque (α) sobre la fuerza de arrastre (F_x) de un diente (McKyes, 1985).

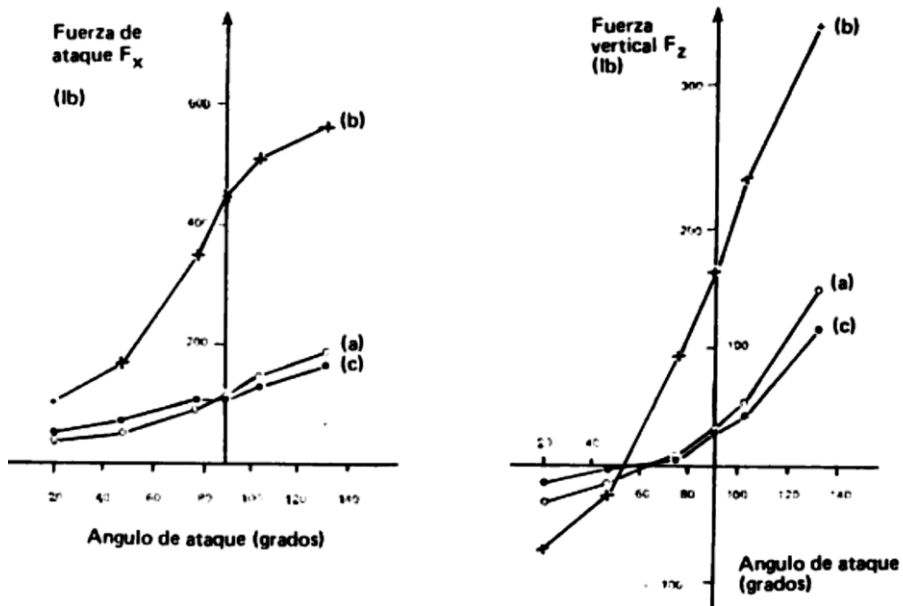


Figura 2.6 Relación del ángulo de ataque de un diente angosto con la fuerza de arrastre F_x y la fuerza vertical F_z ; a) arena con 3.8% de humedad; b) franco arenoso con 9.4 de humedad; c) arcilla con 18.2% de humedad (McKyes, 1985).

La resistencia del suelo aumenta con la sobrecarga de la superficie y la compactación. Por lo tanto para minimizar la fuerza de arrastre de la herramienta no debería seguir las huellas del tractor, aunque esto no siempre es deseable según los objetivos de la labranza. El diseño de la herramienta puede disminuir los efectos innecesarios de una sobrecarga por una selección cuidadosa del espaciamiento de los dientes, el diseño de la estructura y la ubicación de las ruedas de profundidad como se muestra en la figura (2.7) y (2.8), (Ashburner y Sims, 1984; McKyes, 1985).

También es importante proporcionar un adecuado restregamiento del suelo por el diente, esto significa que las curvas deben de ser ligeras, empezando con un ángulo de ataque pequeño y luego aumentándose.

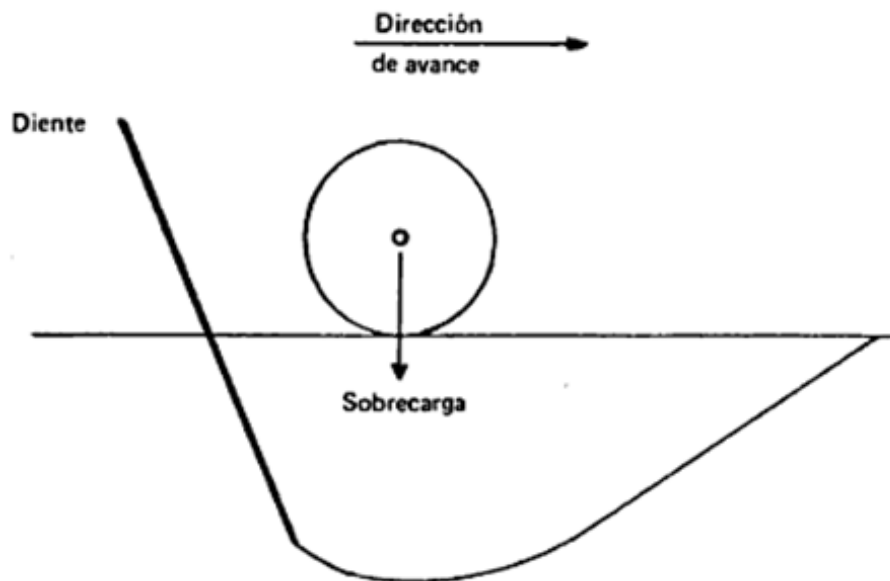


Figura 2.7 Manera en que la mala ubicación de una rueda de soporte de la herramienta sobrecarga la zona de falla del suelo y aumenta la fuerza de arrastre (Ashburner y Sims, 1984).

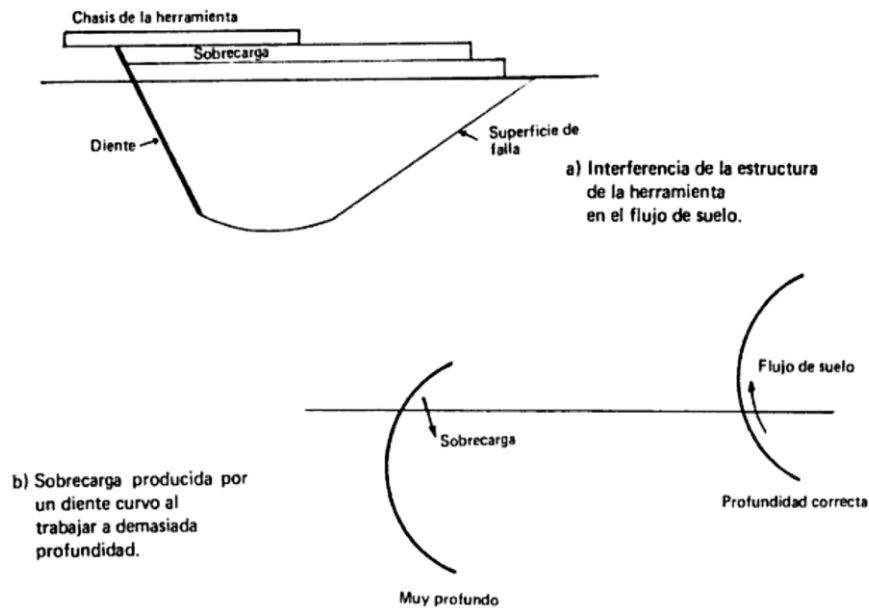


Figura 2.8 El diseño o uso inapropiado de las herramientas puede producir una sobrecarga innecesaria que aumenta la fuerza de arrastre (Ashburner y Sims, 1984; McKyes, 1985).

2.2.11.3 Velocidad de avance

Una mayor velocidad de avance de la herramienta ocasiona un aumento en la aceleración de las partículas y agregados del suelo. Por esta razón la fuerza de arrastre tiende a ser proporcional a la velocidad al cuadrado (Gill and Vanden Berg, 1967; Kepner *et al.*, 1978).

Summers *et al.*, (1986), mostraron que la fuerza de arrastre es lineal con la velocidad en los arados de cincel y de discos, pero que es proporcional al cuadrado de la velocidad en el arado de vertederas.

Debe destacarse también la importancia de la humedad en la relación resistencia/velocidad. Parece ser un contenido de humedad algo menor que el límite inferior de plasticidad, LIP, la resistencia es aproximadamente proporcional a la velocidad al cuadrado como se muestra en la figura (2.9). En cambio con un mayor contenido de humedad la relación es exponencial, mostrando muy poco aumento en la fuerza de arrastre con velocidades mayores a unos 5 ms^{-1} , probablemente debido

al comportamiento del suelo como una clase especial del líquido viscoso (De Dios, 1972; Mc Kyes, 1985)

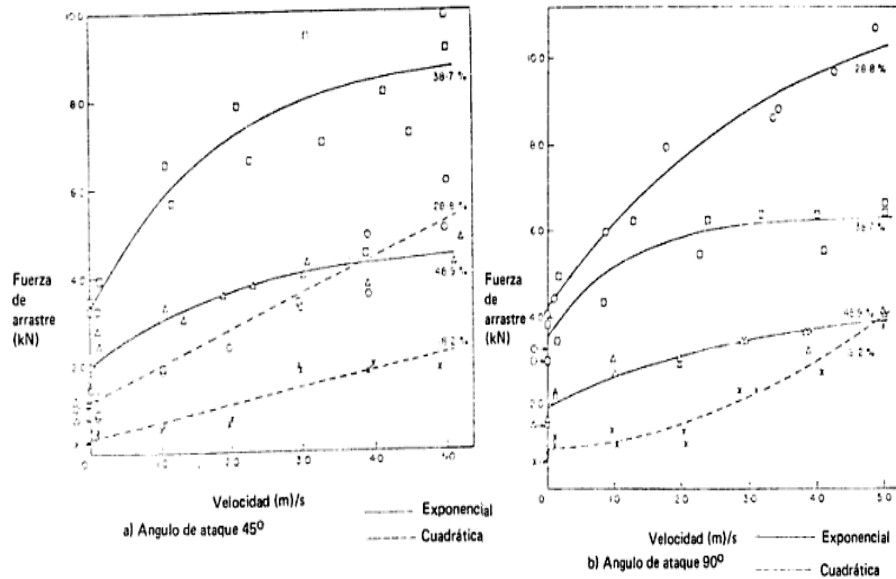


Figura 2.9 La relación de la fuerza de arrastre de un diente con la velocidad depende del contenido de humedad, siendo una relación cuadrática con baja humedad y exponencial a alta humedad. Los resultados son para suelo arcilloso con LIP 39%. Humedad: X 18.2%, O 28%, □ 38.7%, Δ 48.9 % (de Dios, 1972; McKyes, 1985).

2.2.11.4 La vibración de la herramienta

Se han sugerido dos mecanismos para explicar la reducción de la fuerza de arrastre: en suelos arenosos la vibración disminuiría la reacción suelo/interface, y quizás también la reacción entre partículas y agregados del suelo reduciendo el componente de resistencia debido a la fricción; en los suelos arcillosos la vibración produciría una migración del agua del suelo hacia la punta del diente (Ashburner y Sims, 1984; McKyes, 1985).

Aunque la vibración realiza un mejor mullimiento del suelo y puede reducir la fuerza de arrastre, normalmente la potencia total de la herramienta es mayor que en el caso de una herramienta simple (Ferrando y Smith, 1985).

2.2.11.5 Consumo de energía en la labranza

Edmundo (1987), menciona que la determinación para la demanda energética de una operación de labranza exige conocer el valor de la fuerza por unidad de ancho necesaria para arrastrar el equipo en el campo. Este valor de la fuerza y la velocidad de trabajo permiten obtener la potencia necesaria para accionar, un equipo de un tamaño determinado. Estas relaciones se muestran en la ecuación (2.1).

$$Potencia = \frac{Fuerza * Velocidad}{FPT * 3.6} \dots\dots\dots (2.1)$$

El gasto energético por *ha* se establece asociando el valor de la potencia con la capacidad efectiva de trabajo (*CET*) del equipo, que tiene incluida una estimación de la eficiencia de campo.

La potencia de trabajo requerida para trabajar con diversas herramientas es variable y depende de varios factores. Entre ellos se encuentra la textura y contenido de humedad del suelo, la velocidad y profundidad de trabajo, la naturaleza del material de la herramienta deslizante, sea metálico, plástico o madera. A pesar de la posibilidad de poder predecir la fuerza de arrastre de ciertas herramientas bajo condiciones específicas, una predicción práctica y realista es difícil por la variabilidad de las condiciones en un campo agrícola. Normalmente se encuentran en zonas muy húmedas y mal drenadas, compactadas, con pendiente, piedras y otros obstáculos que obligan al operador a cambiar la velocidad de trabajo (Ashburner y Sims, 1984).

Sin embargo, es importante manejar algún procedimiento que permita estimar la potencia requerida para trabajar con diversas herramientas en condiciones normales y así permitir la selección de tractores y equipos en forma racional, lo cual también, permite ejecutar un análisis económico del sistema de mecanización seleccionado (de Dios, 1972; Hunt, 1987).

La humedad del suelo es un factor que incide directamente en la fuerza de tracción y requerimientos de potencia en la preparación del suelo. Suelos secos presentan agregados con alta cohesión, siendo más alta en suelos arcillosos, requiriendo mayor fuerza de tracción para ser disturbados. La cohesión disminuye a medida que el contenido de agua aumenta en el suelo (Mouazen y Ramón, 2002), aumentando entonces la adhesión que las partículas del suelo sobre la superficie de la herramienta y afectando la fuerza de tracción.

Arvidsson *et al.*, (2004) encontraron que el contenido de agua adecuado para las labores de labranza es cercano al límite plástico de suelo; también incluyeron que la profundidad de trabajo aumenta a mayor contenido de humedad del suelo, disminuyendo la resistencia específica. Por otra parte, la labor en un suelo seco favorece la formación de terrones grandes (De Toro y Arvidsson, 2003) y suelos con contenido de agua superior al límite plástico son fácilmente deformados y compactados.

Camacho y Rodríguez (2007), midieron el área transversal del suelo disturbado, la profundidad de trabajo, el ancho de trabajo, la fuerza de tracción y la resistencia específica para diferentes implementos de labranza con tres contenidos de agua en el suelo y tres velocidades de operación, indicando que el contenido de agua afectó todos los implementos de labranza, destacando el arado de discos y el arado de cincel vibratorio, en la cual muestra que el arado de cincel rígido es energicamente más eficiente para preparar el suelo, con una resistencia específica baja y una mayor área transversal de suelo disturbado.

Martínez *et al.*, (2002) presentan una serie de ecuaciones que pueden servir como herramienta de soporte en la toma de decisiones para la selección y operación de implementos de labranza concluyendo que los modelos resultantes pueden utilizarse con fines de predicción.

Con base en resultados estadísticos se determinó que entre la intensidad de labranza y la energía utilizada ($kWha^{-1}$) para cada tratamiento, existe una relación significativa cuyo coeficiente de determinación ($R^2 = 0.935$). Este indica una alta dependencia entre estos dos parámetros, por lo que se propone la ecuación 1 para estimar el consumo energético requerido al preparar el suelo en función de la intensidad de labranza originada por un implemento determinado. Además las ecuaciones (2.2), (2.3), (2.4) y (2.5) para la estimación del requerimiento energético con los implementos para ellas especificados.

$$RE = -3.123 + (0.5512)(IL) \quad R^2 = (0.935) \dots\dots\dots (2.2)$$

La ecuación (2.2) para los arados subsolador y de cinceles, cuando el ancho de corte de cada timón es menor o igual que la distancia (o separación) entre los timones (cuando en la superficie no queda terreno sin alterar):

$$RE (kW ha^{-1}) = -3.123 + (183.733) (PPL) - [(91.876) (PPL) (Dt)] / Act \dots\dots\dots (2.3)$$

La ecuación (2.4) es utilizada cuando la distancia entre los timones es mayor que el ancho de corte de cada timón (en la superficie queda terreno sin alterar), la ecuación se reduce a:

$$RE (kW ha^{-1}) = -3.123 + [(27.56) (Act)] / Dt \dots\dots\dots (2.4)$$

La ecuación (2.5) es para el arado de discos y la rastra de discos:

$$RE (kW ha^{-1}) = -4.9052 + (183.733) (PPL) - [(2.5722) (Dd)] / A \dots\dots\dots (2.5)$$

La ecuación (2.6) para el arado de vertedera:

$$RE (kW ha^{-1}) = -4.9052 + 183.73 PPL - (2.5722)(Ar/A) \dots\dots\dots (2.6)$$

Las ecuaciones propuestas están referidas a su intensidad de labranza, la cual presenta un valor diferente para cada implemento y condición de laboreo, por lo que los resultados pueden usarse para comparar la eficiencia de trabajo de los implementos que se utilizan para realizar la preparación del suelo, tanto en función del grado de preparación, como el consumo energético, o bien para estimar la energía requerida para preparar un predio determinado.

Por su parte, Stafford (1983), desarrolló modelos para la predicción la acción de fuerza en las herramientas de labranza, los cuales toman en cuenta diferentes tipos de disturbio o falla de suelo que pueden ser causados por dichas herramientas. Muestran también que en falla frágil, los efectos de velocidad son debidos a la fuerza de inercia y tipos de efecto de fricción del suelo-metal.

2.3 Profundidad crítica

Los modelos de corte del suelo, ya sea en dos o tres dimensiones, han asumido que el suelo se mueve hacia arriba en todo el rango de profundidad de la herramienta de corte, por ejemplo las figuras, (2.10), (2.11) y (2.12). Se ha observado que este no siempre es el caso, especialmente en donde un implemento de corte angosto está operando a profundidades en un suelo plástico. Kostristsyn (1956) reportó observaciones de este fenómeno el cual ha sido llamado "la profundidad crítica", y sugiere a partir de su experiencia, que esta profundidad es generalmente de siete a ocho veces el ancho de la herramienta.

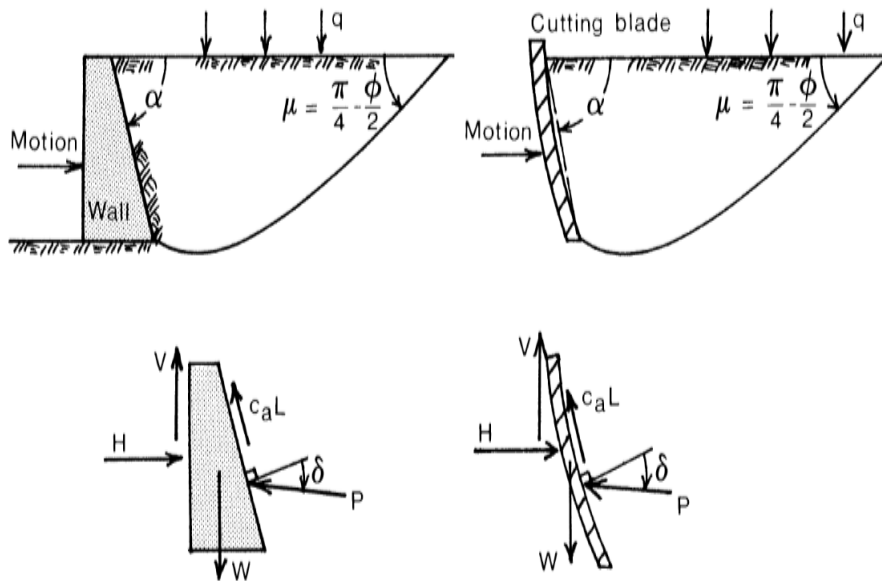


Figura 2.10 Una comparación entre un muro de contención y una falla de suelo con cuchilla de corte (McKyes, 1989).

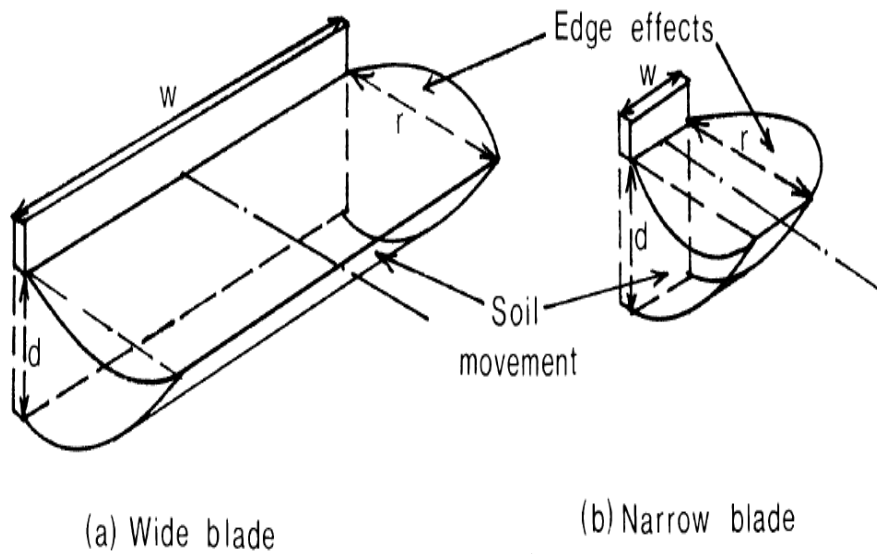


Figura 2.11 La diferencia en movimiento patrón de suelo entre una cuchilla ancha y una cuchilla de corte estrecha (McKyes, 1989).

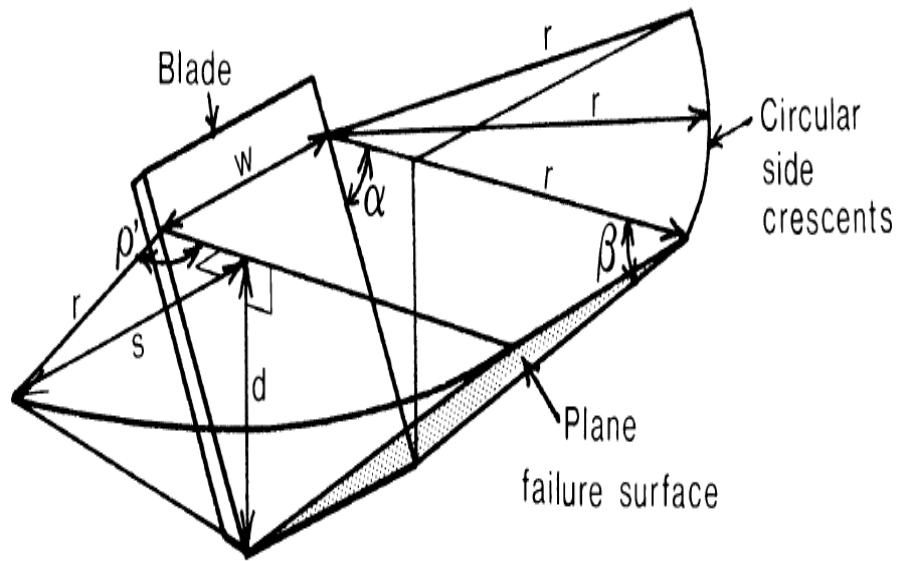


Figura 2.12 Modelo de falla del suelo tridimensional (McKyes and Ali, 1977).

$$r = r \sin \rho' = d \sqrt{\cot^2 \beta + 2 \cot \alpha \cot \beta} \dots \dots \dots (2.7)$$

La figura (2.13) ilustra esquemáticamente lo que ocurre en el suelo cuando una profundidad crítica está presente. La profundidad crítica d_c (siglas en inglés) se puede definir aproximadamente como un punto debajo del cual el suelo es desplazado por una herramienta principalmente a lo largo de líneas horizontales. Por encima de la profundidad crítica, el suelo se mueve horizontalmente y hacia arriba como en los modelos anteriores. Informes del valor de la profundidad crítica han variado considerablemente dependiendo del tipo de suelo en cuestión.

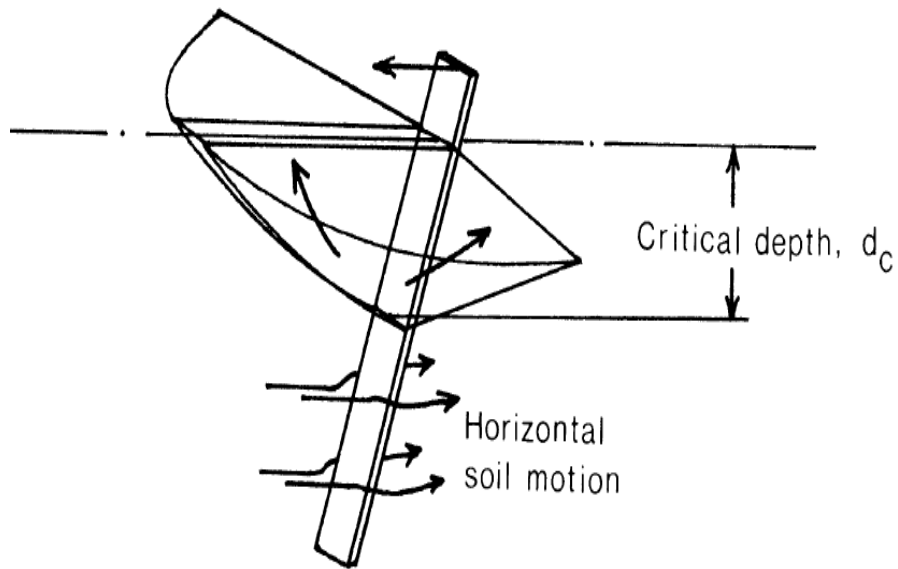


Figura 2.13 Ilustración de la profundidad crítica en el corte del suelo (O'Callaghan and Farrelly, 1964).

O'Callaghan y Farrelly (1964) observaron profundidades críticas del mismo orden de las magnitudes, así como, del ancho, cuando evaluaron cuchillas verticales de acero en suelos plásticos arenosos y arcillosos. Usando herramientas similares, sin embargo, Miller (1971) encontró profundidades críticas hasta 14 veces la dimensión del ancho de la cuchilla en arena dura, y Godwin (1974) observó la profundidad crítica en rangos de ancho de cuchilla con una variación de 10 a 16, dependiendo del ángulo de inclinación de la cuchilla en un suelo franco arenoso friable.

Godwin (1974), también postuló un modelo con el cual el régimen de fuerzas en el suelo puede ser analizado cuando una profundidad crítica está presente. Como se representa en la figura (2.14) el suelo es movido a los lados de la herramienta en mayores profundidades que el crítico, a lo largo de trayectorias espirales logarítmicas, similar al modelo de fundación de falla profunda postulado por Meyerhof (1951). La efectividad final de las espirales a lo largo de la cual se mueve el suelo se localiza en ángulo (teta) por detrás de la cara de la cuchilla. En la parte posterior de la herramienta, una presión horizontal se supone que actúan sobre el suelo, y se calcula como "en reposo" presión de tierra (fórmula). La fórmula Meyerhof (1951) se

utiliza entonces para calcular la presión horizontal, q' , que actúa sobre la cara de la herramienta por debajo de la profundidad crítica ecuaciones (2.8), (2.9) y (2.10).

$$q' = cN'_c + p_0N'_q = cN'_c + \gamma z K_o N'_q \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$N'_q = \left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] e^{2(\pi/2 + \phi) \tan \phi} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$N'_c = \cot \phi \left[\left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] e^{2(\pi/2 + \phi) \tan \phi} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

La integración de esta fuerza horizontal de la profundidad crítica hasta la parte inferior de la cuchilla se obtiene la fuerza total Q ecuación (2.11) que actúa sobre esta parte de la herramienta.

$$Q = [cN'_c(d - d_c) + \frac{\gamma}{2} K_o N'_q (d^2 - d_c^2)] w \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

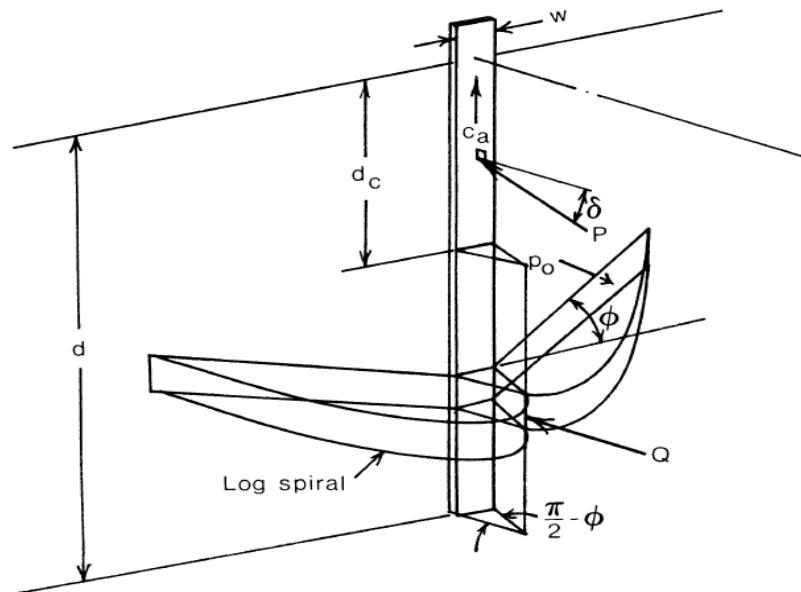


Figura 2.14 El modelo de la fuerza para la falla de profundidad crítica de Godwin (1974).

Para la fuerza P en la parte de la cuchilla por encima de la profundidad crítica, se utiliza el modelo tridimensional, ecuación (2.7). Esto es la fuerza total horizontal requerida para mover el implemento, es la suma de Q por debajo de la profundidad crítica y H_1 por encima de ella, como se muestra a continuación.

$$H = Q + H_1 = Q + P \sin(\alpha + \delta) + C_a d_c w \cot \alpha \dots\dots\dots (2.12)$$

Además, Godwin (1974) observó que la localización de la profundidad crítica podría ser predicha teóricamente usando el modelo anterior. Si los valores de prueba de la profundidad crítica se eligen, las fuerzas P y Q que actúan por encima y por debajo de esta profundidad pueden hallarse. Combinando en términos como en la ecuación (2.12) nos da la fuerza total, estimando la fuerza de tiro de la herramienta. Siguiendo el principio de falla de suelo en la trayectoria de menor resistencia, es lógico que la profundidad crítica sea la que resulta en el menor requerimiento de fuerza en la herramienta. Por lo tanto, el ensayo donde la profundidad crítica da la menor fuerza total H , es igual.

2.4 Arreglos espaciales de cinceles

Es común escuchar que reduciendo el espaciamiento horizontal entre púas el cincel realiza un mejor trabajo pero esta práctica en general es resistida por el productor ya que al disminuir el ancho de labor del implemento se ve reducida la capacidad de trabajo del equipo de labranza.

Se piensa que al reducir la distancia entre púas, la interacción producida entre ellas arrojaría como resultado una menor superficie individual a trabajar, lo que se

reflejaría en una menor potencia global demandada por la herramienta (Marrón, 1998).

Esto se ha verificado en escarificadores de montantes rígidos siempre y cuando el ángulo de ataque de las púas se mantenga constante y se trabaje a velocidades de alrededor de $1,5 \text{ kmh}^{-1}$ (Godwin *et al.*, 1984). A velocidades normales de trabajo de campo (aproximadamente 7 kmh^{-1}) la relación encontrada ha sido inversa (Riethmuller y Jarvis, 1986).

El espaciamiento entre montantes produjo efectos sobre el esfuerzo de tiro demandado por el arado de cinceles para los distintos tipos de montantes empleados. Al disminuir el espaciamiento entre montantes desde 0.35 m hasta 0.20 m aumentó el esfuerzo de tiro. La diferencia fue del orden del 12 % mayor. La potencia demandada por el arado de cinceles fue afectada por el tipo de montante, para los distintos espaciamientos empleados. En general, a medida que disminuye el espaciamiento entre montantes aumenta la resistencia específica del implemento. (Marrón, 1998).

Bowen (1981) expuso que para una gran cantidad de implementos con púas fijas, púas flexibles, cinceles y subsoladores; los grados de desmenuzamiento en función del espacio entre cuerpos, profundidad de trabajo, tipo y ancho del diente y las condiciones del suelo. Este autor concluyó que el espacio entre cuerpos no debe ser mayor de 1,5 veces la profundidad y el fragmentado del suelo se puede lograr cuando el contenido de humedad es adecuado. Esto corrobora los resultados obtenidos en este estudio. Ripoll (1975) utilizó nueve métodos variando las posiciones y número de cuerpos de un arado de cincel, desde dos cuerpos hasta nueve cuerpos rígidos estándar. Un modelo con cinco cuerpos en V invertida, el cual lo recomendó para rotulación y cincelado normal; un modelo con siete cuerpos lo recomendó para alzado de rastrojos.

El uso adecuado del arado de cincel es función de la distancia entre cuerpos y el ordenamiento de los cuerpos en el bastidor. El arado de cincel produce aplicabilidad en todas las áreas de comparación. Mediante el empleo del arado de cincel, con adecuada calibración en el conjunto tractor-implemento y la posición y distancia entre los cuerpos, se podría obtener un control agronómicamente satisfactorio de malezas sin enterrarla, dejándola como material de cobertura (Hossne, 2007).

2.5 Transductores de fuerza

La idea de emplear anillos octagonales extendidos (EOR por sus siglas en inglés) en un sistema de medición fue introducido por primera vez por Lowen *et al.*, (1951). Hoag y Yoerger (1975) derivaron ecuaciones analíticas de distribución de fuerzas para transductores simples y octagonales de anillos extendidos para diferentes cargas y condiciones límites utilizando el método de tensión de energía.

Se determinaron dos ecuaciones para el momento de flexión en la sección del anillo prolongado, mismas que se utilizan para el cálculo del momento en la sección utilizando el (EOR). McLaughlin (1996) detectó algunos errores en las ecuaciones de Hoag y Yoerger (1975) y las corrigió.

Godwin (1975) diseñó un transductor octagonal de anillo extendido para medir las fuerzas de reacción del suelo utilizando herramientas en dos direcciones, así como el momento en el plano de estas fuerzas. El reportó una buena linealidad, baja sensibilidad cruzada y la histéresis para el transductor. También encontró que las sensibilidades prácticas de las galgas extensiométricas fueron mucho mayores que los valores obtenidos a partir de ecuaciones analíticas.

O'Dogherty (1975) diseñó un transductor para determinar las fuerzas de corte y verticales usando una cuchilla en remolacha azucarera utilizando el anillo octogonal extendido. Informó de una buena linealidad, histéresis baja en ciclos de carga y

descarga, y sensibilidades cruzadas entre 4.1 y 6.5% para las fuerzas de corte y vertical, respectivamente en el proceso de calibración del transductor.

Godwin *et al.* (1987) diseñó tres transductores de (EOR) usando tres diferentes materiales con diferentes relaciones de radio y diferentes espesores del anillo (r/t). Ellos encontraron que los sistemas desarrollados de instrumentación tenían suficiente resolución para medir el comportamiento dinámico vertical del suelo acoplado a un enganche de pivote único.

Godwin *et al.*, (1993) diseñó un dinamómetro utilizando dos (EOR) para medir las fuerzas y momentos ejercidos en herramientas de labranza. Utilizaron dos (EOR) en configuración espalda con espalda, donde los ejes longitudinales formaban ángulos de 90°. Ellos reportaron una excelente linealidad entre las fuerzas y momentos aplicados, y la salida de voltaje en el puente, una pequeña cantidad de efecto de histéresis entre carga y descarga de las curvas de calibración, así como, una sensibilidad cruzada menor del 4%.

O'Dogherty (1996) derivó una fórmula para determinar el espesor del anillo del transductor (EOR) mientras utilizaba datos de los transductores diseñados previamente por los investigadores. El introdujo un procedimiento gráfico para el diseño (EOR) basado en parámetros geométricos del anillo.

McLaughlin *et al.*, (1998) diseñó y fabricó un octagonal de doble anillo extendido (DEOR por sus siglas en inglés) acoplado a una barra de tiro. Ellos calibraron el transductor utilizando métodos de carga uniaxiales y triaxiales. Los autores derivaron la regresión de un modelo para predecir las fuerzas de tiro, verticales, y las cargas laterales, e informaron de las sensibilidades cruzadas del sensor de 1.9 y 7.0% para las fuerzas de tiro y verticales respectivamente.

Kheiralla *et al.*, (2003) desarrollaron un dinamómetro de tres puntos de enganche automático utilizando un transductor (EOR). Ellos reportaron una sensibilidad primaria horizontal y vertical de 25.19 kN μ strain-1 y 25.60 kN μ strain-1 para el sensor (77.75% y 89.77% de las sensibilidades teóricas calculadas).

Korkut (2003) desarrolló un dinamómetro para medir las componentes de fuerza durante el corte de un metal en tres direcciones y se encontró que el dinamómetro puede utilizarse de manera fiable para la medición de fuerzas de corte.

Khan *et al.*, (2007) diseñó un sistema de transductor biaxial (EOR) para medir las fuerzas tractor-implemento, mostraron que la sensibilidad cruzada del sensor fue menor a 1.5% para la mayoría de los casos.

Se puede decir que la mayoría de los sistemas de medición se pueden dividir en tres partes (Campos *et al.*, 2000).

1. **Etapa detectora-transductora**, detecta la variable física y efectúa una transformación, ya sea mecánica o eléctrica para convertir la señal de una forma más manejable. Generalizando el concepto, un transductor es un dispositivo que transforma el efecto físico en otro, en gran mayoría de los casos, la variable física se transforma en una señal eléctrica, ya que ésta es la forma de señal más fácilmente medible.

2. **Etapa Intermedia**, modifica la señal que proviene del transductor, ya sea por amplificación, filtrado u otros medios para tener una salida deseable.

3. **Etapa final o terminal**, indica, graba o controla la variable que se desea medir.

Mojica (2000) describe que un transductor es un dispositivo que ha sido diseñado para reaccionar ante un estímulo físico y proporcionar una salida que puede ser un

desplazamiento o por lo regular un voltaje, que posteriormente puede ser comparado o analizado dependiendo de los requerimientos del sistema donde se utiliza.

Moo (1999) señala que los transductores (sensores) son elementos de transformación de una variable física correspondiente a un fenómeno, a una señal eléctrica que describe ese comportamiento y su desempeño se debe a los elementos de captura, estos solo trabajan con señales eléctricas. Generalmente los transductores son empleados en la medición de magnitudes físicas, como por ejemplo, temperatura, presión, longitud, etc.

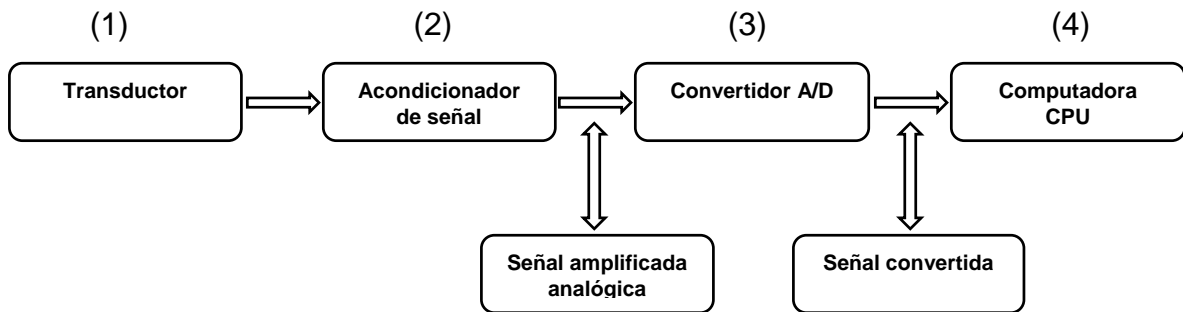


Figura 2.15 Diagrama de adquisición y procesamiento de datos (Pacheco, 2012).

En la figura (2.15) se muestra un diagrama de bloques de un sistema típico de medición empleado en la correlación de datos.

2.6 Registro y análisis de información

Campos *et al.*, (2000), describieron la necesidad de un sistema de alta velocidad de muestreo para la reproducción de las fuerzas de reacción del suelo que incluye transductores de magnitudes de fuerzas y su localización; en cuanto al hardware en varias investigaciones se puede identificar en todas y cada una de ellas, un sistema de acondicionamiento de señales provenientes de los sensores de fuerzas, un

sistema convertidor analógico a digital y software para su funcionamiento (Moo, 1999). El anterior sistema permite reproducir en términos de energía lo que está sucediendo en interacción suelo herramienta. Moo (1999) desarrolló un sistema de adquisición de datos de laboratorio y campo que permite evaluar el desempeño de los implementos de labranza, además muestra el diseño de medidores de velocidad y desplazamiento. Campos (1993) menciona que dentro de la adquisición de datos de laboratorio consta de un tanque de suelos, el cual el sistema y los transductores se adaptan a éste. Y para el análisis de información proveniente de los procesos de muestreo (conversión analógica a digital) utilizando la metodología del algoritmo de la transformada rápida de Fourier para la obtención de potencia espectral.

Kheiralla y Azmi, (2002) desarrollaron un sistema completo de adquisición de datos de instrumentación y fue desarrollado e instalado en un tractor Massey Ferguson 3060, tractor agrícola para poder mapear la energía y la demanda energética en la operación en campos de agrícolas en Malasia. El sistema de instrumentación es capaz de medir y visualizar información sobre la velocidad del motor, la velocidad de toma de fuerza, velocidad de avance, deslizamiento de las ruedas de accionamiento, acres trabajado, el consumo de combustible por hora, el consumo de combustible por hectárea, acres por hora, factor de costo, combustible consumido, el combustible restante, y la distancia. Los ensayos de campo muestran que el sistema es capaz de funcionar con éxito sin dar mucho problema. Todos los sensores son capaces de escanear y grabar el registro de datos en los entornos hostiles de campo. En la figura (2.23) se muestra el diagrama de bloques en donde se ven los componentes del sistema de adquisición de datos.

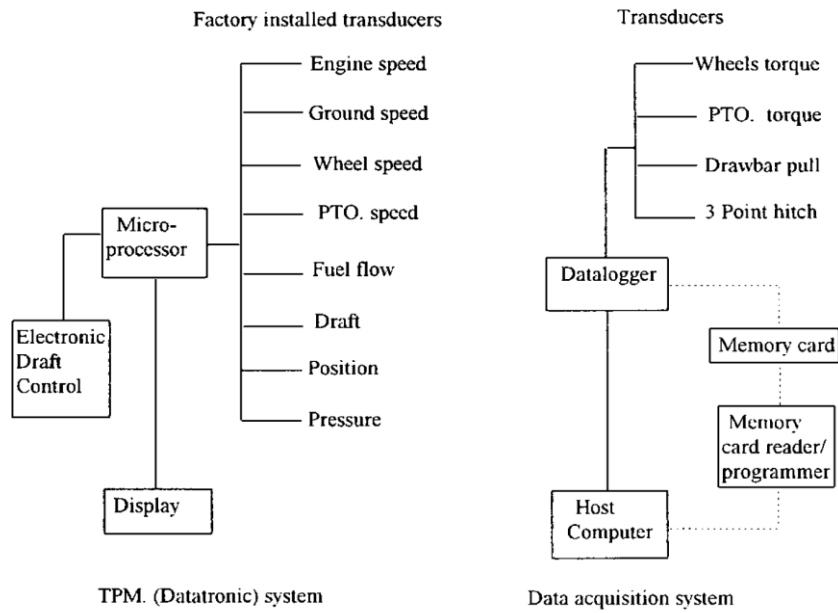


Figura 2.16 Diagrama de bloques del sistema de instrumentación del tractor (Kheiralla and Azmi, 2002).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Los fines de evaluación y diseño de un implemento agrícola integrado al tractor comienzan a partir del análisis de fuerzas de reacción del suelo sobre los implementos. El proceso de este análisis puede apreciarse en la figura (3.1).

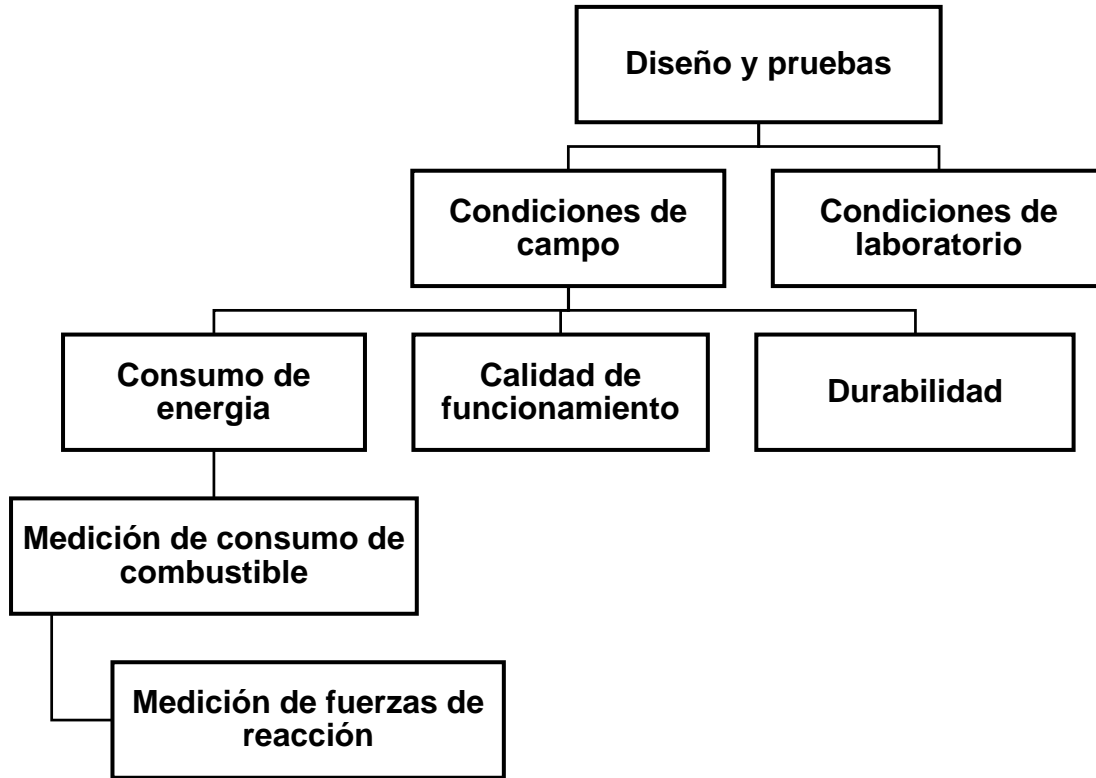


Figura 3.1 Medición de parámetros para pruebas de implementos bajo condiciones de campo (Hinojosa 2003).

También el realizar un análisis de perfil de cada uno de las repeticiones para determinar el área disturbada del suelo por el paso del implemento, para contrastarlo con la fuerza requerida de cada arreglo evaluado de los cinceles.

3.1 Localización del sitio de prueba

El presente trabajo de investigación se realizó en el campo experimental Rancho Navidad propiedad de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, la cual se encuentra ubicada en el municipio de Galeana, Nuevo León, México, en la coordenadas 100° 37' 31.39" longitud oeste y 25° 2' 19.60" latitud norte, a una altitud de 1885 msnm. Las características del sitio de prueba fueron un suelo de textura franco arenoso y contenidos medios de 47.5% arena, 45% limo y 6.8% de arcilla.

3.2 Prototipo articulado de cinceles

El diseño y modelado del prototipo fue elaborado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en el Departamento de Maquinaria Agrícola. El software utilizado fue el Creo Parametric 2.0, posteriormente, la empresa TECNOMEC AGRICOLA, BISON fue quien se encargó de la fabricación. Ver especificaciones en el cuadro (3.1).

3.3 Parámetros técnicos de diseño del prototipo

Cuadro 3.1 Especificaciones del prototipo utilizado parámetros técnicos de diseño del prototipo articulado de arado de cinceles.

Parámetros técnicos de diseño del prototipo articulado de arado de cinceles	
Ancho de trabajo	2.40 m
Dos secciones	Sección frontal fija para cuatro cuerpos de cinceles someros (única profundidad de 0.20 m) Sección articulada para dos cuerpos de cinceles profundos (0.20 m , 0.30 m y 0.40 m)
N° de cuerpos	Arreglo 1 (dos cinceles someros y un cincel profundo) Arreglo 2 (cuatro cinceles someros y dos cinceles profundos)
Espaciamiento mínimo entre cinceles	0.30 m
Espaciamiento máximo entre cinceles	0.60 m
Espaciamiento entre secciones	0.60 m
Forma de cincel	Curvos o semirectos
Dimensiones de la punta	0.0508 m (2")
Profundidad máxima de trabajo	0.40 m
Actuadores hidráulicos	2
Electroválvula proporcional	Marca Danfoss

Como se muestra en la figura (3.2) la sección frontal apta para dos o cuatro cinceles frontales y la sección articulada para uno o dos cinceles profundos con alas.

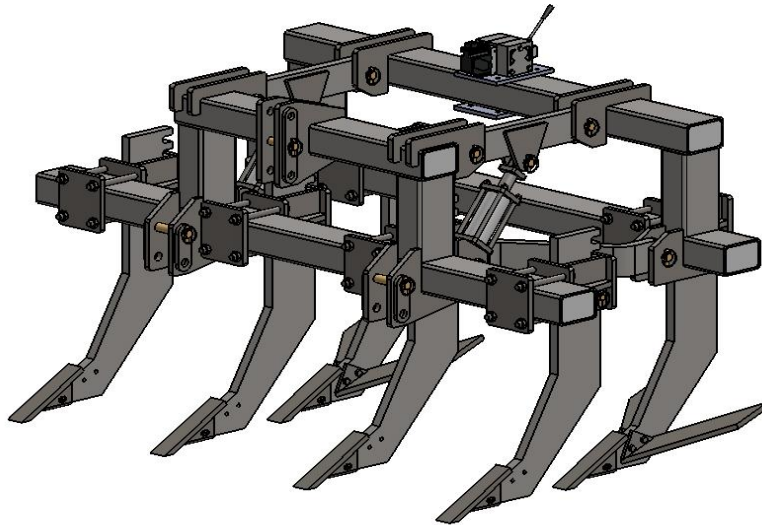


Figura 3.2 Diseño conceptual del prototipo articulado de arado de cinceles.

3.4 Implemento integral de labranza.” Eco-byson” desarrollado por la empresa Tecnomec Agrícola S.A. de C.V.

Cuadro 3.2 Especificaciones del implemento integral de labranza Eco-Byson.

Componente	Descripción
Chasis	Dimensiones 5.00 <i>m</i> de largo por 1.10 x 2.20 - 2.60 x 2.30 <i>m</i> de ancho.
7 cinceles	Dos líneas con 7 cinceles parabólicos con un largo de 31”, espesor de 0.04 <i>m</i> , la primera integrada por 3 cuerpos, la segunda integrada por 4 cuerpos ambas líneas con un espaciamiento de 0.70 <i>m</i> .
Lanza de tirón	Largo de 1.83 <i>m</i> del pivote hasta el enganche de la barra de tiro.
Actuadores hidráulicos	Integrado por tres actuadores lineales. Dos de ellas para el control de profundidad con una carrera máxima de 0.82 <i>m</i> y una mínima de 0.21 <i>m</i> , un tercero para la nivelación de la barra de tirón y para la nivelación del chasis durante el traslado con una carrera máxima de 0.30 <i>m</i> y una mínima de 0.20 <i>m</i> . La profundidad de los cinceles está regulada por las ruedas traseras R16-16.
Sistema hidráulico	El sistema de control de levante y nivelación está integrado por dos válvulas reguladoras de flujo, 4 válvulas check y dos válvulas divisoras de flujo.

En el cuadro (3.2) se muestran las especificaciones del marco del Eco-Byson, el cual se utilizó para realizar las pruebas del grupo tres de arreglos que se describen en el cuadro (3.4). En la figura (3.3) se puede observar el marco del Eco-byson.



Figura 3.3 Marco del Eco-Byson utilizado para las pruebas de 4 cinceles frontales a 0.20 *m* de profundidad de labor y para la prueba con 7 cinceles a una profundidad de trabajo de 0.30 *m*.

3.5 Estructura flotante

Se utilizó como estructura de acoplamiento ubicada entre el enganche del tercer punto del tractor y el implemento, así mismo, como plataforma para posicionar los traductores para realizar el monitoreo de las fuerza de reacción del suelo. Esta estructura fue desarrollada utilizando una parte del arado de cinceles del modelo MCC-357 de la marca BISON, acondicionado con placas para la colocación de los sensores octagonales como se muestra en la figura (3.4).



Figura 3.4 Estructura flotante (Pacheco, 2012).

La estructura flotante se utilizó para acoplar los sensores al marco integral de calibración para realizar los trabajos en laboratorio y campo, figura (3.5).



Figura 3.5 Estructura flotante acoplada al sistema transductor integral con el prototipo articulado de cinceles.

3.6 Calibración de sensores, evaluación en laboratorio y campo.

3.6.1 Calibración individual de octagonal Rojo-Amarillo (ORA) y Verde-Azul (OVA)

Para la calibración del (ORA) u (OVA) se necesitaron contrapesos del tractor (tres de 48 kg , uno de 73 kg , dos de 35 kg y dos de 30 kg), adicionados uno a uno como carga, los cuales se fueron acumulando directamente sobre una canastilla que se coloca en la punta de un cincel a tres diferentes (**DBP**) Distancias del Brazo de Palanca a (0.54 , 0.59 y 0.64 m). Posteriormente se realizó la regresión lineal de los pesos llevados a magnitud de fuerza en Newtons (N) contra la respuesta en milivolts (mV) en el software estadístico Minitab 16 para obtener su constante.

3.6.2 Calibración Octagonal Verde (OV), Octagonal Amarillo (OA), Octagonal Rojo (OR) y dinamómetro de tiro (Axial)

Los sensores octagonales (OV), (OA), (OR) que componen al sensor integral y el dinamómetro de tiro Axial son los sensores que se utilizaron para las pruebas realizadas en campo.

Los sensores octagonales se mantuvieron en el marco de calibración acoplados a la estructura flotante, figura (3.6), se colocó el cincel con la canastilla en la parte central del marco ubicada entre el (OV) y el (OA) nuevamente colocando sobre la canastilla las cargas (contrapesos) a las distancias del brazo de palanca del cincel (0.54 m , 0.59 m y 0.64 m). La constante de cada octagonal consistió en multiplicar los pesos conocidos por la constante de la gravedad (9.81 ms^{-2}) y así obtener la fuerza de tiro real en N aplicados frecuentemente, de la misma forma se calcularon las constantes, tomando en cuenta que existe un momento en la aplicación de las cargas que se multiplican con la distancia de brazo de palanca $Nm \circ mV^{-1}$. La fuerza real es directamente proporcional a los mV de respuesta de cada sensor. Se realizó una regresión lineal entre la fuerza real aplicada, primero en unidades de $N \circ mV^{-1}$ en respuesta por cada sensor, y después en $Nm \circ mV^{-1}$ para el momento obteniendo así una gráfica de línea ajustada y en consecuencia la constante de cada sensor.

La calibración del dinamómetro axial se realizó en una estructura o tripie, figura (3.7) la cual tiene una viga central en la parte superior y además consta de una plataforma sujeta a la viga para poder suspender el sensor a calibrar y aplicarle los pesos conocidos, en este caso, se utilizaron siete contrapesos del tractor (tres de 48 kg , uno de 73 kg , dos de 35 kg y dos de 30 kg). Sumando una carga total de 347 kg .

3.6.2.1 Análisis de varianza

Se realizó el análisis de varianza de las constantes de los octagonales que componen el sensor integral (OA), (OV) y (OR) a las tres DBP (0.54, 0.59 y 0.64 m) cada una con 6 repeticiones y se realizó la comparación de medias.



Figura 3.6 Marco de calibración del sensor integral.

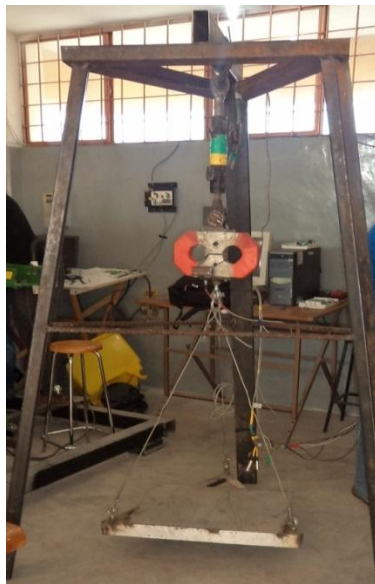


Figura 3.7 Calibración del dinamómetro de tiro axial.

3.7 Determinación de la posición de la resultante

Para la determinación de la posición de la resultante se utilizaron las ecuaciones: (3.1), (3.2) y (3.3).

Para la fuerza en la dirección(X):

$$Fd = Cd * KOc \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde:

Fd = Fuerza (N) detectada en (X) a las Distancias de Brazo de Palanca

Cd = Carga detectada (mV)

KOc = Constante del octagonal ($N \cdot mV^{-1}$)

Diferencia de fuerzas detectadas contra aplicadas:

$$Diferencia = Fd - Fa \dots\dots\dots (3.2)$$

Donde:

Fa = Fuerza (N) aplicada en (X) a las distancias de brazo de palanca

Porcentaje de fuerzas aplicadas contra las fuerzas detectadas:

$$\%F = \left(\frac{Fd - Fa}{Fa} \right) * 100 \dots\dots\dots (3.3)$$

Teniendo los resultados de los porcentajes para cada peso aplicado, se realiza una gráfica de regresión lineal de los porcentajes contra las distancias de brazo de palanca. Así, obteniendo la ecuación de posición de la resultante.

En el sistema integral, se debe calcular la resultante relativa entre los octagonales (X-Y). Para el eje (X), la distancia se localizó entre el sensor verde y amarillo dividido entre dos. Para el eje (Y), la distancia se localizó entre los centros del sensor verde-amarillo y la distancia al centro del sensor rojo.

3.8 Equipos e instrumentos utilizados para la calibración de sensores y evaluación en campo.

Para nuestro sistema de adquisición, para la calibración de los sensores transductores de fuerza y para su uso en campo, se utilizó un tractor instrumentado con las siguientes características y que trabaja en conjunto con:

1. Un amplificador – acondicionador (DBK – 43A) con módulos de 8 canales, con ganancia de $10x$ a $1250x$ (ε), fabricado por Iotech, Inc. (<http://www.iotech.com>) usado para amplificar la señal del transductor y proporcionar una salida estandarizada de voltaje para así poder enviarla a un convertidor analógico - digital. Este además provee el voltaje de excitación al transductor en un rango de $1 - 10$ V y 100 mA.
2. Un convertidor analógico – digital (DakBook 2000). El cual es un módulo que se conecta al puerto paralelo de la computadora y que convierte los valores de voltaje en valores digitales para que puedan ser procesados por la computadora. Este sistema se compone de dos partes, la primera parte es la que procesa la información y la segunda parte es un banco de baterías que alimenta a la parte de procesamiento. Este módulo es integrado por seis voltajes diferenciales. Con una ganancia de $0.01 - 10$ V y con una velocidad de muestreo de $25 - 625$ E3 muestras por segundo. Con 16 canales analógicos y ocho canales digitales con rangos de ganancias en micro deformaciones de 100 a 10 K. Este sistema permite almacenar en forma instantánea los datos, en el disco duro del ordenador, y permite ver la respuesta de los canales en pantalla durante el proceso. Los datos obtenidos durante el proceso son posteriormente analizados con los paquetes de Excel 2013, Minitab 16 y MATLAB 2012.

3.8.1 Adquisición de datos

Al inicio para darle un voltaje de excitación a las galgas a través del **DBK-43A**, éste se posiciona en “cal” (abreviatura de calibración) localizado en la parte posterior del hardware, canal por canal, es decir, puente por puente (Wheatstone). Así por ejemplo, para el sensor Octagonal Amarillo (OA), se conecta el cable a un canal del DBK, para las fuerzas medidas en eje de las X, así mismo para el sensor Octagonal Verde (OV) y para el sensor Octagonal Rojo (OR) (transferencia de peso) se utilizó un solo canal que corresponden a las fuerzas en X. Luego de calibrar con su voltaje de excitación a cada “canal” (puente de Wheatstone), se lleva a su posición inicial el botón “cal” (“nor” de normal) y se ajustan los “Scaling gain”, “Input Gain” y el “offset” quedando así ya calibrado los voltajes de excitación y las ganancias de cada una de las fuerzas a medir a través de las galgas (Cuadro 3.3)

Cuadro 3.3 Valores de ajuste de las ganancias y voltaje de excitación antes de la obtención de datos para el DBK-43a.

Sensores	Canal	Input Gain	Scaling Gain	Galgas	Voltaje de excitación	Constante NmV ⁻¹
1 Axial	6	4.71	4.60	350 Ω	9.48	15.55
2 OC-Rojo	0	4.46	4.47	120 Ω	5.50	20.85
3 OC-Verde	4	4.52	4.54	350 Ω	9.60	15.86
4 OC-Amarillo	5	4.43	4.45	350 Ω	9.62	15.85
5 OC-Ve_Az	3	4.40	4.40	350 Ω	9.47	15.53
6 OC-Ro_Am	2	4.50	4.50	350 Ω	9.50	15.58

3.8.1.1 Descripción de la posición y función de los transductores

- 1.- Dinamómetro axial, ubicado entre los dos tractores. Este sensor midió la fuerza de tiro del segundo tractor con el implemento de prueba levantado y en posición de trabajo.
- 2.- Transductor rojo, ubicado en el punto superior de la estructura flotante. Este sensor midió la transferencia de peso ejercida por el implemento hacia el tractor.
- 3.- Transductor verde, ubicado en el brazo inferior izquierdo de la estructura flotante.

4.- Transductor amarillo, ubicado en el brazo inferior derecho de la estructura flotante. Los sensores tres y cuatro están acoplados (rotulas) a los brazos inferiores del enganche del tercer punto del tractor y solo sensaron las fuerzas en la dirección horizontal.

5.- Transductor verde-azul, ubicado en la parte frontal del marco acoplado al cincel somero.

6.- Transductor rojo-amarillo, ubicado en la parte trasera del marco articulado y acoplado al cincel profundo. Los sensores cinco y seis están acoplados (empotrados) al marco junto con la herramienta de prueba y solo sensaron las fuerzas en la dirección horizontal. Ver Figura (3.8).

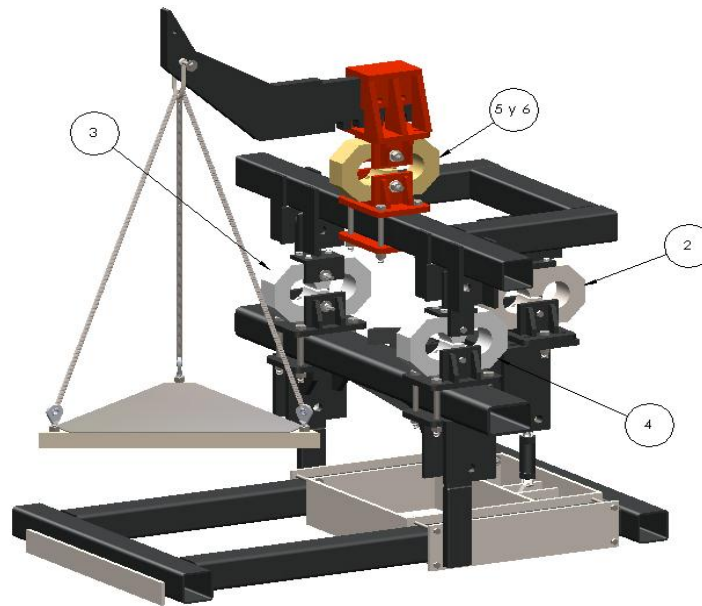


Figura 3.8 Banco de calibración.

Se procede a la conexión de sensores y a la comunicación de éstos con los equipos de adquisición. De lo anterior, se debe considerar que cada uno de los sensores consta de conectores hembra y macho para así poder comunicar a través de una tarjeta de conexión, que van desde el transductor (octagonal) al amplificador-acondicionador (Ozuna, 2011; Bonifaz, 2012).

1.- Se conectan los transductores octagonales a través de sus cables correspondientes de manera rápida y cuidadosa con el sistema de canales del **DBK-43A** y éste conectado por medio de un puente al **DaqBook/2000**.

2.- En el **DaqBook/2000** se conectan los cables de datos: el que comunica al módulo con el puerto paralelo de la computadora. Se coloca el cable de alimentación que va de la batería del **DaqBook/2000** a la unidad de procesamiento de datos. Se enciende el **DaqBook/2000** y el **DBK-43A**.

Para la calibración del bridge o la ganancia del puente de Wheatstone y ver el rango en que se estarán guardando los datos, el programa DaqView debe estar necesariamente en ejecución y posición normal, se gira el potenciómetro de la parte del offset hasta el valor deseado.

Evaluaciones bajo condiciones de laboratorio, para poder empezar a aplicar carga a los sensores sujetos a la estructura, figura (3.9), se necesita condicionar el software **DaqView 9.1**, el cual consta de tres componentes:

1.-El primero consiste en el destino de nuestra información, como nombre de archivo y carpeta a la cual deseamos enviarla. El nombre de archivo y carpeta destino son nombrados según se necesite.

2.-El segundo componente solicita la frecuencia de adquisición de datos. Para trabajos en laboratorio insertamos 20 muestreos por segundo con una corrida total de 6800 datos, dependiendo del número de pesos acumulados, el cual nos da el tiempo por cada prueba. Los primeros 500 datos no aplicamos peso, el primer peso se aplica a partir de esos 1,000 datos, a los siguientes ,500 aplicamos el siguiente peso y así sucesivamente hasta llegar a los 347 *kg* en carga (subida de los pesos), repitiendo el mismo procedimiento al momento de ir bajando los mismo pesos (descarga). En trabajos de campo la frecuencia de muestreo depende de la longitud

a recorrer con el tractor con implemento abajo, para nuestro caso se utilizaron 20 muestreos por segundo.



Figura 3.9 Calibración de los octagonales.

3.- El tercer componente nos permite ver en la pantalla de la computadora la respuesta en *mV* de los sensores conectados a sus respectivos canales, figuras (3.10) y (3.11).

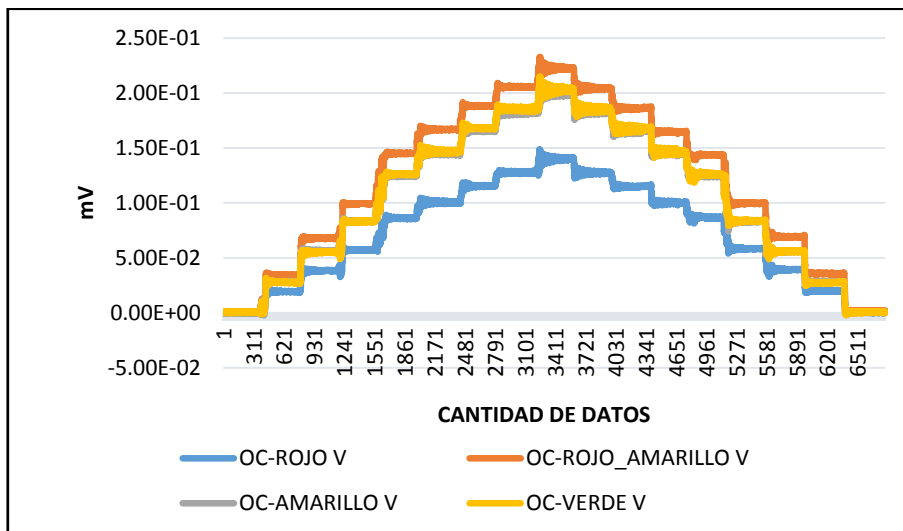


Figura 3.10 Frecuencia de muestreo y comportamiento de sensores con respecto a los pesos aplicados.

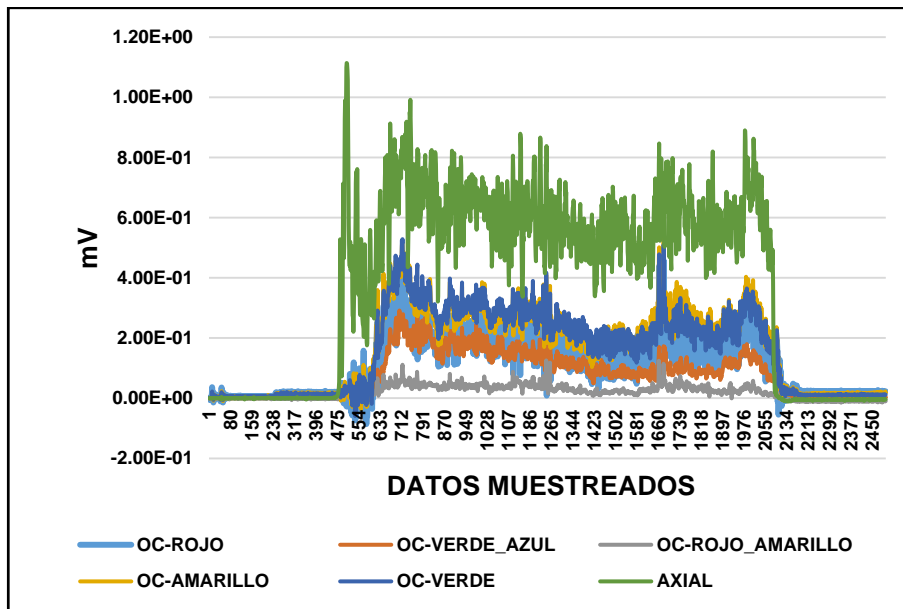


Figura 3.11 Frecuencia de muestreo y comportamiento de sensores en campo.

El dinamómetro Axial se posiciona en medio de los dos tractores utilizando un cable de acero especial de alta capacidad de carga. Se conectan los sensores comunicándolos con el amplificador de señal **DBK-43A** a través de sus canales correspondientes.

3.9 Procesamiento y análisis de la información

La disposición de un equipo de adquisición de datos que registren los valores que se obtienen por medio de un transductor de fuerza y que éste los envíe a una computadora, hace posible almacenar en un archivo en disco los valores registrados durante la operación de la herramienta de labranza. Los datos obtenidos se descargan directamente en el archivo nombrado con anticipación y en la carpeta destino. Se ejecutan con Excel, se grafican los datos, como se muestra en las figura (3.14) y (3.15).

Para datos de calibración se toma una lectura promedio por cada escalón de la gráfica, cada lectura por escalón en mV corresponde a la suma de pesos aplicados cada 1000 lecturas programadas. Los mV son proporcionales al peso. El peso multiplicado por la fuerza de gravedad obtenemos Newtons. Se procede a llevar los datos al Software estadístico Minitab y se realiza una regresión lineal entre mV obtenidos contra Newtons aplicados por escalón en ascenso y descenso y así obtenemos una ecuación lineal con una constante de calibración por cada sensor. La constante permite transformar directamente a unidades de fuerza (N), los datos obtenidos en laboratorio o en campo en mV (Bonifaz, 2012).

Para datos de campo se abren los archivos en Excel en la versión 2013 y se grafican.

Estos valores son absolutos en mV . Los valores iniciales de la gráfica se llevan a valor cero, esto se hace, restando el primer valor de la columna a todos los valores de la misma columna y así tener una mayor percepción del comportamiento del transductor integral en su estado dinámico. Posteriormente se multiplican todos estos valores llevados a cero por la constante de calibración correspondiente. Se realizó un programa por Mojica (2000) en el ambiente MATLAB 7.0 (2004, Apéndice A) que permite procesar toda la información a través de un análisis espectral en donde se puede conocer las fuerzas que se presentan durante la operación del implemento. Para poder procesar la información en este ambiente de MATLAB 7.0 se guardan todos los archivos generados en cada una de las pruebas con la extensión .DAT, entre comillas y delimitado por tabulaciones.

Mojica (2000) menciona que la información que se obtiene del sistema de adquisición de datos es de tipo dinámico porque varía en el espacio tiempo y aleatorio porque no tiene un comportamiento definido originado por la heterogeneidad del suelo, ya que depende de las fuerzas en la interacción del suelo-implemento que son registrados durante la operación de la herramienta.

Para determinar la fuerza máxima que requiere cada herramienta o arreglo y dimensionar el dinamómetro o transductores de fuerza, es necesario conocer las magnitudes de las fuerzas de reacción del suelo y su frecuencia correspondiente, para lo cual, como se mencionó, se realiza un análisis espectral de datos obtenidos. Un espectro es típicamente presentado por una gráfica de la magnitud o valor relativo de un parámetro contra la frecuencia. Cada fenómeno físico, ya sea electromagnético, mecánico, hidráulico, térmico o de algún otro sistema tiene un espectro único asociado a él.

Para conocer esta información se selecciona el algoritmo de la transformada rápida de Fourier incluido en el programa de MATLAB 7.0 (2004) antes mencionado, este algoritmo calcula el espectro de frecuencia de los datos obtenidos, y a partir de aquí se pueden localizar la mayor magnitud ocurrida y su correspondiente frecuencia (Mojica, 2000).

3.10 Evaluaciones en campo con diferentes arreglos del equipo de labranza vertical

3.10.1 Determinación de la resistencia al rodamiento

Una de las pruebas en campo, es la determinación de la fuerza de tiro, actualmente el método aprobado en México (Norma de Arados NMX-O-182-SCFI-2003) requiere de un dinamómetro de tiro el cual es colocado entre dos tractores, un tractor con el implemento a evaluar en posición de trabajo y otro como fuente de potencia.

La evaluación consistió en calcular el coeficiente de rodamiento con el implemento levantado. En este caso se realizó una prueba con 12 repeticiones; una por cada 100 m. Ver figura (3.12).



Figura 3.12 Recorrido del tractor con el implemento levantado para determinar la resistencia al rodamiento.

Después se realizó el análisis espectral del sensor Axial para determinar la resistencia al rodamiento. Al realizar el análisis espectral, se presenta la media de una frecuencia de datos dinámicos en V y su valor espectral de esa frecuencia, se realiza la suma del valor espectral más los valores de la media de cada repetición y finalmente se multiplica por la constante del sensor utilizado.

3.10.2 Requerimientos de la fuerza de tiro con dinamómetro Axial y transductor integral

El dinamómetro Axial se utilizó para considerar la fuerza de tiro total dentro de los requerimientos de energía en la labranza. Como se muestra en la figura (3.13), se utilizaron dos tractores de potencia media, (Apéndice B), según lo establece la norma de Arados NMX-O-182-SCFI-2003, se colocó el dinamómetro Axial entre los dos tractores. La prueba se realizó con un tractor que tiene acoplado el implemento a evaluar en posición de trabajo y su sistema integral de sensores y el otro tractor como fuente de potencia. Los arreglos utilizados como prueba se muestran en el cuadro (3.3).



Figura 3.13 Tractores utilizados para las pruebas con el dinamómetro Axial (Fuerza de tiro)

La finalidad de utilizar el dinamómetro de tiro Axial consistió en determinar la fuerza total demandada por los diferentes arreglos de cinceles. La fuerza detectada en los sensores octagonales amarillo y verde del transductor integral, fue promediada y dividida entra la fuerza detectada en el dinamómetro Axial y así obtener la proporción que existe entre ellos.

Se realizaron 21 pruebas con diferentes arreglos espaciales, utilizando cinceles a diferentes profundidades como lo indica el cuadro (3.4) en donde las profundidades de los cinceles frontales fueron de 0.20 m y la profundidad de los cinceles traseros fue variable (profundidades a 0.20 m, 0.30 m, y 0.40 m), según lo requería la prueba o arreglo.

En las pruebas donde se utilizaban cinceles traseros, se acoplaron dos tamaños de alas; medianas (0.45 m) y grandes (0.60m), como se indica en el cuadro (3.3).

Cuadro 3.4 Arreglos espaciales de cinceles realizados bajo condiciones de campo.

Grupo	Arreglo	Descripción	N° de cuerpos
1	1C20SA	1 cincel a 0.20 m de profundidad sin alas	1
	1C30SA	1 cincel a 0.30 m de profundidad sin alas	1
	1C40SA	1 cincel a 0.40 m de profundidad sin alas	1
	2C30SA	2 cinceles a 0.30 m de profundidad sin alas	2
	2C40SA	2 cinceles a 0.20 m de profundidad con alas medianas	2
2	2CF201CT20SA	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.20 m de profundidad sin alas	3
	2CF201CT20AM	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.20 m de profundidad con alas medianas	3
	2CF201CT20AG	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.20 m de profundidad con alas grandes	3
	2CF201CT30SA	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.30 m de profundidad sin alas	3
	2CF201CT30AM	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.30 m de profundidad con alas medianas	3
	2CF201CT30AG	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.30 m de profundidad con alas grandes	3
	2CF201CT40SA	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.40 m de profundidad sin alas	3
	2CF201CT40AM	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.40 m de profundidad con alas medianas	3
	2CF201CT40AG	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.40 m de profundidad con alas grandes	3
	2CF201CT20SA	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.20 m de profundidad sin alas	3
	2CF201CT20AM	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.20 m de profundidad con alas medianas	3
	2CF201CT20AG	2 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con un cincel trasero a 0.20 m de profundidad con alas grandes	3
	3	4CF20ECO	4 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad
4CF202CT20AM		4 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con 2 cinceles traseros a 0.20 m de profundidad con alas medianas	6
4CF202CT20AG		4 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con 2 cinceles traseros a 0.20 m de profundidad con alas grandes	6
4CF202CT30AM		4 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con 2 cinceles traseros a 0.30 m de profundidad sin alas	6
4CF202CT30AG		4 cinceles frontales a 0.20 m de profundidad con 2 cinceles traseros a 0.30 m de profundidad con alas medianas	6
4CF202CT40AM		4 cinceles frontales a 0.40 m de profundidad con un cincel trasero a 0.30 m de profundidad con alas grandes	6
4CF303CT30SA		4 cinceles frontales a 0.30 m de profundidad con 3 cinceles traseros a 0.30 m de profundidad sin alas	7

Las pruebas con los arreglos espaciales de cinceles se realizaron en una parcela de 500 *m* de largo por el ancho de trabajo de 2.0 *m*. Como se muestra en la figura (3.14).



Figura 3.14 Superficie total por prueba.

3.11 Levantamiento de los perfiles de labranza

El levantamiento de perfil se realizó solo para el grupo 3 de arreglos. Para determinar los perfiles de labranza se realizaron dos perfilometrías por cada repetición, utilizando un perfilómetro de varillas de acuerdo con la metodología descrita por Spoor y Godwin (1978). Sustituyendo las varillas graduadas por una barra graduada. Para la obtención del perfil después del paso de los cinceles para cada repetición se utilizaron los siguientes materiales:

1. Un perfil de ptr de 2" X 4" utilizado como regla y graduado cada 10 *cm*.
2. Flexómetro o cinta para medir.

Los puntos de muestreo seleccionados para cada una de las repeticiones, como se muestra en la figura (3.15), se miden 30 m a partir del punto de inicio de cada prueba, posteriormente se insertan las varillas una a una hasta topar con suelo no removido, cuidando de no dañar el perfil de labranza. Una vez concluida con la toma del primer perfil a 30 m, se procede, desde ese punto a medir los siguientes 30 m lineales (60 m desde el punto de inicio) para la toma del segundo perfil por repetición y así dejando dos mediciones de perfil por cada repetición.

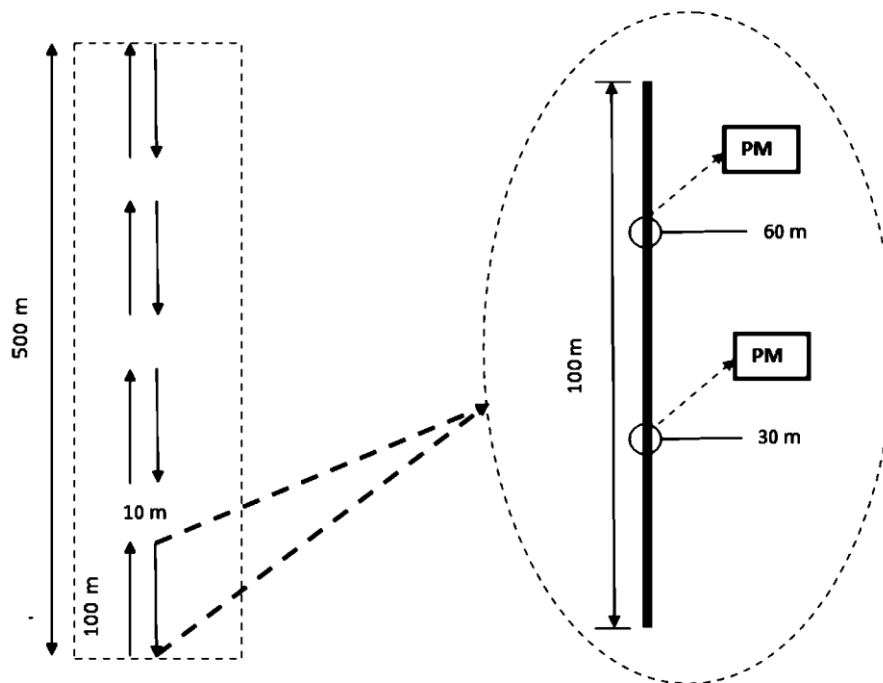


Figura 3.15 Distancias de los puntos muestreados para la toma de perfil de labranza (PM)

3.11.1 Obtención del área disturbada

Una vez obtenidos los datos de profundidad cada diez centímetros en campo, como se puede ver en la figura (3.16), se capturan de datos en el programa Excel. Se obtuvo el área disturbada en m^2 , a través de la fórmula de cálculo de área de un trapecio, ecuación (3.1), y los perfiles de labranza en forma gráfica de cada una de las pruebas o arreglos espaciales de cinceles.

$$A = \left(\frac{B+b}{2} \right) * h \dots\dots\dots (3.1)$$



Figura 3.16 Regla graduada y toma de medidas para determinar la profundidad de labranza.

La regla consiste en un perfil de PTR de 2" x 4" de acero y graduada cada 10 *cm*. Se tomaron medidas de profundidad del perfil como resultado del paso del implemento.

3.11.2 Determinación de la resistencia específica

Utilizando el análisis de fuerza de tracción obtenido en cada uno de las pruebas o grupos de arreglos con el transductor integral en campo y con la obtención del área disturbada de cada una de las repeticiones se procedió a la determinación de la resistencia específica. Camacho y Rodríguez (2007) indican que la resistencia específica se determina con la siguiente ecuación (3.2):

$$R_e = F * Ad^{-1} \dots\dots\dots (3.2)$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Calibración de sensores octagonales extendidos.

En el cuadro (4.1) se muestran los valores de las ganancias ajustadas en el DaqBook 2000 y en el DBK43A para cada uno de los sensores empleados. Se muestran las constantes de calibración obtenidas para los valores de F_x cuando los sensores fueron cargados tanto axialmente en la canastilla de calibración (Axial, Rojo, Verde y Amarillo) como con brazo de palanca en el módulo de calibración del sensor integral (Verde-Azul y Rojo-Amarillo).

Cuadro 4.1 Valores nominales de las galgas, características ajustadas en el DaqBook 2000 y valor de la constante de calibración para cada octagonal.

Sensores	Canal	Input Gain	Scaling Gain	Galgas	Voltaje de excitación	Constante NmV^{-1}
1 Axial	6	4.71	4.60	350 Ω	9.48	15.55
2 OC-Rojo	0	4.46	4.47	120 Ω	5.50	20.85
3 OC-Verde	4	4.52	4.54	350 Ω	9.60	15.86
4 OC-Amarillo	5	4.43	4.45	350 Ω	9.62	15.85
5 OC-Ve_Az	3	4.40	4.40	350 Ω	9.47	15.53
6 OC-Ro_Am	2	4.50	4.50	350 Ω	9.50	15.58

Los datos de calibración del (OA), (OV) y (OR) para las constantes mostradas en el cuadro (4.1) se encuentran en el (APÉNDICE D).

4.1.1 Resultados de calibración del Octagonal Rojo-Amarillo (ORA) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).

En la figura (4.1) se muestra el procedimiento de calibración individual del sensor Octagonal Rojo Amarillo, a través del marco de calibración, y el sensor en su proceso de calibración con capacidad de 40 kN.



Figura 4.1 Marco de calibración con sensores Octagonal Rojo Amarillo.

En las figuras (4.2), (4.3) y (4.4) se muestran las gráficas escalonadas de calibración con las distancias del brazo de palanca.

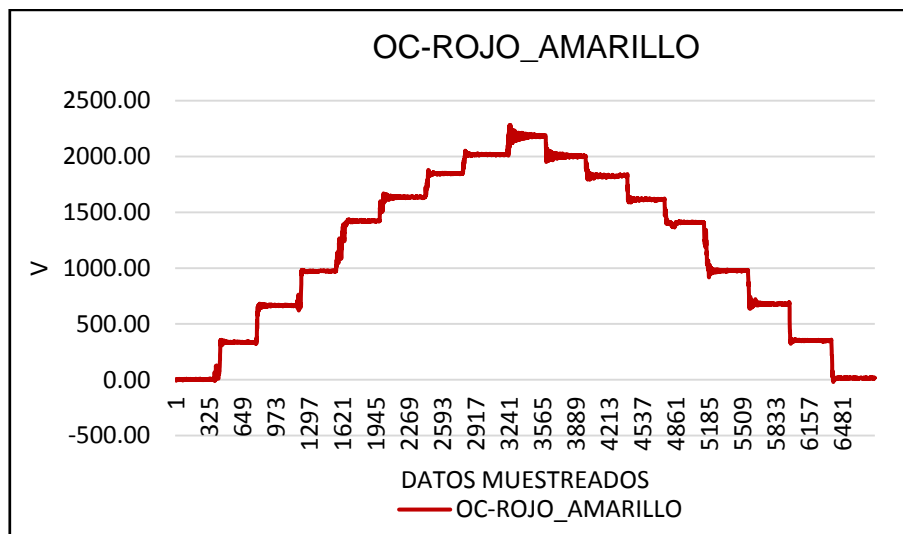


Figura 4.2 Calibración del sensor Octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.54 m.

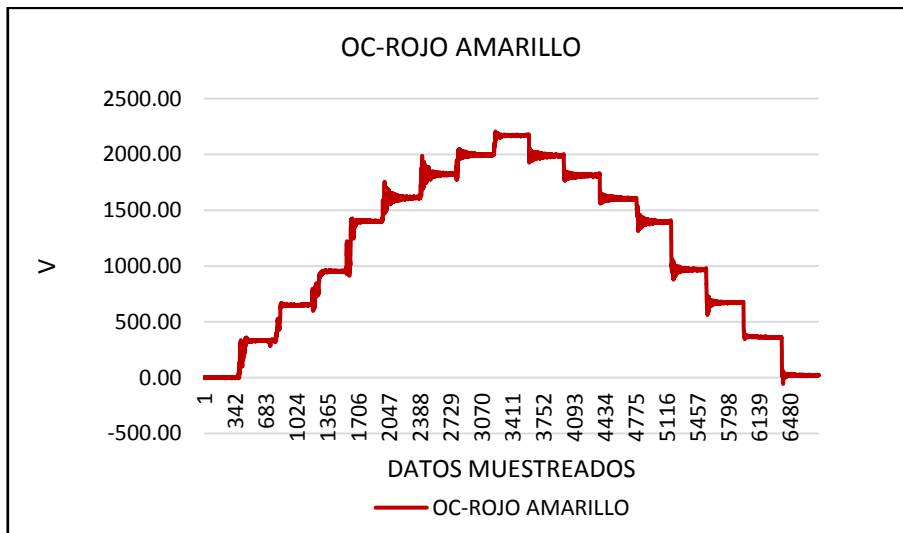


Figura 4.3 Calibración del sensor Octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.59 m.

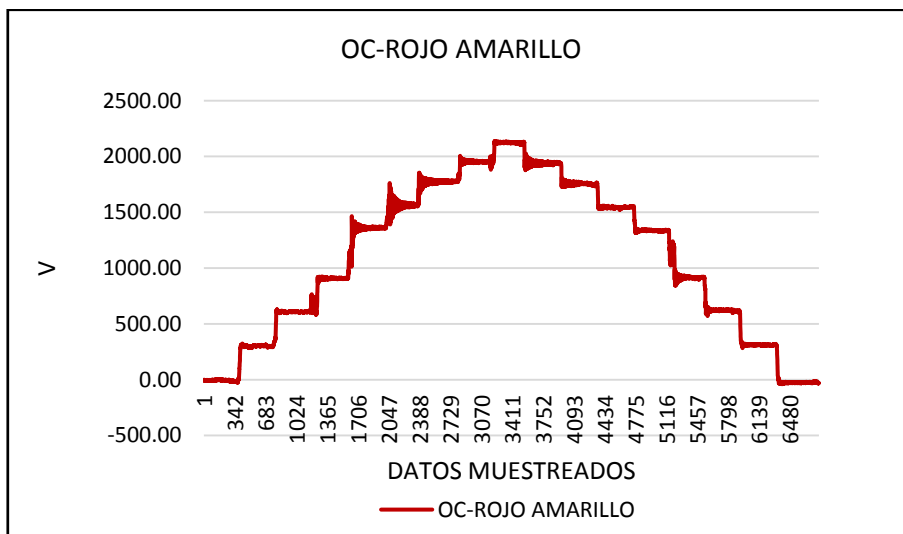


Figura 4.4 Calibración del sensor Octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.64 m.

En los cuadros (4.2), (4.3) y (4.4) se observan los datos de respuesta en *mV* contra los pesos conocidos del (ORA) cuya capacidad es de 40 *kN*. Dichos pesos son llevados a unidades de fuerza (*N*). En las diferentes distancias del brazo de palanca.

Cuadro 4.2. Datos de calibración del octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.54 m.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	34	471	32	471	32	471	32	471	32	471	32	471
96	68	942	65	942	64	942	65	942	65	942	64	942
144	99	1413	96	1413	96	1413	96	1413	95	1413	95	1413
217	145	2129	141	2129	142	2129	138	2129	140	2129	141	2129
252	166	2472	164	2472	164	2472	164	2472	164	2472	163	2472
287	188	2815	185	2815	185	2815	186	2815	185	2815	185	2815
317	205	3110	203	3110	203	3110	204	3110	203	3110	203	3110
347	222	3404	221	3404	220	3404	221	3404	220	3404	220	3404
317	204	3110	203	3110	202	3110	203	3110	202	3110	202	3110
287	186	2815	185	2815	184	2815	185	2815	184	2815	184	2815
252	164	2472	164	2472	163	2472	164	2472	162	2472	163	2472
217	144	2129	143	2129	142	2129	143	2129	141	2129	142	2129
144	99	1413	98	1413	98	1413	99	1413	98	1413	98	1413
96	69	942	68	942	68	942	67	942	66	942	68	942
48	35	471	35	471	35	471	36	471	34	471	35	471
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Cuadro 4.3. Datos de calibración del octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.59 m.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	34	471	32	471	32	471	32	471	32	471	31	471
96	66	942	64	942	64	942	64	942	64	942	64	942
144	97	1413	94	1413	94	1413	95	1413	94	1413	95	1413
217	143	2129	137	2129	140	2129	140	2129	140	2129	140	2129
252	164	2472	162	2472	162	2472	162	2472	161	2472	162	2472
287	186	2815	183	2815	183	2815	183	2815	182	2815	183	2815
317	203	3110	201	3110	201	3110	201	3110	200	3110	201	3110
347	221	3404	219	3404	219	3404	219	3404	218	3404	219	3404
317	203	3110	201	3110	200	3110	201	3110	199	3110	200	3110
287	185	2815	183	2815	182	2815	182	2815	181	2815	182	2815

252	164	2472	161	2472	160	2472	161	2472	160	2472	160	2472
217	142	2129	140	2129	139	2129	140	2129	138	2129	140	2129
144	99	1413	97	1413	96	1413	97	1413	95	1413	96	1413
96	68	942	67	942	66	942	67	942	65	942	65	942
48	37	471	35	471	35	471	35	471	34	471	34	471
0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Cuadro 4.4. Datos de calibración del octagonal Rojo Amarillo con un brazo de palanca de 0.64 m.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	31	471	33	471	33	471	32	471	33	471	33	471
96	62	942	64	942	64	942	64	942	64	942	64	942
144	93	1413	94	1413	95	1413	95	1413	94	1413	95	1413
217	139	2129	141	2129	140	2129	140	2129	141	2129	141	2129
252	160	2472	162	2472	162	2472	162	2472	162	2472	162	2472
287	181	2815	184	2815	183	2815	184	2815	183	2815	184	2815
317	200	3110	202	3110	201	3110	201	3110	201	3110	202	3110
347	217	3404	220	3404	220	3404	219	3404	219	3404	220	3404
317	198	3110	202	3110	201	3110	201	3110	201	3110	201	3110
287	179	2815	184	2815	183	2815	182	2815	182	2815	182	2815
252	158	2472	162	2472	161	2472	160	2472	160	2472	161	2472
217	137	2129	141	2129	140	2129	139	2129	139	2129	139	2129
144	94	1413	97	1413	97	1413	97	1413	96	1413	97	1413
96	64	942	68	942	67	942	66	942	66	942	67	942
48	32	471	36	471	36	471	35	471	35	471	35	471
0	-2	0	2	0	1	0	1	0	0	0	1	0

En las figuras (4.5), (4.6) y (4.7) se muestran las regresiones lineales a través del programa Minitab con gráficas de línea ajustada de calibración del (ORA) con capacidad de 40 kN, además de su coeficiente de correlación. Teniendo para las constantes del (ORA) los valores son 15.45 NmV^{-1} , 15.65 NmV^{-1} y 15.64 NmV^{-1} , respectivamente de las distancias del brazo de palanca.

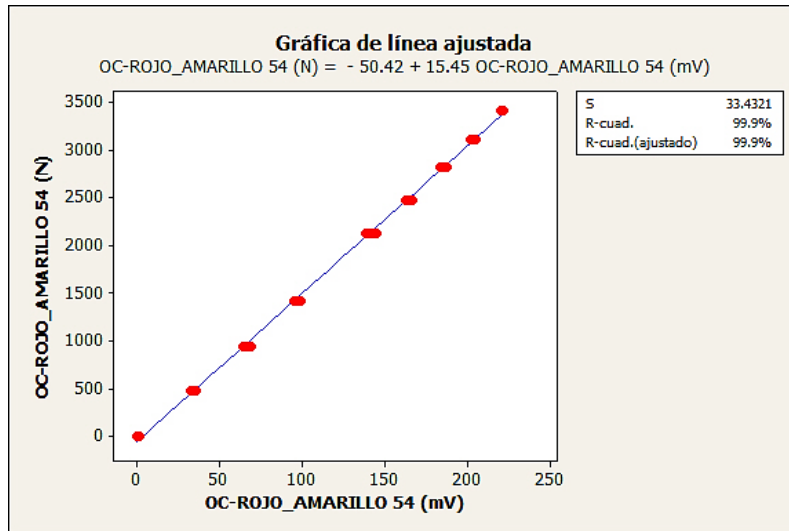


Figura 4.5 Línea ajustada del sensor octagonal Rojo Amarillo a 0.54 m de brazo de palanca y su constante de calibración.

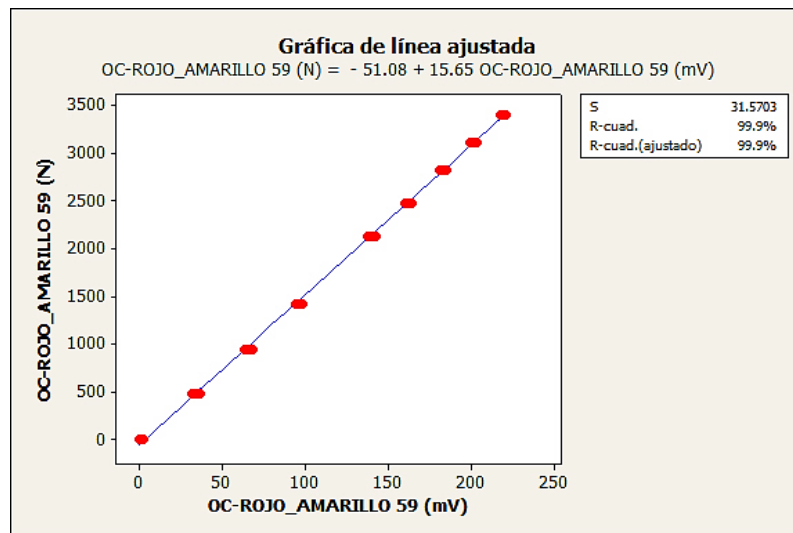


Figura 4.6 Línea ajustada del sensor octagonal Rojo Amarillo a 0.59 m de brazo de palanca y su constante de calibración.

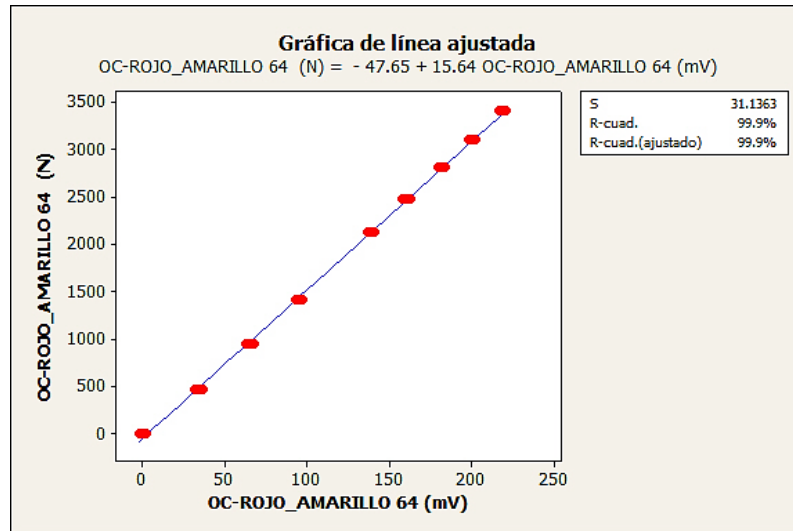


Figura 4.7 Línea ajustada del sensor octagonal Rojo Amarillo a 0.64 m de brazo de palanca y su constante de calibración.

En la figura 4.8 se muestra la ecuación general de calibración para el Octogonal Rojo Amarillo utilizando los datos de los cuadros (4.2), (4.3) y (4.4). Teniendo como valor de constante general 15.58 $N \cdot mV^{-1}$.

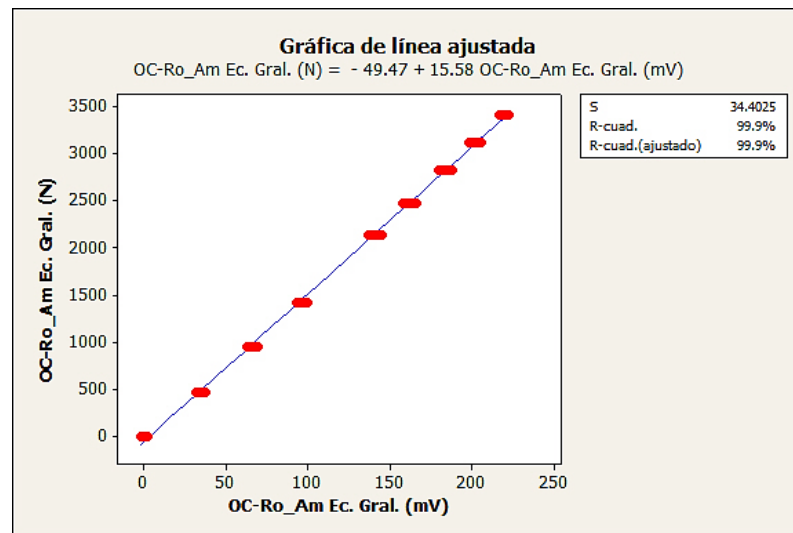


Figura 4.8 Ecuación general de línea ajustada del sensor Octogonal Rojo Amarillo y su constante de calibración.

4.1.2 Resultados de calibración del octagonal Verde-Azul (OVA) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).

En la figura (4.9) se muestra el procedimiento de calibración individual del sensor Octagonal Verde Azul, a través del marco de calibración, y el sensor en su proceso de calibración con capacidad de 40 kN.



Figura 4.9 Marco de calibración con sensores Octagonal Verde Azul.

En las figuras (4.10), (4.11) y (4.12) se muestran las gráficas escalonadas de calibración para las distancias del brazo de palanca.

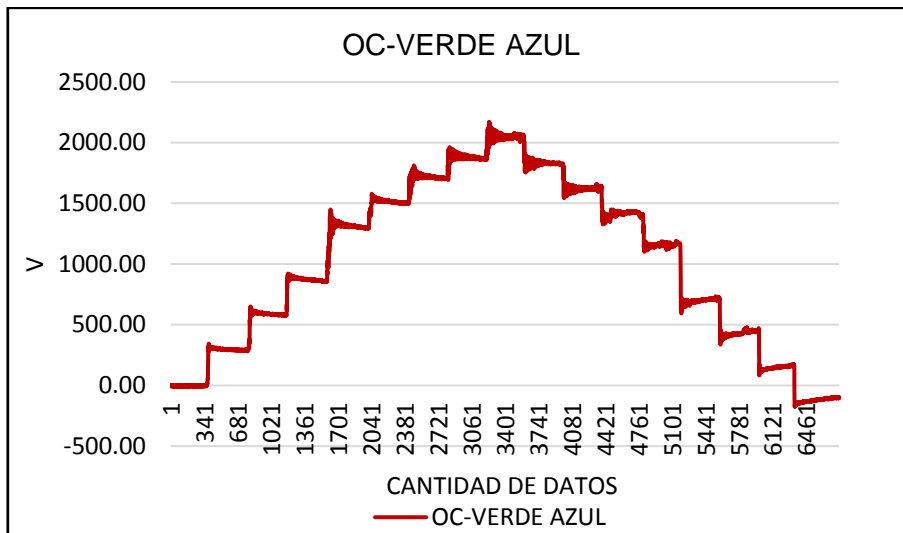


Figura 4.10 Calibración del sensor Octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.54 m.

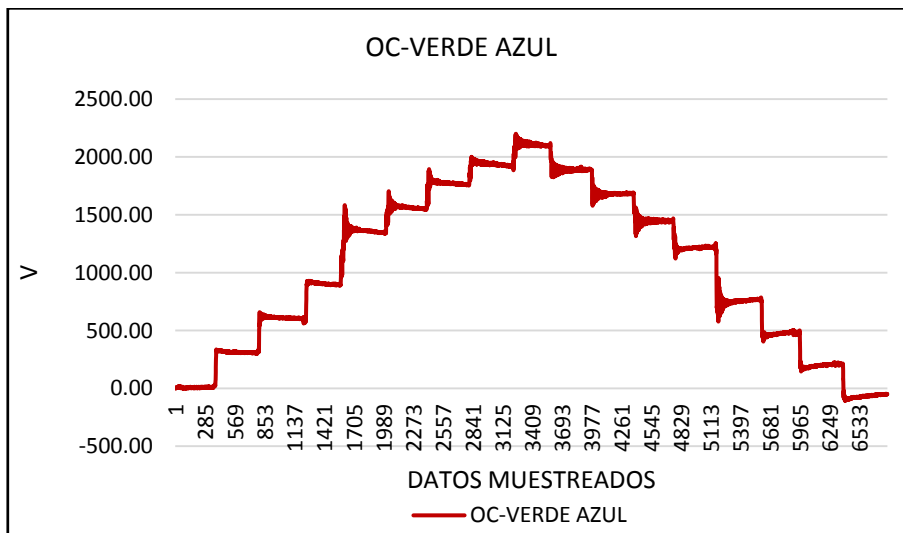


Figura 4.11 Calibración del sensor Octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.59 m.

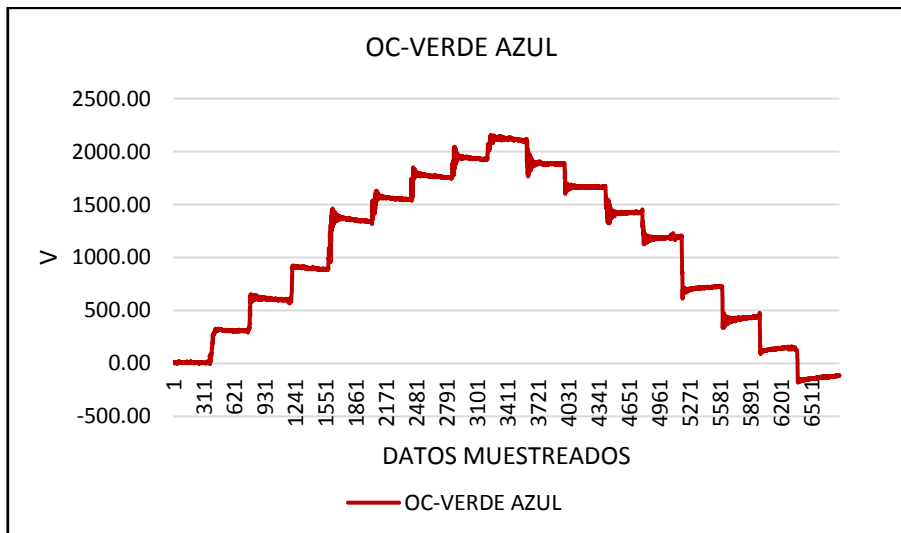


Figura 4.12 Calibración del sensor Octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.64 m

En los cuadros (4.5), (4.6) y (4.7) se observan los datos de respuesta en *mV* contra pesos conocidos del (OVA) cuya capacidad es de 40 *kN*. Dichos pesos son llevados a unidades de fuerza (*N*).

Cuadro 4.5. Datos de calibración del Octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.54 m.

	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
Peso (kg)	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	31	471	32	471	31	471	32	471	32	471	30	471
96	60	942	62	942	60	942	62	942	62	942	59	942
144	89	1413	92	1413	90	1413	92	1413	92	1413	87	1413
217	135	2129	138	2129	135	2129	138	2129	138	2129	132	2129
252	155	2472	159	2472	155	2472	158	2472	159	2472	151	2472
287	176	2815	179	2815	176	2815	179	2815	179	2815	171	2815
317	192	3110	196	3110	193	3110	196	3110	196	3110	188	3110
347	209	3404	214	3404	209	3404	213	3404	213	3404	205	3404
317	187	3110	192	3110	188	3110	192	3110	191	3110	182	3110
287	165	2815	171	2815	166	2815	170	2815	170	2815	161	2815
252	145	2472	147	2472	143	2472	147	2472	147	2472	138	2472
217	118	2129	125	2129	120	2129	124	2129	124	2129	118	2129
144	72	1413	78	1413	73	1413	78	1413	78	1413	69	1413
96	45	942	50	942	46	942	50	942	50	942	42	942

48	16	471	22	471	18	471	23	471	23	471	13	471
0	-12	0	-6	0	-10	0	-5	0	-5	0	-14	0

Cuadro 4.6. Datos de calibración del octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.59 m.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	31	471	33	471	32	471	33	471	32	471	32	471
96	62	942	64	942	62	942	63	942	63	942	62	942
144	92	1413	94	1413	91	1413	93	1413	93	1413	92	1413
217	138	2129	141	2129	138	2129	140	2129	140	2129	138	2129
252	159	2472	161	2472	158	2472	161	2472	161	2472	159	2472
287	180	2815	182	2815	179	2815	182	2815	181	2815	180	2815
317	197	3110	200	3110	196	3110	199	3110	199	3110	197	3110
347	214	3404	217	3404	214	3404	217	3404	217	3404	216	3404
317	192	3110	195	3110	191	3110	194	3110	193	3110	192	3110
287	171	2815	174	2815	169	2815	174	2815	172	2815	171	2815
252	147	2472	150	2472	145	2472	152	2472	149	2472	147	2472
217	123	2129	127	2129	122	2129	129	2129	125	2129	124	2129
144	76	1413	80	1413	75	1413	83	1413	79	1413	77	1413
96	48	942	51	942	47	942	54	942	51	942	49	942
48	20	471	23	471	18	471	26	471	23	471	21	471
0	-8	0	-4	0	-9	0	-1	0	-4	0	-6	0

Cuadro 4.7. Datos de calibración del octagonal Verde Azul con un brazo de palanca de 0.64 m.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N	mV	N
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	31	471	31	471	31	471	31	471	32	471	33	471
96	61	942	62	942	62	942	62	942	63	942	64	942
144	91	1413	92	1413	92	1413	92	1413	94	1413	94	1413
217	138	2129	139	2129	139	2129	139	2129	141	2129	142	2129
252	159	2472	160	2472	159	2472	159	2472	162	2472	162	2472
287	180	2815	181	2815	181	2815	180	2815	183	2815	184	2815
317	197	3110	199	3110	198	3110	198	3110	201	3110	201	3110
347	216	3404	216	3404	216	3404	216	3404	219	3404	220	3404
317	192	3110	193	3110	193	3110	192	3110	196	3110	197	3110
287	169	2815	170	2815	171	2815	170	2815	175	2815	175	2815
252	144	2472	146	2472	146	2472	146	2472	153	2472	150	2472
217	120	2129	122	2129	123	2129	122	2129	129	2129	127	2129
144	72	1413	74	1413	75	1413	75	1413	81	1413	79	1413
96	43	942	45	942	46	942	46	942	53	942	51	942
48	14	471	16	471	17	471	17	471	24	471	23	471
0	-14	0	-13	0	-11	0	-11	0	-3	0	-5	0

En las figuras (4.13), (4.14) y (4.15) se muestran las regresiones lineales a través del programa Minitab con gráficas de línea ajustada de calibración del (OVA) con capacidad de 40 kN, además de su coeficiente de correlación. Teniendo para las constantes del (OVA) los valores 15.76 NmV^{-1} , 15.56 NmV^{-1} y 15.28 NmV^{-1} , de cada distancia del brazo de palanca, respectivamente.

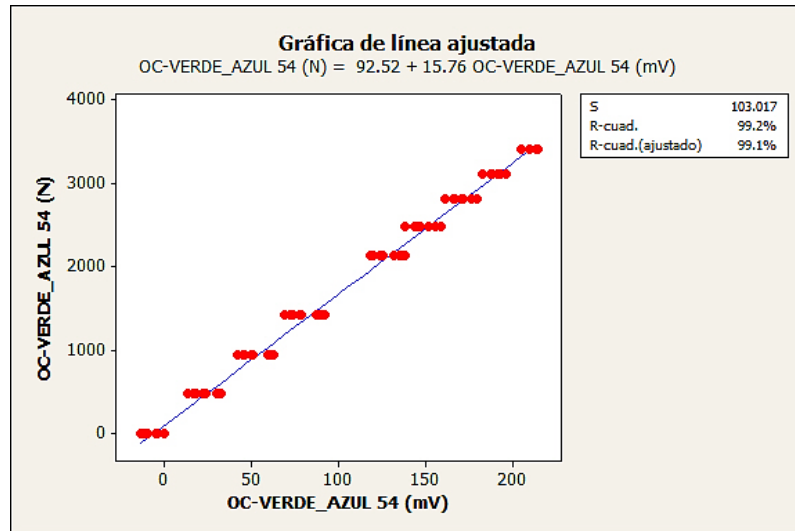


Figura 4.13 Línea ajustada del sensor octagonal Verde Azul a 0.54 m de brazo de palanca su constante de calibración.

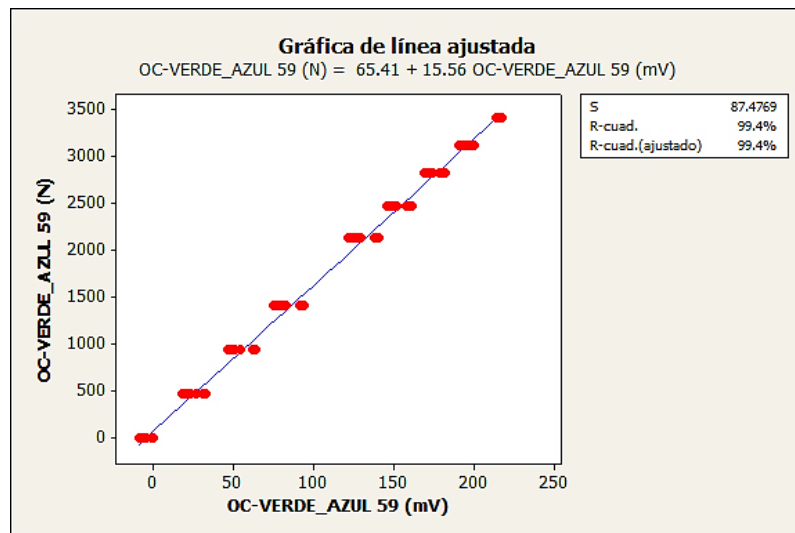


Figura 4.14 Línea ajustada del sensor octagonal Verde Azul a 0.59 m de brazo de palanca su constante de calibración.

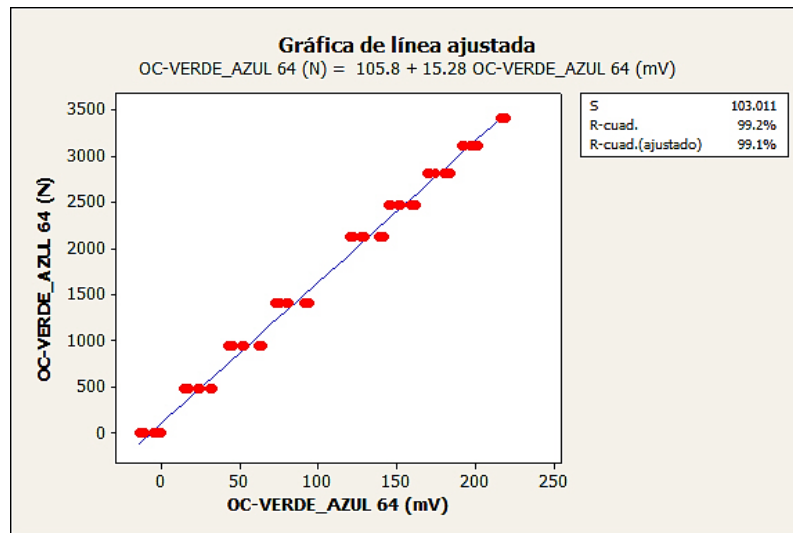


Figura 4.15 Línea ajustada del sensor octagonal Verde Azul a 0.64 m de brazo de palanca su constante de calibración.

En la figura (4.16), se muestra la ecuación general de calibración para el octagonal Verde Azul utilizando los datos de los cuadros (4.5), (4.6) y (4.7). Teniendo como valor de constante general 15.53 NmV^{-1} .

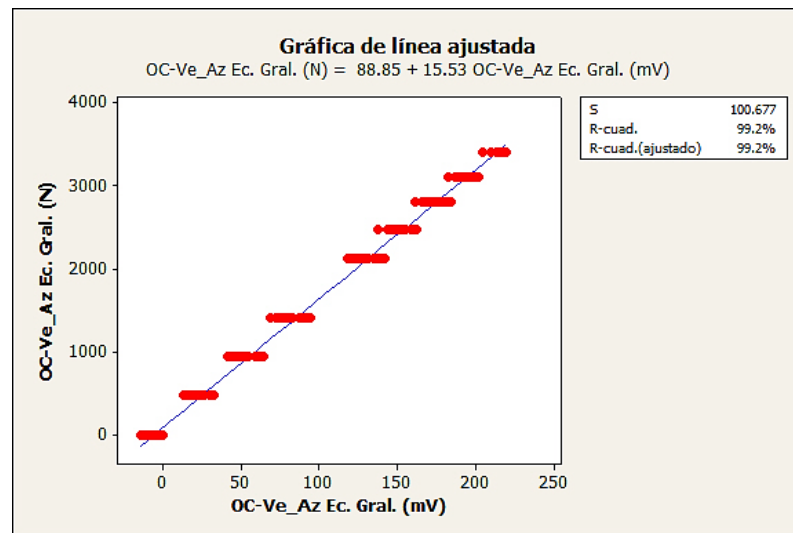


Figura 4.16 Ecuación general de línea ajustada del sensor octagonal Verde Azul y su constante de calibración.

4.2 Resultados de calibración de los transductores octagonales del sensor integral.

Para la calibración los sensores (OA), (OV) y (OR) se muestran las dimensiones utilizadas en el momento de la calibración, ver figuras (4.17) y (4.18) las cuales se mantuvieron constantes, así mismo, se utilizaron tres distancias de brazo de palanca (DBP) ver en la figura (4.19).

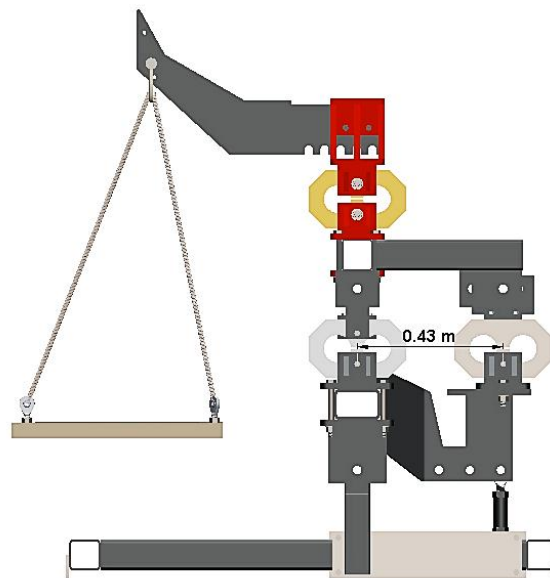


Figura 4.17 Distancia de centro a centro entre el (OR) y los octagonales del bastidor (OA) y (OV).

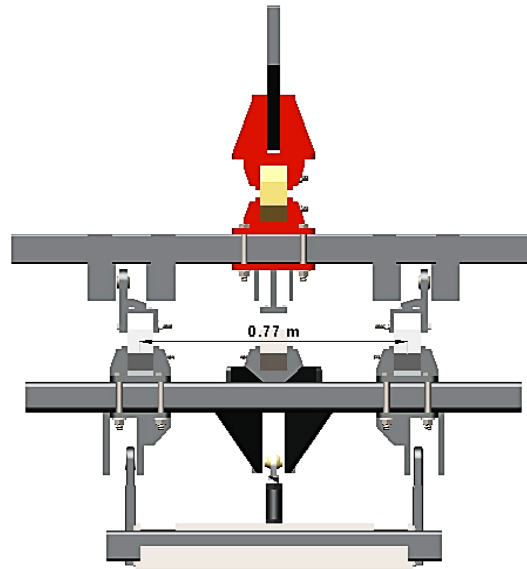


Figura 4.18 Distancia de centro a centro de los (OA) y el (OV) en el marco de calibración.

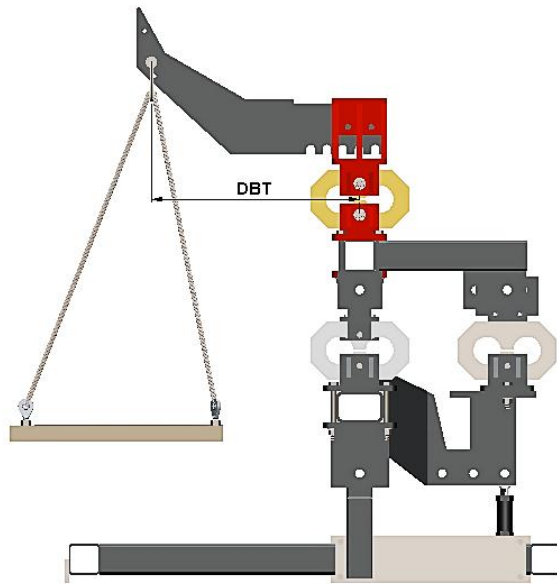


Figura 4.19 Distancia del brazo de palanca (DBT) del punto central del octagonal hasta el punto de enganche para la carga.

En la figura (4.20) se observa el procedimiento de calibración de los sensores transductores octagonales: octagonal verde (OV), octagonal amarillo (OA), octagonal rojo (OR) que se realiza en forma simultánea a la calibración de los transductores (ORA)- (OVA) y de acuerdo a las distancias del brazo de palanca (DBP). Los valores de (0.54, 0.59 y 0.64 m). Se empleó una canastilla de carga y así poder aplicar los

pesos conocidos a los sensores y obtener la constante de calibración de cada uno de ellos. Se aplicó una fuerza total de 3.404 *kN* para fines de calibración.



Figura 4.20 Calibración de los transductores (OV), (OA) Y (OR) junto con el octagonal Verde Azul.

4.2.1 Resultados de calibración del sensor Octagonal Amarillo (OA) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).

Como se observa en las figuras (4.21), (4.22) y (4.23) las gráficas escalonadas para las distancias del brazo de palanca con la carga y descarga de pesos (contrapesos de tractor) utilizados para fines de calibración del sensor octagonal amarillo para F_x , teniendo este una capacidad 40 *kN*.

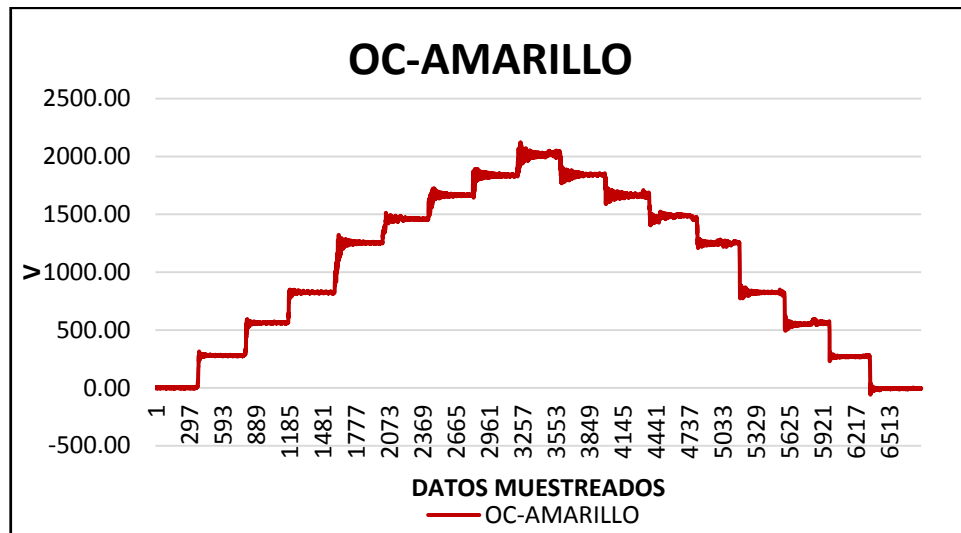


Figura 4.21 Gráfica escalonada de calibración (OA) a 0.54 m del brazo de palanca.

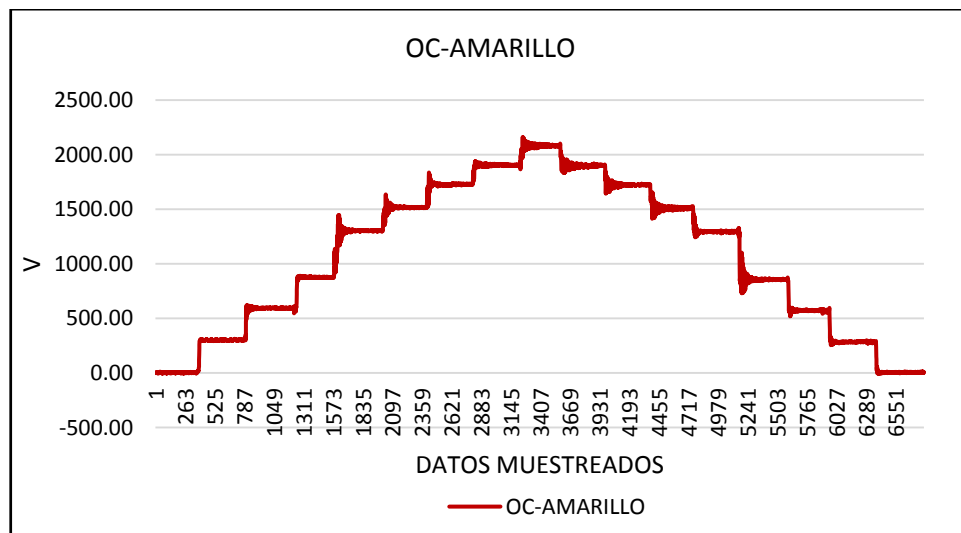


Figura 4.22 Gráfica escalonada de calibración (OA) a 0.59 m del brazo de palanca.

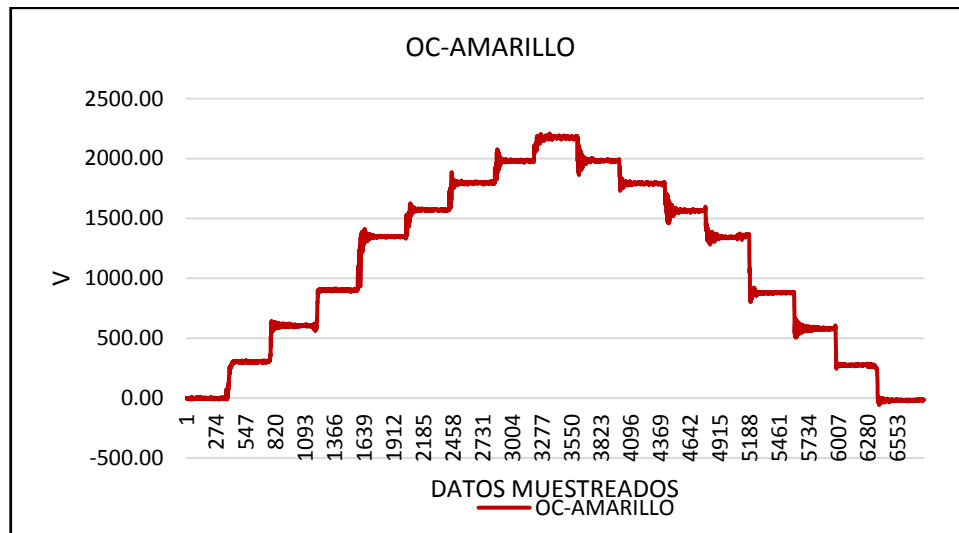


Figura 4.23 Gráfica escalonada de calibración (OA) a 0.64 m del brazo de palanca.

En los cuadros (4.8), (4.9) y (4.10) se observan los datos de respuesta en *mV* contra pesos conocidos del (OA) cuya capacidad es de 40 *kN*. Dichos pesos son llevados a unidades de fuerza por cada metro (*Nm*) ya que se multiplica la DBP por las fuerzas (*N*).

Cuadro 4.8 Datos de respuesta en *mV* del sensor (OA) a 0.54 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	29	254	29	254	29	254	29	254	30	254	30	254
96	57	509	58	509	59	509	58	509	58	509	57	509
144	84	763	86	763	86	763	86	763	86	763	85	763
217	128	1150	129	1150	129	1150	129	1150	129	1150	128	1150
252	149	1335	150	1335	150	1335	150	1335	150	1335	149	1335
287	170	1520	171	1520	171	1520	171	1520	171	1520	170	1520
317	187	1679	189	1679	189	1679	188	1679	189	1679	188	1679
347	205	1838	207	1838	206	1838	206	1838	207	1838	206	1838
317	188	1679	189	1679	189	1679	189	1679	190	1679	188	1679
287	170	1520	171	1520	171	1520	171	1520	171	1520	170	1520
252	152	1335	149	1335	150	1335	150	1335	150	1335	149	1335
217	127	1150	129	1150	128	1150	128	1150	129	1150	131	1150
144	84	763	85	763	85	763	85	763	86	763	84	763
96	57	509	56	509	57	509	58	509	58	509	56	509

48	28	254	28	254	28	254	29	254	30	254	28	254
0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Cuadro 4.9 Datos de respuesta en *mV* del sensor (OA) a 0.59 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	30	278	30	278	30	278	30	278	30	278	30	278
96	60	556	59	556	59	556	59	556	59	556	59	556
144	89	834	88	834	88	834	87	834	88	834	88	834
217	133	1256	133	1256	131	1256	132	1256	132	1256	131	1256
252	154	1458	155	1458	153	1458	154	1458	154	1458	153	1458
287	176	1661	176	1661	174	1661	175	1661	176	1661	175	1661
317	194	1835	194	1835	192	1835	193	1835	194	1835	193	1835
347	212	2008	213	2008	211	2008	212	2008	213	2008	212	2008
317	193	1835	194	1835	192	1835	193	1835	194	1835	193	1835
287	175	1661	176	1661	174	1661	175	1661	175	1661	174	1661
252	154	1458	154	1458	153	1458	153	1458	154	1458	153	1458
217	132	1256	133	1256	131	1256	132	1256	132	1256	131	1256
144	87	834	87	834	86	834	86	834	87	834	86	834
96	58	556	59	556	57	556	58	556	59	556	57	556
48	29	278	29	278	28	278	29	278	28	278	28	278
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 4.10 Datos de respuesta en mV del sensor (OA) a 0.64 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	31	301	31	301	31	301	31	301	31	301	32	301
96	62	603	62	603	61	603	62	603	62	603	62	603
144	92	904	92	904	92	904	92	904	93	904	92	904
217	138	1363	138	1363	139	1363	139	1363	140	1363	140	1363
252	160	1582	161	1582	162	1582	162	1582	163	1582	163	1582
287	183	1802	184	1802	185	1802	185	1802	186	1802	186	1802
317	202	1990	203	1990	204	1990	204	1990	205	1990	205	1990
347	222	2179	222	2179	223	2179	224	2179	225	2179	225	2179
317	202	1990	203	1990	204	1990	204	1990	206	1990	205	1990
287	183	1802	184	1802	184	1802	185	1802	186	1802	186	1802
252	160	1582	161	1582	161	1582	162	1582	162	1582	162	1582
217	137	1363	138	1363	139	1363	139	1363	140	1363	139	1363
144	90	904	91	904	91	904	92	904	92	904	92	904
96	59	603	60	603	61	603	61	603	61	603	62	603
48	28	301	30	301	30	301	30	301	31	301	31	301
0	-2	0	-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0

En las figuras (4.24), (4.25) y (4.26) se muestra una regresión lineal a través del programa Minitab con una gráfica de línea ajustada de calibración del (OA) con capacidad de 40 kN, además de su coeficiente de correlación. Teniendo para las constantes del (OA) los valores $8.916 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$, $9.488 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$ y $9.734 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$, respectivamente.

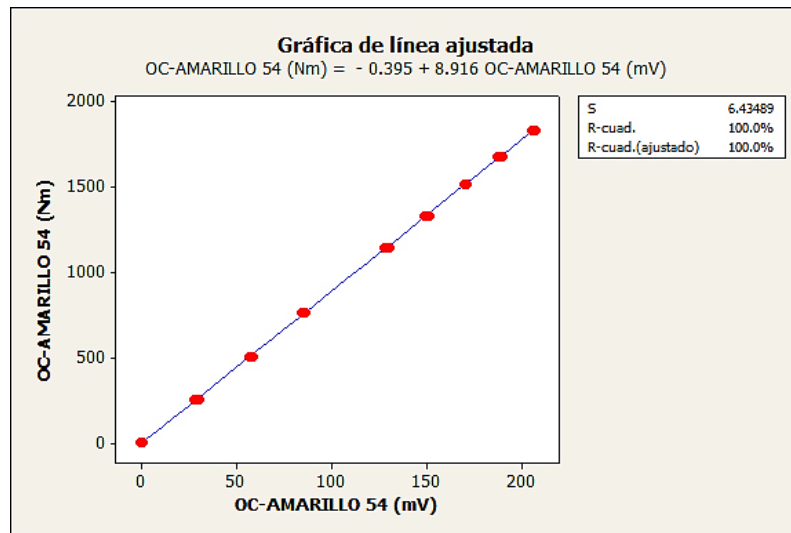


Figura 4.24 Línea ajustada del sensor (OA) F_x y su constante de calibración a 0.54 m del brazo de palanca.

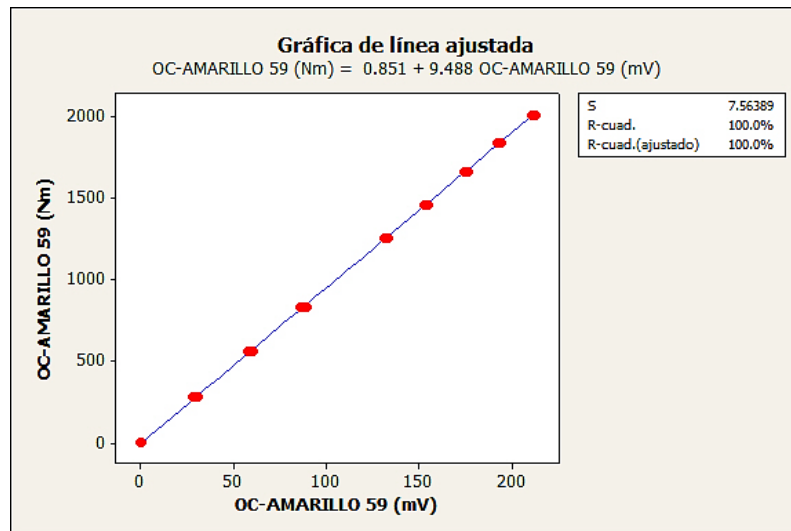


Figura 4.25 Línea ajustada del sensor (OA) F_x y su constante de calibración a 0.59 m del brazo de palanca.

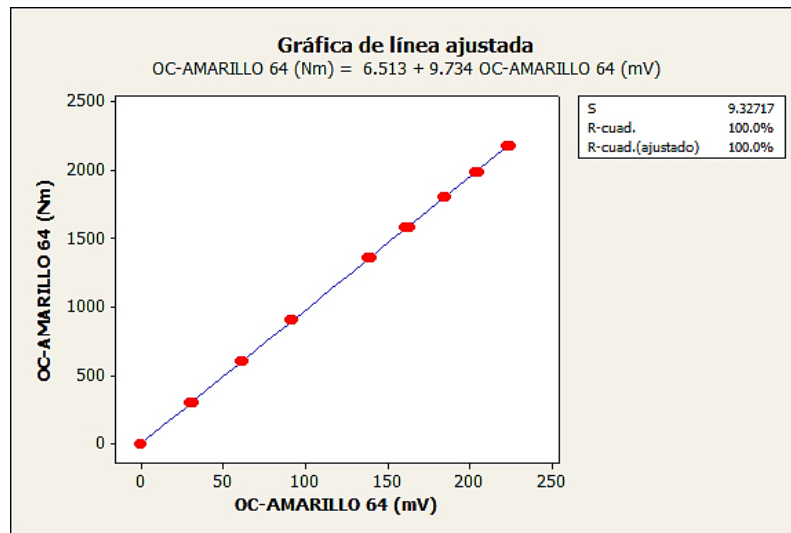


Figura 4.26 Línea ajustada del sensor (OA) F_x y su constante de calibración a 0.64 m del brazo de palanca.

En la figura (4.27) Se muestra la ecuación general de calibración para el octagonal Verde Azul utilizando los datos de los cuadros (4.8), (4.9) y (4.10). Teniendo como valor de constante general $9.426 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$.

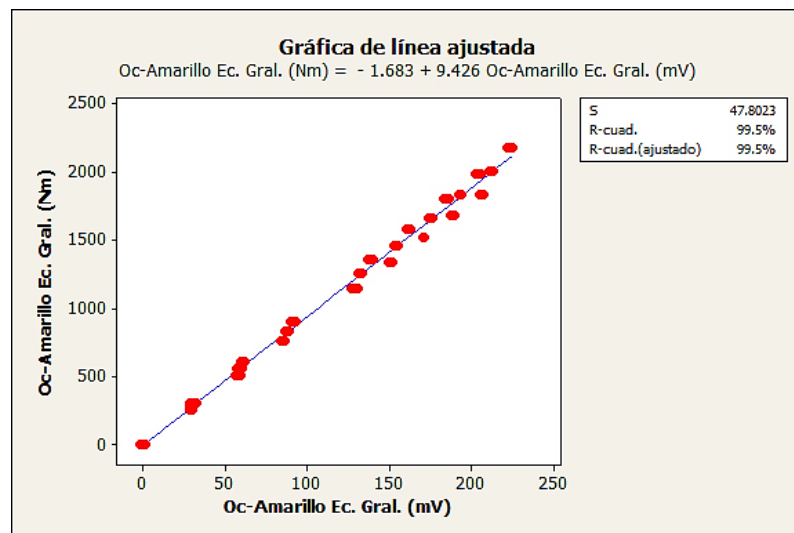


Figura 4.27 Ecuación general de línea ajustada del sensor octagonal Amarillo y su constante de calibración.

4.2.2 Resultados de calibración del sensor Octagonal Verde (OV) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).

Como se observa en las figura (4.28), (4.29) y (4.30) las gráficas escalonadas para las distancias del brazo de palanca con la carga y descarga de pesos (contrapesos de tractor) utilizadas para fines de calibración del sensor octagonal Verde para F_x , teniendo este una capacidad 40 kN.

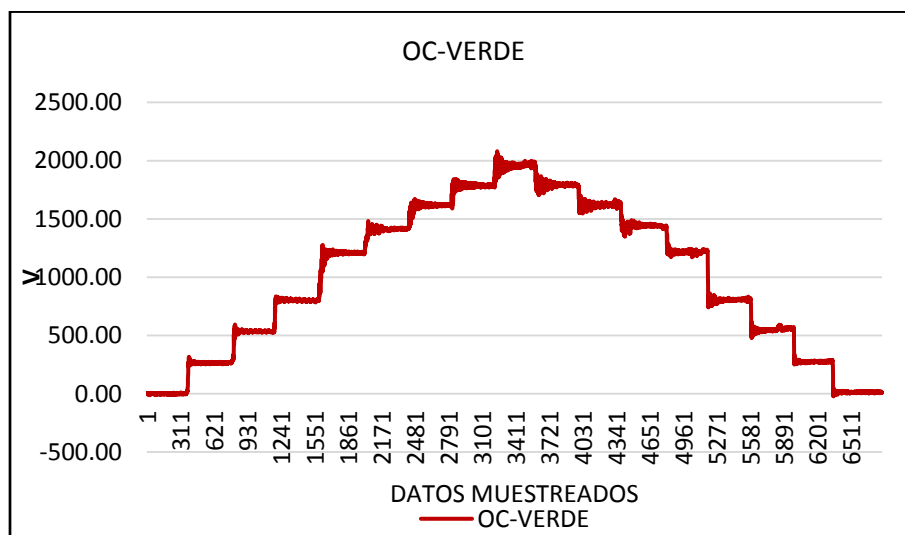


Figura 4.28 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OV) a 0.54 m del brazo de palanca.

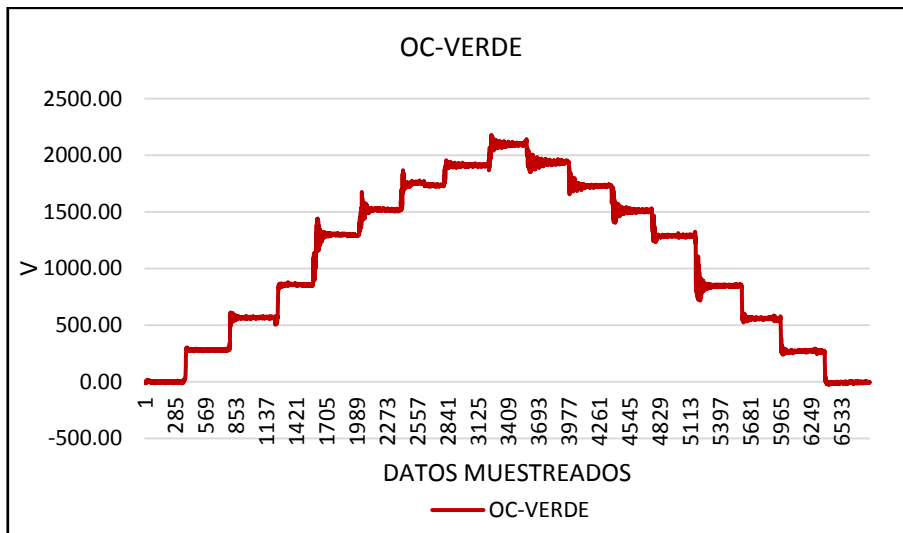


Figura 4.29 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OV) a 0.59 m del brazo de palanca.

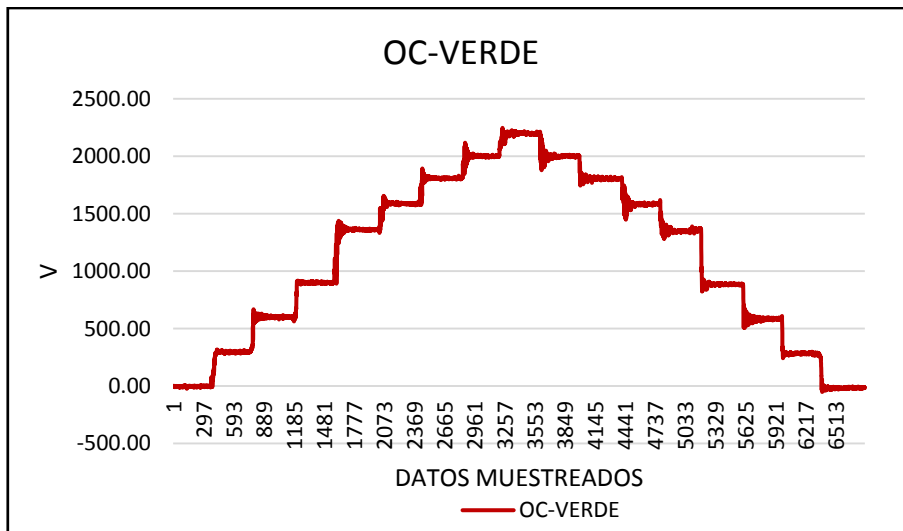


Figura 4.30 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OV) a 0.64 m del brazo de palanca.

En los cuadros (4.11), (4.12) y (4.13) se observan los datos de respuesta en mV contra los pesos conocidos del (OV) por el brazo de palanca cuya capacidad es de 40 kN . Dichos pesos son llevados a unidades de fuerza por cada metro (Nm) ya que se multiplica la DBP por las fuerzas (N).

Cuadro 4.11 Datos de respuesta en mV del sensor (OV) a 0.54 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	27	254	28	254	27	254	27	254	26	254	27	254
96	55	509	55	509	55	509	55	509	54	509	55	509
144	82	763	83	763	81	763	82	763	81	763	81	763
217	123	1150	124	1150	125	1150	124	1150	122	1150	122	1150
252	144	1335	145	1335	145	1335	145	1335	143	1335	144	1335
287	165	1520	166	1520	165	1520	167	1520	163	1520	164	1520
317	182	1679	183	1679	182	1679	184	1679	180	1679	182	1679
347	199	1838	200	1838	200	1838	201	1838	198	1838	201	1838
317	183	1679	183	1679	183	1679	184	1679	181	1679	184	1679
287	165	1520	165	1520	165	1520	166	1520	163	1520	167	1520
252	147	1335	145	1335	145	1335	145	1335	143	1335	146	1335
217	124	1150	124	1150	124	1150	125	1150	121	1150	128	1150
144	82	763	83	763	82	763	83	763	80	763	82	763
96	56	509	56	509	55	509	57	509	53	509	56	509
48	28	254	29	254	28	254	30	254	25	254	28	254
0	1	0	0	0	1	0	2	0	-2	0	2	0

Cuadro 4.12 Datos de respuesta en mV del sensor (OV) a 0.59 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	29	278	29	278	29	278	30	278	29	278	29	278
96	58	556	59	556	59	556	59	556	58	556	59	556
144	88	834	89	834	88	834	89	834	88	834	88	834
217	133	1256	134	1256	133	1256	134	1256	134	1256	134	1256
252	155	1458	155	1458	155	1458	157	1458	156	1458	156	1458
287	179	1661	178	1661	177	1661	178	1661	178	1661	178	1661
317	195	1835	196	1835	195	1835	197	1835	196	1835	197	1835
347	214	2008	215	2008	214	2008	215	2008	216	2008	216	2008
317	198	1835	196	1835	197	1835	196	1835	196	1835	196	1835
287	176	1661	178	1661	176	1661	178	1661	177	1661	177	1661
252	154	1458	155	1458	154	1458	155	1458	155	1458	155	1458
217	132	1256	133	1256	132	1256	133	1256	133	1256	133	1256
144	87	834	90	834	87	834	90	834	89	834	87	834

96	57	556	59	556	57	556	60	556	59	556	58	556
48	28	278	30	278	29	278	30	278	32	278	28	278
0	0	0	1	0	0	0	-1	0	1	0	-1	0

Cuadro 4.13 Datos de respuesta en mV del sensor (OV) a 0.64 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	30	301	31	301	31	301	31	301	31	301	30	301
96	62	603	62	603	62	603	61	603	62	603	62	603
144	92	904	92	904	93	904	92	904	92	904	92	904
217	139	1363	139	1363	140	1363	138	1363	139	1363	139	1363
252	162	1582	162	1582	162	1582	162	1582	162	1582	162	1582
287	185	1802	185	1802	185	1802	185	1802	186	1802	185	1802
317	204	1990	204	1990	204	1990	204	1990	204	1990	204	1990
347	225	2179	225	2179	224	2179	225	2179	224	2179	223	2179
317	204	1990	205	1990	206	1990	206	1990	205	1990	204	1990
287	185	1802	185	1802	185	1802	184	1802	185	1802	184	1802
252	162	1582	162	1582	162	1582	161	1582	163	1582	161	1582
217	138	1363	138	1363	139	1363	138	1363	139	1363	138	1363
144	91	904	91	904	91	904	92	904	91	904	91	904
96	60	603	61	603	61	603	60	603	61	603	61	603
48	29	301	30	301	31	301	30	301	31	301	30	301
0	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0

En las figuras (4.31), (4.32) y (4.33) se muestra una regresión lineal a través del programa Minitab con una gráfica de línea ajustada de calibración del (OV) con capacidad de 40 kN, además de su coeficiente de correlación. Teniendo para las constantes del (OV) los valores $9.203 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$, $9.339 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$ y $9.712 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$, respectivamente.

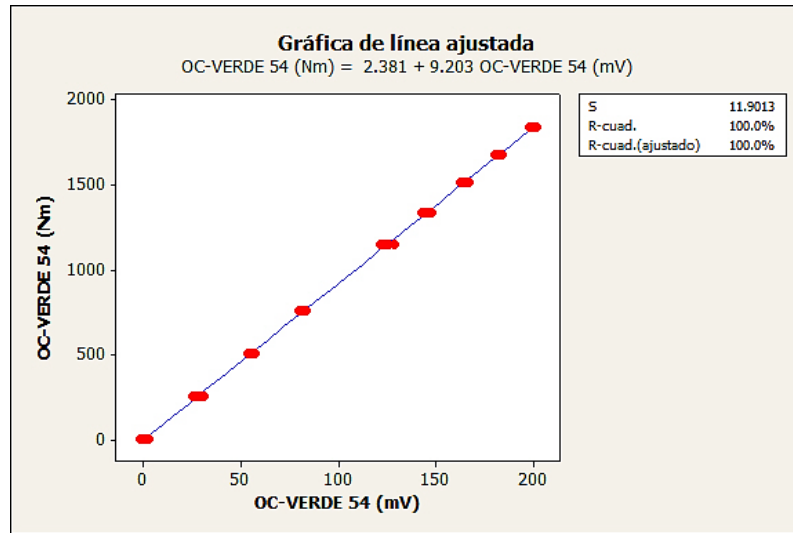


Figura 4.31 Línea ajustada del sensor (OV) F_x y su constante de calibración a 0.54 m del brazo de palanca.

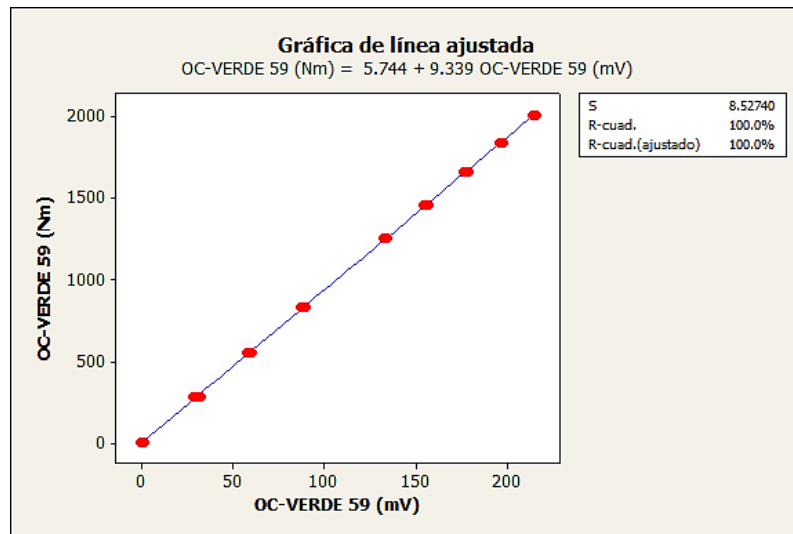


Figura 4.32 Línea ajustada del sensor (OV) F_x y su constante de calibración a 0.59 m del brazo de palanca.

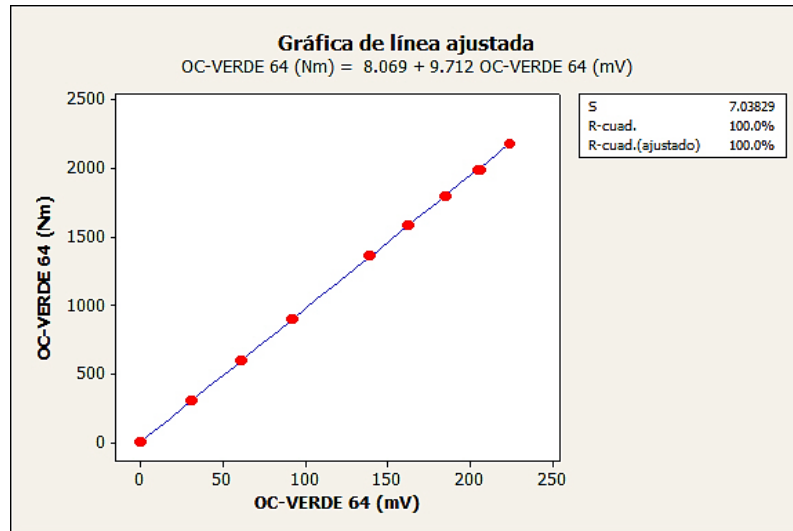


Figura 4.33 Línea ajustada del sensor (OV) F_x y su constante de calibración a 0.64 m del brazo de palanca.

En la figura (4.34) se muestra la ecuación general de calibración para el Octagonal Verde utilizando los datos de los cuadros (4.11), (4.12) y (4.13). Teniendo como valor de constante general $9.462 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$.

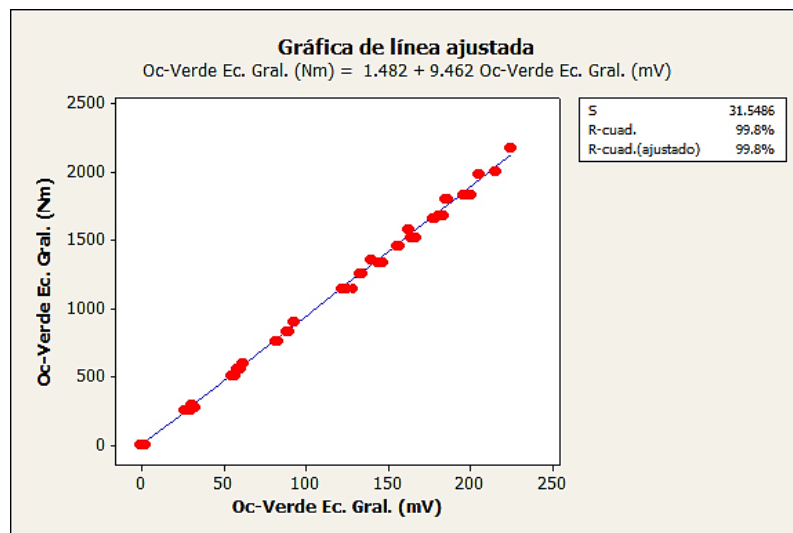


Figura 4.34 Ecuación general de línea ajustada del sensor octagonal Verde y su constante de calibración.

4.2.3 Resultados de la calibración del sensor Octagonal Rojo (OR) a las distancias de brazo de palanca (0.54 m, 0.59 m y 0.64 m).

Como se observa en las figuras (4.35), (4.36) y (4.37) las gráficas escalonadas para las distancias del brazo de palanca con la carga y descarga de pesos (contrapesos de tractor) utilizados para fines de calibración del sensor Octagonal Rojo para F_x , teniendo este una capacidad 40 kN.

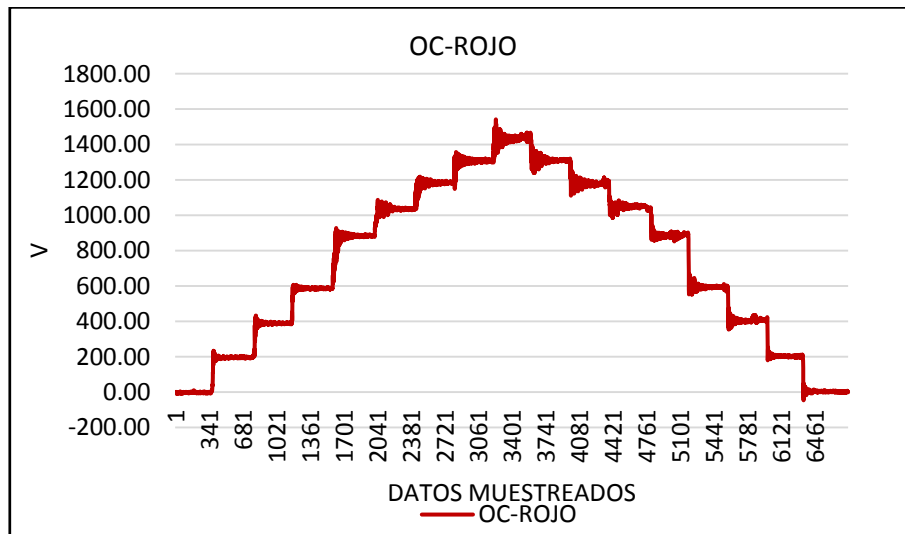


Figura 4.35 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OR) a 0.54 m del brazo de palanca.

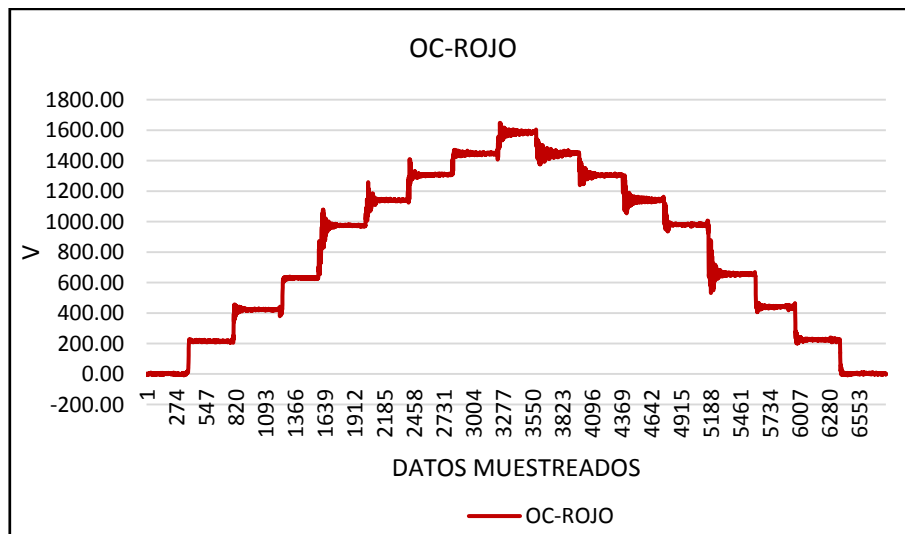


Figura 4.36 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OR) a 0.59 m del brazo de palanca.

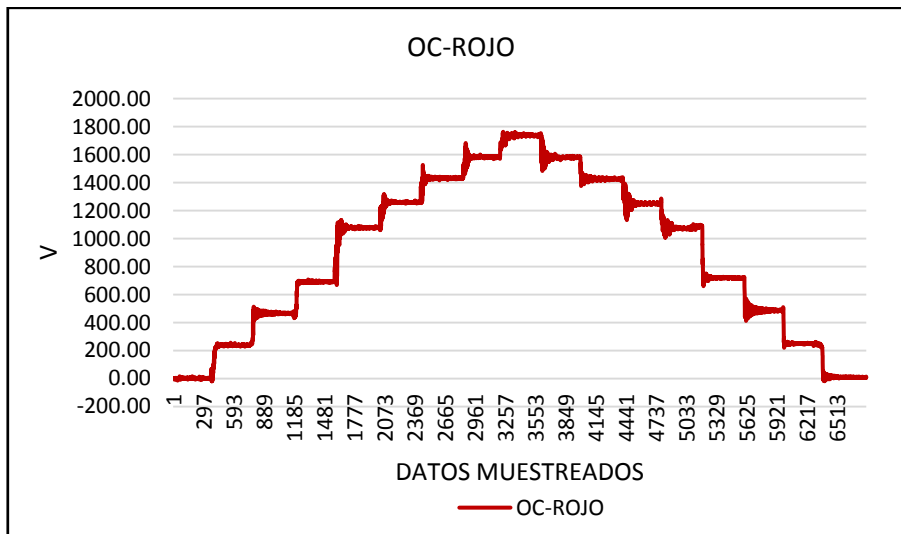


Figura 4.37 Gráfica escalonada de calibración del transductor (OR) a 0.64 m del brazo de palanca.

En los cuadros (4.14), (4.15) y (4.16) se observan los datos de respuesta en *mV* contra los pesos conocidos del (OR) cuya capacidad es de 40 *kN*. Dichos pesos son convertidos a unidades de fuerza por cada metro (*Nm*) ya que se multiplica la DBP por las fuerzas (*N*).

Cuadro 4.14 Datos de respuesta en *mV* del sensor (OR) a 0.54 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	20	254	20	254	20	254	20	254	20	254	20	254
96	40	509	40	509	40	509	40	509	40	509	41	509
144	60	763	60	763	60	763	59	763	60	763	61	763
217	90	1150	90	1150	90	1150	90	1150	90	1150	91	1150
252	106	1335	106	1335	105	1335	104	1335	105	1335	106	1335
287	121	1520	121	1520	120	1520	119	1520	120	1520	122	1520
317	134	1679	134	1679	133	1679	132	1679	132	1679	135	1679
347	146	1838	146	1838	146	1838	145	1838	145	1838	147	1838
317	134	1679	134	1679	133	1679	132	1679	133	1679	134	1679
287	120	1520	120	1520	120	1520	119	1520	119	1520	121	1520
252	107	1335	105	1335	105	1335	104	1335	104	1335	106	1335
217	90	1150	91	1150	89	1150	89	1150	89	1150	94	1150
144	61	763	61	763	60	763	59	763	60	763	61	763
96	42	509	40	509	40	509	39	509	40	509	42	509

48	21	254	20	254	20	254	19	254	20	254	21	254
0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0

Cuadro 4.15 Datos de respuesta en mV del sensor (OR) a 0.59 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	22	278	22	278	22	278	22	278	22	278	22	278
96	43	556	44	556	44	556	44	556	44	556	44	556
144	64	834	66	834	66	834	65	834	66	834	66	834
217	99	1256	99	1256	101	1256	100	1256	99	1256	100	1256
252	116	1458	115	1458	118	1458	116	1458	116	1458	118	1458
287	133	1661	132	1661	135	1661	133	1661	132	1661	134	1661
317	147	1835	146	1835	149	1835	147	1835	146	1835	149	1835
347	161	2008	160	2008	164	2008	161	2008	161	2008	163	2008
317	147	1835	146	1835	149	1835	147	1835	146	1835	149	1835
287	133	1661	132	1661	135	1661	133	1661	132	1661	134	1661
252	116	1458	115	1458	118	1458	116	1458	115	1458	118	1458
217	100	1256	99	1256	102	1256	100	1256	99	1256	101	1256
144	67	834	66	834	68	834	67	834	66	834	68	834
96	45	556	44	556	46	556	45	556	44	556	46	556
48	23	278	22	278	24	278	23	278	22	278	24	278
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0

Cuadro 4.16 Datos de respuesta en mV del sensor (OR) a 0.64 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	24	301	24	301	24	301	24	301	24	301	24	301
96	47	603	47	603	48	603	48	603	48	603	48	603
144	70	904	71	904	71	904	71	904	70	904	71	904
217	110	1363	108	1363	107	1363	107	1363	106	1363	107	1363
252	128	1582	126	1582	125	1582	125	1582	125	1582	125	1582
287	146	1802	144	1802	143	1802	143	1802	143	1802	143	1802
317	161	1990	160	1990	158	1990	159	1990	158	1990	159	1990
347	177	2179	175	2179	174	2179	175	2179	174	2179	175	2179
317	161	1990	160	1990	159	1990	159	1990	159	1990	159	1990

287	145	1802	144	1802	143	1802	144	1802	143	1802	143	1802
252	127	1582	126	1582	125	1582	125	1582	125	1582	125	1582
217	109	1363	109	1363	107	1363	108	1363	108	1363	108	1363
144	73	904	72	904	71	904	72	904	71	904	72	904
96	49	603	49	603	47	603	48	603	48	603	48	603
48	25	301	25	301	23	301	24	301	24	301	24	301
0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0

En las figuras (4.38), (4.39) y (4.40) se muestran las regresiones lineales a través del programa Minitab con una gráfica de línea ajustada de calibración del (OR) con capacidad de 40 kN, además de su coeficiente de correlación. Teniendo para las constantes del (OR) los valores $12.62 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$, $12.46 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$ y $12.51 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$, respectivamente.

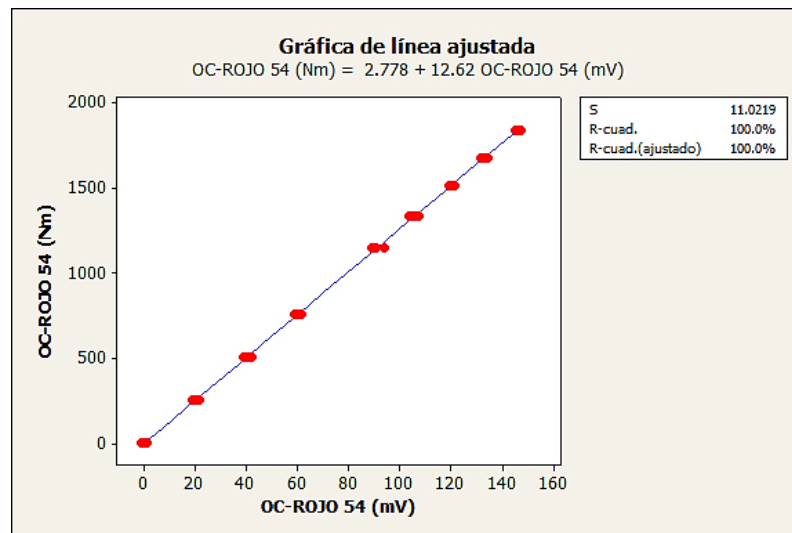


Figura 4.38 Línea ajustada del sensor (OR) F_x y su constante de calibración a 0.54 m del brazo de palanca.

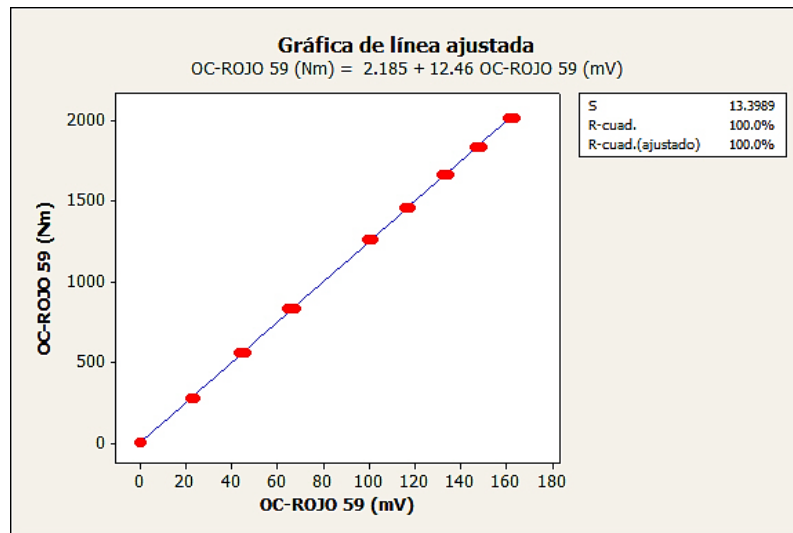


Figura 4.39 Línea ajustada del sensor (OR) F_x y su constante de calibración a 0.59 m del brazo de palanca.

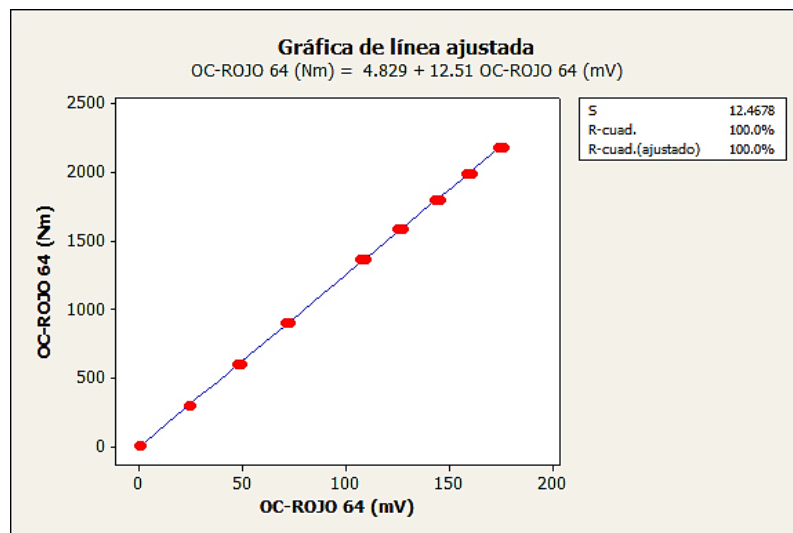


Figura 4.40 Línea ajustada del sensor (OR) F_x y su constante de calibración a 0.64 m del brazo de palanca.

En la figura (4.41) se muestra la ecuación general de calibración para el octagonal Rojo utilizando los datos de los cuadros (4.14), (4.15) y (4.16). Teniendo como valor de constante general $12.52 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$.

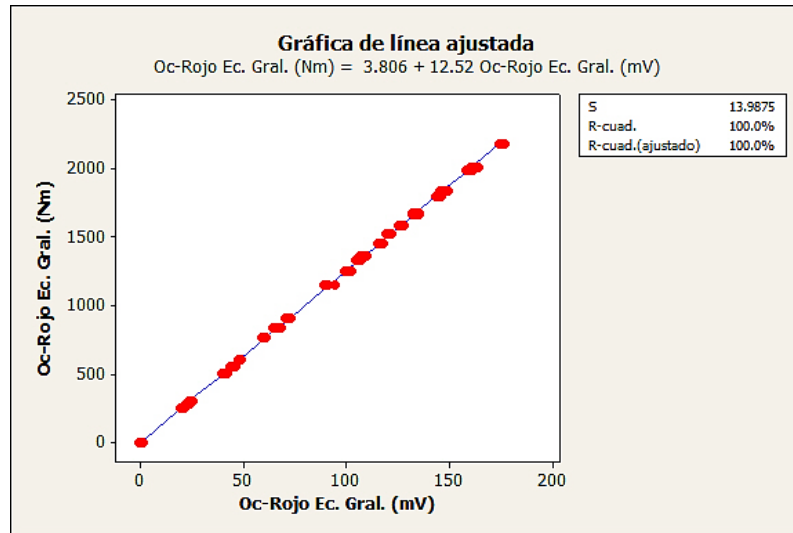


Figura 4.41 Ecuación general de línea ajustada del sensor octagonal Rojo y su constante de calibración.

4.3 Resultados de calibración del dinamómetro de Tiro (Axial)

En la figura (4.42) se muestra la gráfica escalonada que corresponde a los pesos aplicados al dinamómetro de tiro (Axial) y la respuesta en mV.

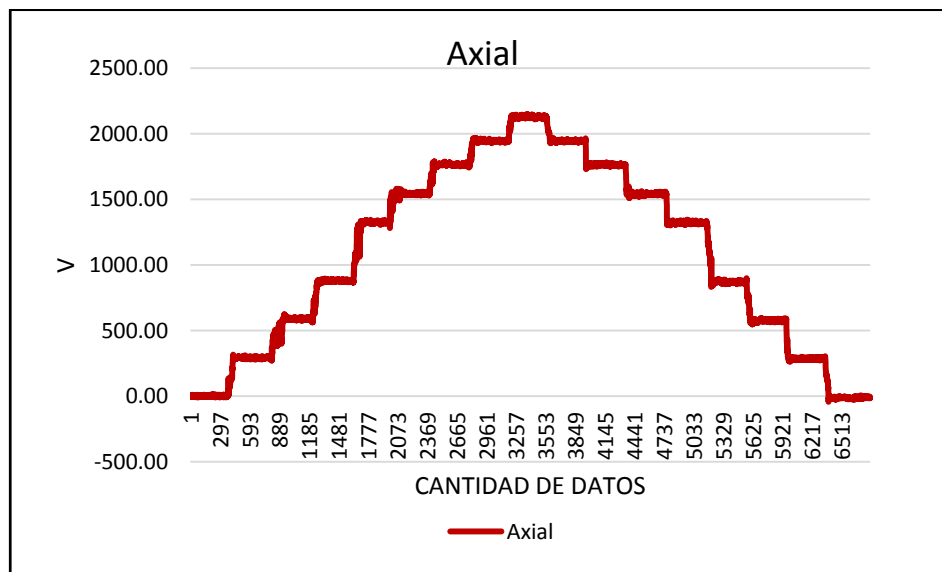


Figura 4.42 Grafica escalonada de calibración del transductor (Axial).

En el cuadro (4.17) se observan los datos de respuesta en mV contra los pesos conocidos del (Axial) cuya capacidad es de 80 kN . Dichos pesos son llevados a unidades de fuerza (N).

Cuadro 4.17 Datos de respuesta en mV del sensor (Axial).

Peso (kg)	R1		R2		R3	
	mV	N	mV	N	mV	N
0	0	0	0	0	0	0
48	30	471	30	471	30	471
96	52	942	59	942	60	942
144	89	1413	90	1413	90	1413
217	135	2129	135	2129	136	2129
252	157	2472	157	2472	158	2472
287	180	2815	180	2815	181	2815
317	198	3110	198	3110	199	3110
347	217	3404	217	3404	218	3404
317	198	3110	198	3110	200	3110
287	179	2815	180	2815	181	2815
252	156	2472	157	2472	158	2472
217	134	2129	135	2129	135	2129
144	89	1413	89	1413	90	1413
96	59	942	59	942	60	942
48	28	471	29	471	30	471
0	-2	0	-2	0	0	0

En la figura (4.43) se muestra la regresión lineal a través del programa Minitab con una gráfica de línea ajustada de calibración del (Axial) con capacidad de 80 kN . Teniendo una constante del (Axial) de 15.58 N .

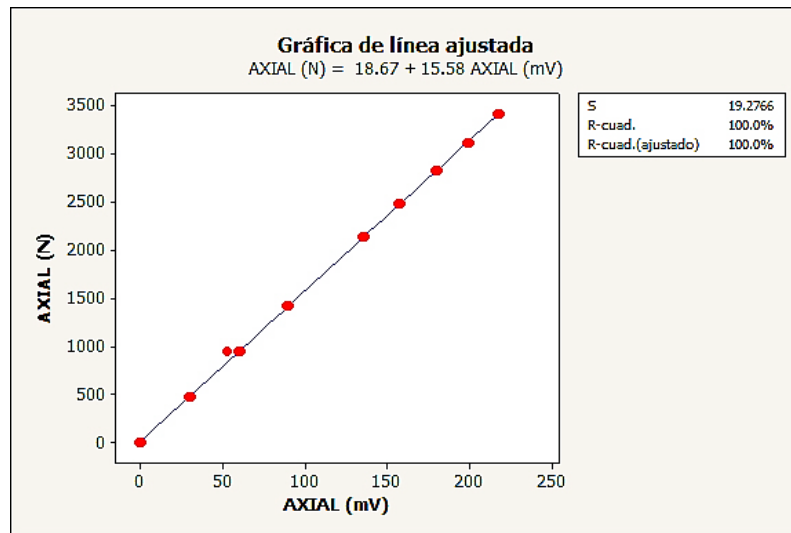


Figura 4.43 Línea ajustada del sensor (Axial) F_x y su constante de calibración.

Cuadro 4.18 Constantes obtenidas de los sensores y constante obtenida para el (OR) con la proporción.

Ecuaciones de calibración							
Sensores	DBP a 0.54 m	DBP a 0.59 m	DBP a 0.64 m	Ec. Gral.	Unidades	Valor de Galgas	R-Cuadrada(Ajustada)
Oc-Ro_Am	15.45	15.65	15.64	15.58	N mV ⁻¹	350Ω	99.90%
Oc-Ve_Az	15.76	15.56	15.28	15.53	N mV ⁻¹	350 Ω	99.20%
Oc-Amarillo	8.92	9.49	9.74	9.43	Nm mV ⁻¹	350 Ω	99.50%
Oc-Verde	9.2	9.34	9.71	9.46	Nm mV ⁻¹	350 Ω	99.80%
Oc-Rojo	12.62	12.46	12.51	12.52	Nm mV ⁻¹	120 Ω	100%
Oc-Rojo	9.63	9.51	9.54	9.35	Nm mV ⁻¹	350 Ω	100%
Axial	-	-	-	15.58	N mV ⁻¹	350 Ω	100%

Los datos y las gráficas de línea ajustada para las DBP y la Ec. Gral. de calibración Octagonal Rojo Con galgas de 350 Ω se muestran en el (APENDICE E).

4.4 Análisis de varianza

Cuadro 4.19 Datos de constantes de los octagonales que constituyen el transductor integral obtenidos para realizar el análisis de varianza.

DATOS CONSTANTES DE OCTAGONALES						
OC-Amarillo						
DBT (m) 1	R1	R2	R3	R4	R5	R6
0.54	8.928	8.886	8.907	8.926	8.931	8.925
0.59	9.479	9.441	9.522	9.491	9.449	9.495
0.64	9.792	9.786	9.738	9.723	9.682	9.706
OC-Verde						
DBT (m) 2	R1	R2	R3	R4	R5	R6
0.54	9.224	9.209	9.203	9.186	9.233	9.186
0.59	9.323	9.364	9.363	9.335	9.361	9.286
0.64	9.686	9.701	9.722	9.697	9.719	9.749
OC-Rojo						
DBT (m) 3	R1	R2	R3	R4	R5	R6
0.54	9.635	9.597	9.649	9.683	9.700	9.583
0.59	9.532	9.604	9.410	9.541	9.581	9.452
0.64	9.436	9.526	9.568	9.566	9.599	9.576

Cuadro 4.20 Análisis de varianza

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	2	0.362305	0.181152	3.0124	0.056
ERROR	51	3.066895	0.060135		
TOTAL	53	3.429199			
C.V.=	2.59 %				

Cuadro 4.21 Tabla de medias

TRATAMIENTOS	MEDIA
OCTAGONAL AMARILLO	18 9.378167
Octagonal Verde	18 9.419277
Octagonal Rojo	18 9.568777

Al realizar la comparación de medias, el resultado nos indica que no existe diferencia estadística significativa entre las tres constantes obtenidas, para cada uno de los tres

octagonales evaluados. Lo que significa que la fuerza resultante genera el mismo momento para cada uno de los octagonales independientemente de la distancia

4.5 Determinación de la posición de la fuerza resultante del sistema integral de transductores

Para determinar la posición de la fuerza resultante, donde la magnitud de esta es igual a la fuerza detectada por los octagonales se utilizaron las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3). El valor obtenido fue de 0.60 m y es a partir de ese punto, donde las fuerzas monitoreadas de la herramienta se sobre y subestiman en el transductor integral. En la figura (4.44) se muestra la ecuación utilizada para la determinación de la posición resultante de las fuerzas monitoreadas en el sistema integral, compuesto por el (OV), (OA) y (OR).

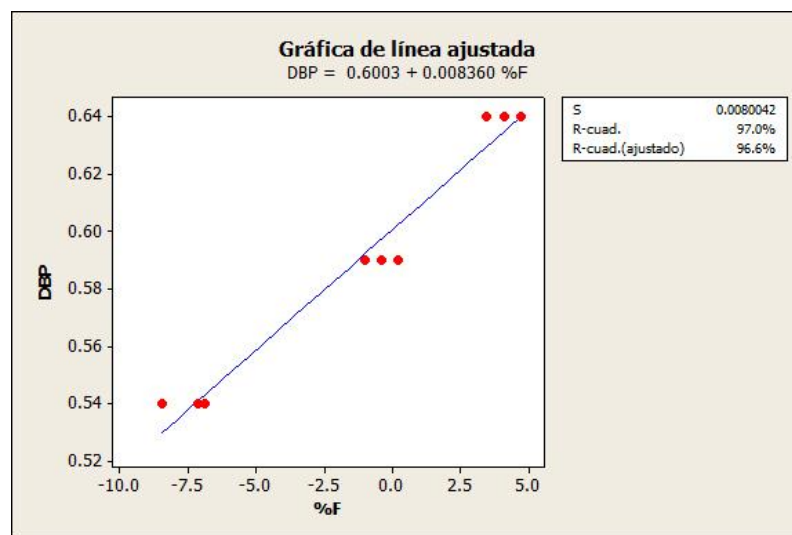


Figura 4.44 Gráfica de la ecuación de la posición de la resultante de las fuerzas monitoreadas.

4.6 Evaluaciones en campo

4.6.1 Determinación de resistencia al rodamiento

Una de las pruebas en campo, es la determinación de la fuerza de tiro, actualmente el método aprobado en México (Norma de Arados NMX-O-182-SCFI-2003) requiere

de un dinamómetro de tiro el cual es colocado entre dos tractores, un tractor con el implemento a evaluar en posición de trabajo y otro como fuente de potencia.

La evaluación consistió en calcular el coeficiente de rodamiento con el implemento levantado y en posición de trabajo. Ver en la figura (4.45).



Figura 4.45 Recorrido del tractor con el implemento arriba para determinar la resistencia al rodamiento.

Cuadro 4.22 Análisis espectral del sensor Axial para determinar la resistencia al rodamiento; Media (M) + Espectro (E) en V, Media + Espectro por la constante (K) del sensor Axial en unidades de fuerza (kN).

N° repetición	Sensor Axial (Fx)			
	Media (V)	Espectro (V)	M+E (V)	(M+E)*K (kN)
R1	0.31	0.03	0.34	5.27
R2	0.32	0.02	0.34	5.30
R3	0.33	0.01	0.34	5.30
R4	0.30	0.02	0.32	4.97
R5	0.35	0.03	0.37	5.83
R6	0.34	0.02	0.36	5.58
R7	0.31	0.04	0.35	5.43
R8	0.33	0.03	0.36	5.60
R9	0.34	0.03	0.37	5.83
R10	0.32	0.03	0.35	5.52
R11	0.31	0.03	0.34	5.29
R12	0.31	0.05	0.36	5.68
Medias	0.32	0.03	0.35	5.47

En el cuadro (4.22) se muestra el análisis espectral del sensor Axial para determinar la resistencia al rodamiento, cuyo valor medio fue de 5.4661 kN.

4.6.2 Evaluación de diferentes arreglos empleando el transductor integral

En la figura (4.46) se muestra un ejemplo de los datos obtenidos bajo condiciones de campo de las fuerzas detectadas por el sensor integral. Se observan las magnitudes de las fuerzas en mV para el sensor Amarillo, sensor Verde y el sensor Rojo. Así como, las fuerzas detectadas en los octagonales extendidos montados en el prototipo articulado (Sensor Verde-Azul, Sensor Rojo-Amarillo y el sensor Axial).

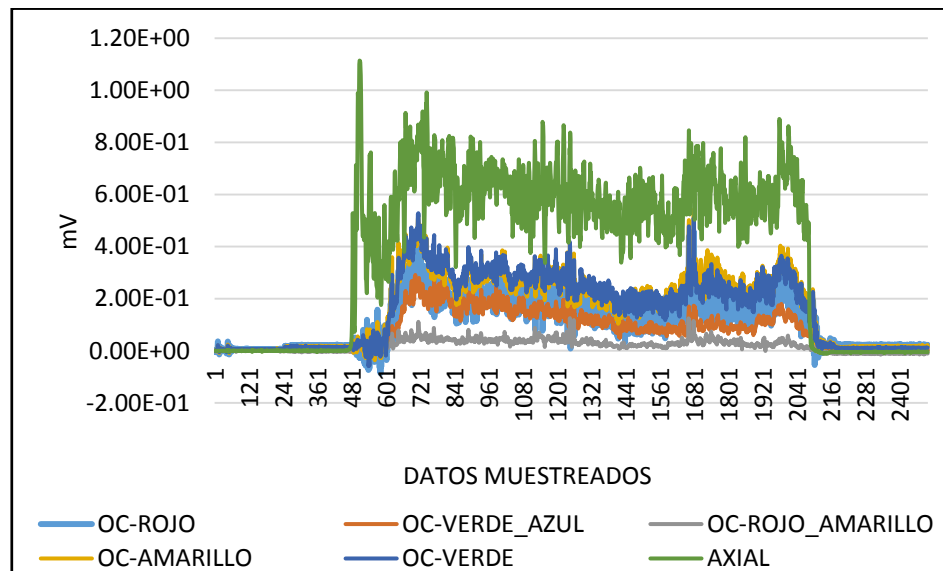


Figura 4.46 Gráficas obtenidas de los sensores integral y Axial en estado dinámico.

En el cuadro (4.23) se muestran los resultados de las fuerzas monitoreadas con el sensor integral de los arreglos de los cinceles evaluados. En el primer bloque de arreglos se observa las magnitudes de las fuerzas utilizando uno y dos cinceles sin alas a tres diferentes profundidades de evaluación. Para el caso de un cincel, las fuerzas van desde 2.42 kN a 10.76 kN para profundidades de 0.20, 0.30 y 0.40 m ,

respectivamente. Para el caso de dos cinceles, estas fuerzas van desde 7.35 kN a 11.41 kN para profundidades de 0.30 m a 0.40 m .

En el segundo grupo de arreglos evaluados, los cuales incluyeron 2 cinceles frontales a 0.20 m y un cincel trasero con arreglos sin alas, con alas medianas y alas grandes a las profundidades de 0.20 m , 0.30 m y 0.40 m . En el cuadro se aprecia claramente el efecto de la profundidad de laboreo del cincel trasero para cada uno de los arreglos sin alas y con diferentes tamaños de alas. La magnitud de la fuerza se incrementa de 7.97 kN a 14.69 kN para los arreglos de 2 cinceles frontales a 0.20 m y un cincel trasero a 0.40m sin alas en comparación con el arreglo de 2 cinceles frontales a 0.20 m y un cincel trasero con ala grande de 0.60 m de ancho de trabajo. En los arreglos con alas medianas y alas grandes en los cinceles traseros para las profundidades de 0.30 m y 0.40 m se tuvo una magnitud promedio de 9.335 kN y 14.25 kN , respectivamente. No hubo diferencias estadísticas significativas en el empleo de alas de 0.45 m y de 0.60 m de ancho de trabajo.

En el tercer grupo evaluado, se muestran los arreglos de 4 cinceles frontales combinados con dos cinceles traseros con alas y tres cinceles traseros sin alas, empleando el marco del Eco-Byson para la evaluación de los arreglos. Los resultados obtenidos en la evaluación con el arreglo de 0.30 m de profundidad se aprecian una clara disminución de la resistencia específica para los arreglos de 6 cinceles, de 4 cinceles frontales y dos cinceles traseros con alas en comparación con el arreglo de 7 cinceles sin alas. Para los primeros se obtuvo una resistencia específica media de 34.69 kNm^{-2} en comparación con 52.35 kNm^{-2} para el arreglo de 7 cinceles sin alas lo cual representa una disminución de 33.73 % de resistencia específica. Valores similares fueron obtenidos por Spoor y Godwin (1978).

Cuadro 4.23 Concentrado de las fuerzas monitoreadas por los sensores para los diferentes arreglos evaluados

Análisis de las fuerzas con diferentes arreglos evaluados			
Arreglos	Fuerzas (kN)	Área (m²)	Resistencia específica (kN m⁻²)
1C20SA	2.42	SD	SD
1C30SA	3.50	SD	SD
1C40SA	10.76	SD	SD
2C30SA	7.35	SD	SD
2C40SA	11.41	SD	SD
2CF201CT20SA	4.00	SD	SD
2CF201CT20AM	9.71	SD	SD
2CF201CT20AG	8.03	SD	SD
2CF201CT30SA	5.74	SD	SD
2CF201CT30AM	9.70	SD	SD
2CF201CT30AG	8.97	SD	SD
2CF201CT40SA	7.97	SD	SD
2CF201CT40AM	13.81	SD	SD
2CF201CT40AG	14.69	SD	SD
4CF20ECO	14.03	0.41	34.25
4CF202CT20AM	18.34	0.60	30.23
4CF202CT20AG	20.41	0.59	36.62
4CF202CT30AM	22.19	0.60	37.28
4CF202CT30AG	19.88	0.63	32.10
4CF202CT40AM	33.04	0.64	49.49
4CF303CT30SA	33.12	0.68	52.35

*SD Representa datos sin determinar que corresponde al área disturbada y resistencia específica de los arreglos del grupo 1 y 2.

Todos los análisis y datos mostrados en el cuadro (4.23) se encuentran en el (APÉNDICE E).

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El prototipo articulado de arado de cinceles mostró un desempeño adecuado en la funcionalidad y operación en su totalidad, al realizar laboreo variable bajo condiciones reales de operación.

Los dinamómetros empleados tanto para el sensor integral como para las mediciones de fuerzas en forma independiente, muestran una correlación superior al 99% en todos los casos.

El sensor integral detecta los momentos producto de las cargas y los brazos de palanca a diferencia de los sensores octagonales individuales que no son sensibles a la posición de las fuerzas.

La resistencia específica en los arreglos de seis cinceles (cuatro someros y dos cinceles profundos con alas), comparados a la profundidad de 0.30 m con el arreglo de siete cinceles sin alas es menor en un 33.73%. Esto confirma los resultados previos obtenidos en las evaluaciones.

Se requiere calibrar el sensor integral con cargas y brazos de palanca iguales a los que se realizaran en campo, ya que por debajo o por encima de la distancia de 0.61 m, la fuerza es subestimada o sobre estimada en el orden del 10% por cada 0.10 m de diferencia de la posición de la fuerza resultante con respecto a los 0.61m.

La magnitud de la fuerza detectada por el sensor integral es afectada por la estimación de la posición de la fuerza resultante con respecto de las posiciones de los OE integrales en el plano X-Y, considerando como origen el centro del transductor integral.

VI. LITERATURA CITADA

- Agamennoni, R.** 1996. Rotaciones y labranzas en la región semiárida bonaerense sur. En Labranzas en la Región Semiárida Argentina. D. Buschiazzi, J. Panigatti y F. Babinec. Ed. INTA CERLaP-San Luis, Argentina.
- Al-Jalil, H.F., Khadair, A. and Mukahal, W.** 2001. Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer. Soil and Tillage Research 62. Agricultural Engineering and Technology Department, Jordan University of Science and Technology, P.O. Box 3030, Irbid, Jordan. Pp. 153-156.
- Ashburner, J. y Sims, B.** 1984. Elementos de diseño del tractor y herramienta de labranza. IICA, San José, Costa Rica. P. 474.
- Barber, R.G., F. Navarro y M. Orellana.** 1993. Labranza Vertical. Centro de Investigación Agrícola Tropical, Misión Británica en Agricultura Tropical y Proyecto de Desarrollo Tierras Bajas del Este del Banco Mundial. Santa Cruz, Bolivia.
- Barber, R.G.** 1997. Los principales tipos de labranza. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín No. 8 de tierras y aguas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 8. Roma, Italia: Pp. 59-86.
- Biblioteca digital de la Universidad de Chile.** Labranza Vertical. [Chile], [Documento en línea]. [15-01-2014] <http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_agronomicas/villar04/parte10/01.html>
- Bonifaz, C.A.** 2012. Evaluación de un transductor integral para determinar las magnitudes de las fuerzas que actúan en los implementos de labranza. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

- Boone, F.R.** 1988. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil Tillage Research* 11(3-4): Wageningen, The Netherlands. Pp.283-324.
- Bowen, H. D.** 1981. Alleviating mechanical impedance. In: Arkin, G. F. and Taylor, H. M. *Modifying the root environment to reduce crop stress*. ASAE Monograph. 4., St. Joseph, Michigan, EE. UU. P. 18-57.
- Cabeda, M.S.V.** 1984. Degradação física e erosão. En: I Simpósio de manejo do solo e plantio direto no sul do Brasil e III Simpósio de conservação de solos do planalto. Passo Fundo, RS, Brasil 1983. Anais
- Camacho, J.H. y G.A. Rodríguez.** 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. *Agric. Téc.* 67(1): Pp.60-67.
- Campos, M.S.G.** 1993. Development of minimum maize planter for Mexican agriculture, unpublished PhD thesis, Newcastle University, England. P.167.
- Campos, M.S.G., R.A. Aragón y Cadena Z.M.** 2000. Diseño y comportamiento de tres transductores de fuerzas para la evaluación de herramienta de labranza. Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola. CLIA. X Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola AMIA 2000. México.
- Daberkow, S., Fernández, C. J. and M. Padgitt.** 2002. Precision Agriculture Technology Diffusion: Current Status and Future Prospects. Presented at the 6th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, Minnesota, EE. UU. July 14-17, 2002. Pp.15.
- De Alba, S.** 2001. Modelling the effects of complex topography and patterns of tillage on soil translocation by tillage with mouldboard plough. *J. Soil and Water Conservation*, 56. Madrid, España. Pp. 335-345.

- De Alba, S., Lindstrom, M., Schumacher, T.E. and Malo, D.D.** 2004. Transformation of soil landscapes due to soil redistribution by tillage: Towards a new conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes. *Catena* 58: Madrid, España. Pp. 77-100.
- De Dios, C.** 1972. Potencia y energía absorbidas por máquinas de labranza y siembra. INTA, Informe técnico No. 116: Pergamino, Argentina. P. 10.
- De Toro, A., J. Arvidsson.** 2003. Influence of spring preparation date and soil water content on seedbed physical conditions of a clay soil in Sweden. *Soil Tillage Res.* 70: Uppsala, Sweden. Pp.141-151.
- Dick, R.P.**1994. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. En: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., & Stewart B.A. (Eds.). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA special publication no. 35, Madison, Wisconsin, EE. UU. Pp. 107-124.
- Edmundo, H. H.** 1987. Manejo y conservación de suelos. Programa de cooperación agrícola del Cono Sur. *Dialogo XXIV.*, Santiago, Chile. Pp. 95-116.
- Elizondo, E., J.L. costa, E. Suero, K.P. Fabrizio y F. García.** 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo luego de la introducción de labranzas verticales en suelo bajo la siembra directa. *Ciencia del suelo* 19(1). Anguil, La Pampa, Argentina. Pp.11-19.
- FAO.** 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO. Roma, Italia, P. 204.
- FAO.**2002. Agricultura de conservación, uniendo producción con sostenibilidad. Federación Nacional de Cultivadores de cereales FENALCE (Fondo Nacional Cerealista).Boletín informativo de la subgerencia técnica N° 11. Roma, Italia. P.4.

- Ferrando, J. y Smith, J.** 1985. Vibrocultivador (I): potencia requerida según la velocidad de Trabajo. INTA, Serie: Labranzas No. 14. Castelar, Argentina.
- Friedrich, T.** 1997. Conceptos y objetivos de la labranza en agricultura conservacionista. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín No. 8 de tierras y aguas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) 4. Roma, Italia. Pp. 29-38.
- Gill, W. and Vanden Verg, G.** 1967. Soil dynamics in tillage and traction. USDA-ARS. Agriculture Handbook No. 316. Washington, DC, EE. UU. P. 511.
- Godwin, R. J.** 1975. An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies. J. Agric. Eng. Res., 20: Pp.347-352.
- Godwin, R. J., A. J. Reynolds, M. J. O'Dogherty and A.A. Ai-Ghazal.** 1993. A triaxial dynamometer for force and moment measurements on tillage implements. J. Agric. Engng. Rese. 55(3) Bedford, England, U.K.: Pp.189-205.
- Godwin, R.J.** 1974. An investigation into the mechanics of narrow tines in frictional soils. PhD. Thesis, Univ. of Reading. Reading, Berkshire, U. K. P. 248.
- Godwin, R.J., P.S.G. Magalhaes, S.M. Miller and Fry, R. K.** 1987. Instrumentation to study the force system and vertical dynamic behavior of soilengaging implements. J. Agric. Eng. Res., 36. Bedford, England, U.K.: Pp. 301-310.
- Godwin, R.J., Spoor, G. and Soomro, M.S.** 1984. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance. Jnal of Agr Eng Research 30. Bedford, England, U.K.: Pp. 47-56.
- Govers, G., Lobb, D.A. and Quine, T.A.** 1999. Tillage erosion and translocation: emergence of a new paradigm in soil erosion research. Soil & Tillage Research, 51. Amsterdam, Netherlands. Pp. 167-174.

- Herrera, A.** and Aguilar, Z. 2002. Sistemas de labranza de conservación con implementos de tracción animal para el piedemonte casanareño. Boletín técnico n° 27 Yopal, Casanare, Colombia.
- Hinojosa, M. G.** 2003. Desarrollo de un transductor de fuerza para la evaluación de implementos integrales en tractores categoría II basado en el diseño octagonal extendido. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- Hoag, D. L.** and Yoerger, R.R. 1975. Analysis and Design of Load Rings. Trans. ASAE, 19. St. Joseph, Minnesota, EE. UU. Pp. 995-1000.
- Hoogmoed, W.B.** 1999. Tillage for soil and water conservation in the semi-arid tropics. Tropical Resource Management Papers 24, Wageningen Agricultural University. The Netherlands. Wageningen, The Netherlands.
- Hossne, G. A. J.** Y Álvarez C. E. A. 2007. Influencia de la posición y número de los cuerpos del arado de cincel en un suelo de sabana de Venezuela. Revista UDO Agrícola 7. Monagas, Venezuela.
- Hunt, D.** 1987. Farm power and machinery management. 7th ed. Iowa State University Press. Iowa, EE. UU. Pp. 28-52; Pp. 277-288.
- IDAE.** 2005. Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España. Número especial.
- IDAE.** 2006. Ahorro, eficiencia energética y sistemas de laboreo agrícola. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España. 2ª Edición corregida.
- Karwasra, S.P.S.** 1991. Socio economic considerations in tillage. Proc. 12th Conference of ISTRO "soil Tillage for Agricultural Sustainability" IITA, Ibadán, Nigeria. Pp. 536-545.

- Kepner, R.A., R. Bainer and E.L. Barger.** 1978. Principles of farm machinery. Avi Pub. Co., Westport, Connecticut, EE. UU. P. 527.
- Khan, J., R.J. Godwin, J. Kilgour and B.S. Blackmore.** 2007. Design and calibration of a bi-axial extended octagonal ring transducer system for the measurement of tractor-implement forces. J. Eng. Appl. Sci., 2(1) Bedford, England, U.K.: Pp. 16-20.
- Kheiralla, A.F. A., Yahya, M. Zohadie and W. Ishak.** 2003. Design and development of a three-point auto hitch dynamometer for an agricultural tractor. AJSTD, 20 (3 and 4). Serdang, Selangor D.E., Malaysia: Pp. 271-288.
- Kheiralla, A.F. and Y. Azmi.** 2002. A Tractor instrumentation and data acquisition system for power and energy demand mapping. University Putra Malaysia. Serdang, Selangor D.E., Malaysia. P. 12.
- Korkut, I.** 2003. A Dynamometer design and its construction for milling operation. Materials and Design, 24(8). Technical Education Faculty, Gazi University. Besevler, Ankara, Turkey: Pp. 631-637.
- Kostristsyn, A.K.** 1956. Cutting of cohesive soil medium with knives and cones. Vsesoiuzz Akad. Sel'skokhoziaistvennykh Nauk. Zeml. Mekh. Sborn. Trudov, Leningrad, 3: Pp. 247-290.
- Lindstrom, M.J., Nelson, W.W. and Shumacher, T.E.** 1992. Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing. Soil & Tillage Research, 24. Minnesota, EE. UU. Pp. 243-255.
- López, L.J.A.** 2012. Evaluación de un sensor de permisividad eléctrica para agricultura de precisión. Tesis de Licenciatura. Departamento de Maquinaria Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- Lowen, E.G., Marshall, E.R., and Shaw, M.C.** 1951. Electric Strain Gauge Tool Dynamometers. Proc. Soc. Exp. Stress Analysis, 8(2). Ohio, EE. UU. Pp. 1-16.

- Marrón, G., H. Krüguer, A. Vallejos y M. Ripoll.** 1998. Requerimientos energéticos de escarificadores de cincel con montantes rígidos y flexibles en un suelo Argiudol típico. INTA-Buenos Aires. Bordenave, Buenos Aires, Argentina.
- Martínez, R. C.E., López, M. J. D., Díaz, M. J. R. Y Valdez, C.R.** 2002. Modelos de simulación para estimar el consumo energético requerido para efectuar la labranza. TERRA 20(2). México: Pp.183-188.
- McKyes, E.** 1985. Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering N° 7. Amsterdam, The Netherlands. P. 217.
- McKyes, E.** 1989. Agricultural Engineering Soil Mechanics. Developments in Agricultural Engineering N° 10. Amsterdam, The Netherlands. Pp. 192-219.
- McKyes, E. and Ali, O.S.** 1977. The cutting of soil by narrow blades. J. Terramechanics 14(2): Pp. 43-58.
- McLaughlin, N. B.** 1996. Correction of in Equation for Extended Ring Transducers. Trans. ASAE, 39(2). Canada. Pp. 443-444.
- McLaughlin, N. B., Tessier, S. and Guilbert, A.** 1998. Improved Double Extended Octagonal Ring Drawbar Transducer for 3-D Measurement. Can. Agric. Eng., 40. Ottawa, Canada. Pp. 257-264.
- Meyerhof, G.G.** 1951. The ultimate bearing capacity of foundations. Geotechnique, 2(4).Canada. Pp. 301-332.
- Miller, P.C.H.** 1971. Soil Failure and the nature of the force system with very narrow tines. B.Sc. Thesis, Nat. Col. Agric. Eng., Silsoe, Benford, U.K.
- Mojica, L.E.D.** 2000. Evaluación de discos cortadores de residuos y abresurco para la labranza de conservación empleando equipo multiuso tracción animal. Tesis, Licenciatura, Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México.

- Moo-Yam, V.M.J.** 1999. Desarrollo y evaluación de un sistema de adquisición de datos para la evaluación de implementos de labranza. Tesis, Maestría, Universidad Veracruzana, Instituto de ingeniería, Veracruz, Veracruz, México.
- Mouazen, A.M. and Ramón, H.** 2002. A numerical-statistical hybrid-modeling scheme for evaluation of different manure incorporation tools in a loamy sand soil. *Soil Tillage Res.* 58. Cranfield, Bedfordshire, U. K. Pp. 19-29.
- O'Callaghan, J. R. and Farrelly, K. M.** 1964. Cleavage of soil by tined implements. *J. Agric. Eng. Res.*, 9(3). Amsterdam, The Netherlands: Pp. 259-270.
- O'Dogherty, M. J.** 1975. A Dynamometer to Measure the Forces on a Sugar Beet Topping Knife. 20: Pp. 339-345.
- O'Dogherty, M. J.** 1996. The Design of octagonal Ring Dynamometer. *J. Agric.Eng. Res.*, 63. Amsterdam, The Netherlands: Pp. 9-18.
- Oussible, M., Crookston RK, Larson WE.** 1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield components of wheat. *Agrom. J.* 79. Amsterdam, The Netherlands: Pp. 882-886.
- Ozuna, G. C. A.** 2011. Evaluación de un transductor integral de fuerza bajo condiciones de campo. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- Pacheco, L. J. L.** 2012. Requerimientos de energía en la labranza vertical basado en el principio de profundidad crítica. Tesis de maestría, Universidad Autónoma agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- Pérez, M.P.** 2013. Labranza vertical empleando la teoría de profundidad crítica. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

- Phillips, S.H. and H.M. Young.** 1973. Agricultura sin laboreo. Labranza cero, Editorial Hemisferio Sur. Monagos, Venezuela.
- Ripoll, P. C.** 1975. Equipos de movimiento de tierras, labranza-cultivación. Milagro Ediciones Lérida. Lérida, España. P. 216.
- Soane, B. and J. Pidgeon.** 1975. Tillage requirements in relation to soil physical properties. Soil Science 119. Hamilton, New Zealand: Pp. 370-384.
- Spoor, G. and Godwin, R. J.** 1978. An experimental investigation into the deep loosening soil by rigid tines. J. Agric. Engng. Res. 23. Amsterdam, The Netherlands. Pp. 243-258.
- Stafford, J.V.** 1983. Force prediction model for brittle and flow failure of soil by draught tillage tools. Journal of Agricultural Engineering Research. 29(1). Amsterdam, The Netherlands. Pp. 51-60.
- Summers, J., A. Khalilian, and D. Batchelder.** 1986. Draft relationships for primary tillage in Oklahoma soils. Trans. ASAE 29. St. Joseph, Michigan, EE. UU. 37-39.
- Triplett, G. and D. Van Doren,** 1977. Agriculture Without tillage. Scientific American 236(1). New York, EE. UU. Pp. 28-33.
- Torri D., Borselli L., Calzolari C., Yañez M.S. and Salvador Sanchis M.P.** 2002. Soil erosion, land use, soil qualities and soil functions: effect of erosion. In Rubio J.L., Morgan R.P.C., Asins S. and Andreu V. (eds.) Man and Soil at the Third Millennium; Vol. I, Geoforma Ediciones S.L., Logroño, Spain. Pp. 131-148.

VII. ANEXOS

APÉNDICE A

A continuación se muestra la recodificación en MATLAB del programa *análisis* (Mojica, 2000) ahora llamado *análisis6* (modificado en 2014). Se diferencian porque ahora con el programa *análisis6* se pueden realizar el análisis espectral de seis columnas, es decir, podemos realizar el análisis de seis salidas de señal de los transductores octagonales o dinamómetro de tiro Axial, según se requiera.

```
clear
clc
file=input('Nombre de archivo de datos sin extensión : ','s');
filename=[file '.dat'];
eval(['load ' filename]);
disp('Listo, archivo cargado')
x=eval(file);
v=x(:,1);
h=x(:,2);
z=x(:,3);
j=x(:,4);
m=x(:,5);
n=x(:,6);
pas=input('Numero de corrida (1/6) : ','s');
disco=input('Titulo para las gráficas : ','s');
cv=[' Comp. Vert.' pas];
ch=[' Comp. Horiz.' pas];
cz=[' Comp. Vert.' pas];
cj=[' Comp. Horiz.' pas];
cm=[' Comp. Horiz.' pas];
cn=[' Comp. Horiz.' pas];

disp('Trabajando con columna 1...')
titulo=[disco cv ];
plot(v,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
dv=input('Desplazamiento del inicio de valores con respecto a cero : ');
v=v-dv;
signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
v=v*signo;
disp('En este momento se graficarán los datos ajustados...Pulsa una tecla...')
pause
plot(v,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
ini=input('Posición inicial para el análisis :');
fin=input('Posición final para el análisis :');
v=v(ini:fin);
media1=mean(v);
disp('La media del segmento de datos es: ');disp(media1)
```

```

disp('Este valor será restado para desplazar los datos hacia el cero')
disp('Pulsa una tecla...')
pause
v=v-media1;
plot(v,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias correspondientes.')
disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
pause
Pn1=(abs(fft(v))^2)/length(v);
f=(272/length(v))*(0:length(v)/2);
plot(f,Pn1(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on
disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango entre 1 y el siguiente valor : ');disp(length(f))
resp=input('¿ Definir nuevo rango (s/n) ? ','s');
if resp=='s'
ok=1;
while ok==1
a=input('Valor inicial : ');
b=input('Valor final : ');
plot(f(a:b),Pn1(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on
resp=input('¿ Definir un nuevo rango (s/n)? ','s');
ok=strcmp('s',resp);
end
end

maxpn1=max(Pn1);
disp('El valor máximo para Pn es : ');disp(maxpn1)
disp('A continuación, se analizará la columna 2. Pulsa una tecla...')

pause

disp('Trabajando con la columna 2...')

titulo=[disco ch];
plot(h,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
dh=input('Desplazamiento del inicio de valores con respecto a cero : ');
h=h-dh;
signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
h=h*signo;
disp('En este momento se graficarán los datos ajustados...Pulsa una tecla...')
pause
plot(h,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
ini=input('Posición inicial para el análisis : ');
fin=input('Posición final para el análisis : ');
h=h(ini:fin);
media2=mean(h);
disp('La media del segmento de datos es: ');disp(media2)
disp('Este valor será restado para desplazar los datos hacia el cero')
disp('Pulsa una tecla...')
pause
h=h-media2;
plot(h,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias correspondientes.')

```

```

disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
pause
Pn2=(abs(fft(h))*2)/length(h);
f=(272/length(h))*(0:length(h)/2);
plot(f,Pn2(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on
disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango entre 1 y el siguiente valor : ');disp(length(f))
resp=input('¿ Definir nuevo rango (s/n) ? ','s');
if resp=='s'
ok=1;
while ok==1
a=input('valor inicial : ');
b=input('valor final : ');
plot(f(a:b),Pn2(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on
resp=input('¿ Definir un nuevo rango (s/n)?','s');
ok=strcmp('s',resp);
end
end

maxpn2=max(Pn2);
disp('El valor máximo para Pn es : ');disp(maxpn2)
disp('A continuación, se analizará la columna 3. Pulsa una tecla...')

pause

disp('Trabajando con la columna 3...')

titulo=[disco cz];
plot(z,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
dz=input('Desplazamiento del inicio de valores con respecto a cero : ');
z=z-dz;
signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
z=z*signo;
disp('En este momento se graficarán los datos ajustados...Pulsa una tecla...')
pause
plot(z,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
ini=input('Posición inicial para el análisis : ');
fin=input('Posición final para el análisis : ');
z=z(ini:fin);
media3=mean(z);
disp('La media del segmento de datos es: ');disp(media3)
disp('Este valor será restado para desplazar los datos hacia el cero')
disp('Pulsa una tecla...')
pause
z=z-media3;
plot(z,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias correspondientes.')
disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
pause
Pn3=(abs(fft(z))*2)/length(z);
f=(272/length(z))*(0:length(z)/2);
plot(f,Pn3(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on

```



```

disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango entre 1 y el siguiente valor : ');disp(length(f))
resp=input('¿ Definir nuevo rango (s/n) ? ','s');
if resp=='s'
ok=1;
while ok==1
a=input('valor inicial : ');
b=input('valor final : ');
plot(f(a:b),Pn3(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on
resp=input('¿ Definir un nuevo rango (s/n)?','s');
ok=strcmp('s',resp);
end
end
maxpn3=max(Pn3);
disp('El valor máximo para Pn es : ');disp(maxpn3)
disp('A continuación, se analizará la columna 4. Pulsa una tecla...')

pause

disp('Trabajando con la columna 4...')

titulo=[disco cj];
plot(j,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
dj=input('Desplazamiento del inicio de valores con respecto a cero : ');
j=j-dj;
signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
j=j*signo;
disp('En este momento se graficarán los datos ajustados...Pulsa una tecla...')
pause
plot(j,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
ini=input('Posición inicial para el análisis : ');
fin=input('Posición final para el análisis : ');
j=j(ini:fin);
media4 =mean(j);
disp('La media del segmento de datos es: ');disp(media4)
disp('Este valor será restado para desplazar los datos hacia el cero')
disp('Pulsa una tecla...')
pause
j=j-media4;
plot(j,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias correspondientes.')
disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
pause
Pn4=(abs(fft(j))*2)/length(j);
f=(272/length(j))*(0:length(j)/2);
plot(f,Pn4(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on
disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango entre 1 y el siguiente valor : ');disp(length(f))
resp=input('¿ Definir nuevo rango (s/n) ? ','s');
if resp=='s'
ok=1;
while ok==1
a=input('valor inicial : ');
b=input('valor final : ');

```

```

    plot(f(a:b),Pn4(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on
    resp=input('¿ Definir un nuevo rango (s/n)?','s');
    ok=strcmp('s',resp);
end
end
maxpn4=max(Pn4);
disp('El valor máximo para Pn es : ');disp(maxpn4)

disp('Trabajando con la columna 5...')
titulo=[disco cm];
plot(m,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
dm=input('Desplazamiento del inicio de valores con respecto a cero : ');
m=m-dm;
signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
m=m*signo;
disp('En este momento se graficarán los datos ajustados...Pulsa una tecla...')
pause
plot(m,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
ini=input('Posición inicial para el análisis : ');
fin=input('Posición final para el análisis : ');
m=m(ini:fin);
media5 =mean(m);
disp('La media del segmento de datos es: ');disp(media5)
disp('Este valor será restado para desplazar los datos hacia el cero')
disp('Pulsa una tecla...')
pause
m=m-media5;
plot(m,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias correspondientes.')
disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
pause
Pn5=(abs(fft(m))^2)/length(m);
f=(272/length(m))*(0:length(m)/2);
plot(f,Pn5(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on
disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango entre 1 y el siguiente valor : ');disp(length(f))
resp=input('¿ Definir nuevo rango (s/n) ? ','s');
if resp=='s'
    ok=1;
while ok==1
    a=input('valor inicial : ');
    b=input('valor final : ');
    plot(f(a:b),Pn5(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom
on
    resp=input('¿ Definir un nuevo rango (s/n)?','s');
    ok=strcmp('s',resp);
end
end
maxpn5=max(Pn5);
disp('El valor máximo para Pn es : ');disp(maxpn5)

disp('Trabajando con la columna 6...')

```

```

titulo=[disco cn];
plot(n,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
dn=input('Desplazamiento del inicio de valores con respecto a cero : ');
n=n-dn;
signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
n=n*signo;
disp('En este momento se graficarán los datos ajustados...Pulsa una tecla...')
pause
plot(n,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
ini=input('Posición inicial para el análisis :');
fin=input('Posición final para el análisis :');
n=n(ini:fin);
media6 =mean(n);
disp('La media del segmento de datos es: ');disp(media6)
disp('Este valor será restado para desplazar los datos hacia el cero')
disp('Pulsa una tecla...')
pause
n=n-media6;
plot(n,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias correspondientes.')
disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
pause
Pn6=(abs(fft(n))*2)/length(n);
f=(272/length(n))*(0:length(n)/2);
plot(f,Pn6(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango entre 1 y el siguiente valor : ');disp(length(f))
resp=input('¿ Definir nuevo rango (s/n) ? ','s');
if resp=='s'
ok=1;
while ok==1
a=input('valor inicial : ');
b=input('valor final : ');
plot(f(a:b),Pn6(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia (Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
resp=input('¿ Definir un nuevo rango (s/n)?','s');
ok=strcmp('s',resp);
end
end
maxpn6=max(Pn6);
disp('El valor máximo para Pn es : ');disp(maxpn6)

pause
disp('valores de las medias ')
disp(media1)
disp(media2)
disp(media3)
disp(media4)
disp(media5)
disp(media6)
pause
disp('valores del espectro ')
disp(maxpn1)
disp(maxpn2)

```

```
disp(maxpn3)
disp(maxpn4)
disp(maxpn5)
disp(maxpn6)
pause
disp('Análisis terminado')
```

APÉNDICE B

Características de los tractores utilizados en las pruebas con el dinamómetro de tiro (Axial).

Cuadro B1. Especificaciones y características del Tractor 6403 de John Deere (Tractor instrumentado).

Especificaciones tractor John Deere 6403	
Motor	
Potencia a las rpm nominales	106 hp (78 kW)
Velocidad nominal del motor	2100 rpm
Par máximo	359 Nm a 2100 rpm
Cilindros	4
Aspiración	Turbo
Cilindrada	4.5 L (276 plg3)
Relación de compresión	17.0:1
Bomba de inyección	Rotativa
Transmisión	
Estándar	Sincronizada
Velocidades	9 avance / 3 reversa
Embrague	
Tipo	Seco
Material	Cerámico
Diámetro	305 mm (12 plg)
Toma de fuerza	
Potencia máxima certificada a la TDF por OCIMA	95.7 hp
Tipo	Independiente
Velocidad	540 / 1000 rpm
Sistema hidráulico	
Tipo de circuito	Centro abierto
Tipo de bomba	De engranaje externo
Caudal de la bomba	66.62 L/min
Presión máxima al implemento	19.5 lbs (2830 plg2)
Capacidad de levante certificada por OCIMA	3344 Kgf al 90%
Sensibilidad del sistema	Brazos inferiores
Categoría de enganche	II
Válvula de control selectivo	1 (2da. Opcional)
Dirección	
Tipo	Hidrostática
Eje Trasero	
Traba del diferencial	Mecánica por pedal
Frenos tipo	Bañados en aceite
Accionamiento	Mecánico
Sistema eléctrico	
Alternador	75 A
Motor de arranque	4.2 hp (3.1 kW)
Capacidades	
Tanque de combustible	158 L
Sistema de enfriamiento	13.5 L
Aceite de motor	12 L
Aceite de transmisión, diferencial y sistema hidráulico	58 L

Dimensiones (con equipo estándar) ST DT		
Distancia entre ejes	- 2310 mm (91 plg)	
Largo (sin enganche ni contrapesos delanteros)	4010 mm (158 plg)	
Rango de trocha delantera	1310 a 1930 mm	
Rango de trocha trasera	1490 a 1800 mm	
Rango de trocha trasera	1490 a 1800 mm	
Altura a la parte superior del ROPS	2639 mm (104 plg)	
Despeje mínimo al suelo	457 mm (18 plg)	
Peso aproximado de embrague	3590 kg 3870 kg	
Rodados		
Delantero estándar	10.0-16"	13.6-24"
Trasero estándar	18.4-34"	18.4-34"
Delantero opcional	-	14.9-24"
Trasero opcional	18.4-38"	16.9-38"
	18.4-38"	16.9-38"
Equipo básico		
Doble filtro de combustible con separador de agua		
Filtro de aire de doble elemento		
Barra de tiro con horquilla		
Asiento de operador de lujo con descansabrazos		
Protector contra volcaduras		
Triángulo de seguridad		
Acelerador de pie		
2 lámparas delanteras		
1 lámpara de trabajo trasera		
Manual del operador		
Caja de herramientas		
Equipo opcional		
Contrapesos delanteros		
Contrapesos traseros		
Toldo de lujo		
Salpicaderas delanteras (DT)		
2da. Válvula de control selectivo		
Velocidades		
De avance a 2400 rpm (km/h)	Rodado 18.4-34	Rodado 18.4-38
	A1 2.8 km/h	A1 3.0 km/h
	A2 3.9 km/h	A2 4.2 km/h
	A3 5.0 km/h	A3 5.3 km/h
	B1 6.6 km/h	B1 7.1 km/h
	B2 9.2 km/h	B2 9.8 km/h
	B3 11.8 km/h	B3 12.6 km/h
	C1 16.0 km/h	C1 17.0 km/h
	C2 22.0 km/h	C2 23.5 km/h
	C3 28.3 km/h	C3 30.2 km/h
	R1 4.7 km/h	R1 5.0 km/h
	R2 11.1 km/h	R2 11.8 km/h
	R3 26.6 km/h	R3 28.3 km/h
Para todos los modelos de la Serie 6003		
Con los valores obtenidos en el CENEMA (Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola) de acuerdo a las normas		
1. NMX-0-169-SCFI-2002		
2. NMX-0-207-SCFI-2004		

**Cuadro B2. Especificaciones y características del Tractor 6125D de John Deere
(Tractor para fuerza de tiro).**

Especificaciones tractor John Deere 6125D	
Motor	
Marca	John Deere
Modelo	PowerTech™ 4045T Diésel
Potencia a régimen nominal*	92 kW (125 hp)
Potencia a la TDP a régimen nominal	78,3 kW (105 hp)
Cilindrada	4,5 L
Aspiración	Turboalimentado y posenfriado aire-aire
Filtro de aire	
Cantidad de cilindros	4
Tanque de combustible	158 L
Transmisión	
Tipo	PowerReverser™
Marchas	9x9, 9 avance y 9 retroceso
Traba del diferencial	
Accionamiento	Mecánico
Embrague	
Tipo	Húmedo
Accionamiento	Hidráulico
Tracción delantera	
Accionamiento	Mecánico
Dirección	
Tipo	Hidrostática
Toma de potencia	
Tipo	Independiente
Accionamiento	Mecánico
Régimen estándar	540/1000 rpm
Sistema hidráulico	
Bomba tipo	De engranajes
Caudal máximo	66,7 L/min
Presión máxima de trabajo	199 kg/cm ²
Cantidad de válvulas de control remoto	2
Levante hidráulico de tres puntos (opcional)	
Categoría	I, II
Capacidad máxima de levante (a 610 mm del extremo de los brazos)	3150 kgf
Frenos	

Tipo	
Accionamiento	Mecánico
Rodados	
Doble tracción	
Delanteros	14.9-24 R1
Traseros	18.4-38 R1
Puesto de comando	
Plataforma abierta con techo	Sí
Cabina con aire acondicionado	Opcional
Estructura antivuelco	Sí
Volante de inclinación regulable	Sí
Asiento con regulación vertical y horizontal	Sí
Contrapesos	
Delanteros	6
Traseros	4
Misceláneas	
Soporte con contrapesos delantero	Sí
Caja de herramientas	Sí
*Norma 97/68 EC	

APÉNDICE C

Proporcionalidad obtenida

Para determinar la proporcionalidad en campo se analizaron diferentes tipos de arreglos espaciales de cinceles, los cuales se contrastan con la fuerza demandada por cada uno de ellos por medio del transductor integral a través de su espectro que genera en estado dinámico, como se muestra en la figura (C1)



Figura C1 Evaluación con arreglo de tres cinceles (2 frontales a 0.20 m y un trasero sin alas a 0.30 m de profundidad)

Con la utilización de tres cinceles; dos frontales a 0.20 m de profundidad y un cincel trasero a 0.30 m de profundidad sin alas, se determinó la proporcionalidad de fuerza que existe entre el dinamómetro de tiro Axial con respecto al promedio de fuerzas de los (OV) y (OA) obtenida en campo para contrastarla con la proporcionalidad obtenida en laboratorio entre la fuerza aplicada al sensor de energía y el promedio de fuerzas de los (OV) y (OA).

Al realizar el paso de cinceles con el arreglo antes mencionado, se obtienen datos dinámicos como se puede observar en la figura (C2). Cada color de gráfica indica las fuerzas obtenidas en X.

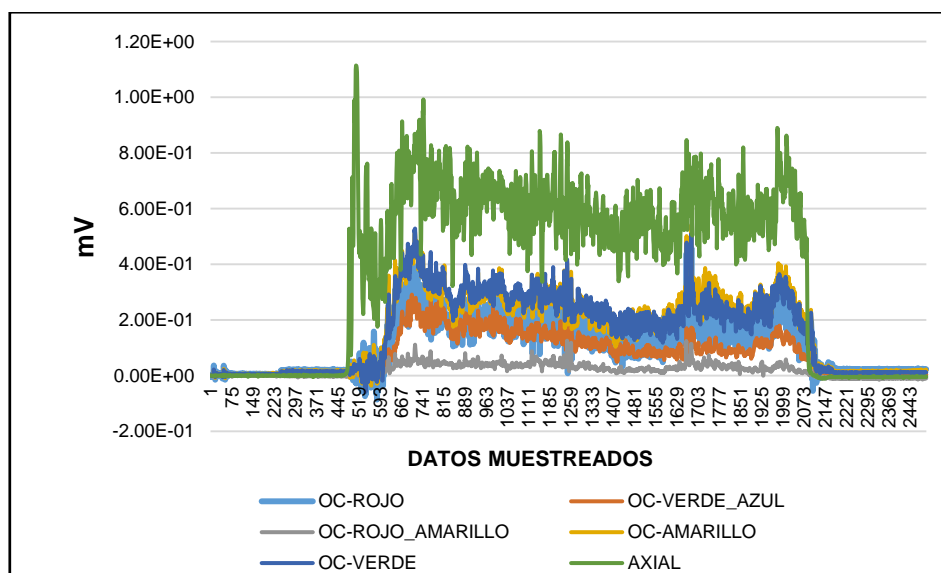


Figura C2 Graficas obtenidas de los sensores integral y Axial en estado dinámico.

Cuadro C1 Análisis espectral; Media + Espectro (mV), Media + Espectro por constante de cada sensor (kN)

N° Rep.	OCTAGONAL AMARILLO				OCTAGONAL VERDE			
	Media (V)	Espectro (V)	M+E (V)	(M+E)*K (kN)	Media (V)	Espectro (V)	M+E (V)	(M+E)*K (kN)
1	0.3	0.03	0.33	5.35	0.27	0.02	0.29	4.52
2	0.33	0.04	0.36	5.84	0.3	0.03	0.33	5.16
3	0.41	0.04	0.46	7.35	0.34	0.06	0.39	6.22
N° Rep.	OCTAGONAL ROJO				AXIAL			
	Media (V)	Espectro (V)	M+E (V)	(M+E)*K (kN)	Media (V)	Espectro (V)	M+E (V)	(M+E)*K (kN)
1	0.16	0.02	0.18	3.5	0.6	0.05	0.65	4.66
2	0.21	0.03	0.24	4.77	0.62	0.04	0.66	4.77
3	0.25	0.03	0.29	5.57	0.59	0.07	0.66	4.78
N° Rep.	OCTAGONAL ROJO-AMARILLO				OCTAGONAL VERDE-AZUL			
	Media (V)	Espectro (V)	M+E (V)	(M+E)*K (kN)	Media (V)	Espectro (V)	M+E (V)	(M+E)*K (kN)
1	0.09	0.01	0.1	1.59	0.13	0.01	0.14	2.24
2	0.11	0.01	0.12	1.85	0.17	0.02	0.19	2.93
3	0.11	0.02	0.13	1.98	0.18	0.02	0.19	3.02

En el cuadro (C1) se muestra el análisis espectral de cada uno de los sensores usados para el arreglo de 3 cinceles (2 frontales a 0.20 m y 1 trasero sin alas a 0.30 m de profundidad). Al realizar el análisis espectral, se presenta la media de una frecuencia de datos dinámicos en *mV* y su valor espectral de esa frecuencia, se realiza la suma del valor espectral más los valores de la media de cada repetición, dicha suma finalmente se multiplica por la constante del sensor utilizado. Posteriormente se obtuvo la proporción, como se muestra a continuación en el cuadro (C2).

Cuadro C2 Proporcionalidad entre el promedio de las fuerzas del (OV) y (OA) contra el valor de la fuerza del dinamómetro Axial.

3 Cinceles: 2 frontales (0.20 m) 1 trasero sin alas (0.30 m)				
N° Rep.	Axial (kN)	(OV+OA)/2 (kN)		Proporción
1	4.66	4.94		1.06
2	4.77	5.50		1.15
3	4.78	6.78		1.42
Proporción Mayor				1.42
Proporción Menor				1.06
Media de la proporción				1.21
Desviación Estándar				0.19
Coefficiente de Variación				15.44

Como se puede ver en el cuadro (C2) existe una proporcionalidad de fuerza del promedio del octagonal verde y amarillo de 1.21 con respecto al dinamómetro de tiro Axial.

Esta proporción se debe tomar en cuenta en el momento de reportar las magnitudes de las fuerzas de tiro que intervienen en la evaluación de implementos.

APÉNDICE D

En el cuadro (D1) se muestran los datos utilizados para las ecuaciones generales de calibración de los sensores (OA), (OV) y (OR) en unidades de NmV^{-1} .

Cuadro D1 Datos utilizados para la calibración de sensores

Oc-Amarillo Ec. Gral. (mV)	Oc-Amarillo Ec. Gral. (N)	Oc-Verde Ec. Gral. (mV)	Oc-Verde Ec. Gral. (N)	Oc-Rojo Ec. Gral. (mV)	Oc-Rojo Ec. Gral. (N)
0	0	0	0	0	0
29	471	27	471	20	471
57	942	55	942	40	942
84	1413	82	1413	60	1413
128	2129	123	2129	90	2129
149	2472	144	2472	106	2472
170	2815	165	2815	121	2815
187	3110	182	3110	134	3110
205	3404	199	3404	146	3404
188	3110	183	3110	134	3110
170	2815	165	2815	120	2815
152	2472	147	2472	107	2472
127	2129	124	2129	90	2129
84	1413	82	1413	61	1413
57	942	56	942	42	942
28	471	28	471	21	471
-1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	0
29	471	28	471	20	471
58	942	55	942	40	942
86	1413	83	1413	60	1413
129	2129	124	2129	90	2129
150	2472	145	2472	106	2472
171	2815	166	2815	121	2815
189	3110	183	3110	134	3110
207	3404	200	3404	146	3404
189	3110	183	3110	134	3110
171	2815	165	2815	120	2815
149	2472	145	2472	105	2472
129	2129	124	2129	91	2129
85	1413	83	1413	61	1413
56	942	56	942	40	942
28	471	29	471	20	471
0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0
29	471	27	471	20	471
59	942	55	942	40	942
86	1413	81	1413	60	1413
129	2129	125	2129	90	2129
150	2472	145	2472	105	2472
171	2815	165	2815	120	2815
189	3110	182	3110	133	3110
206	3404	200	3404	146	3404
189	3110	183	3110	133	3110
171	2815	165	2815	120	2815
150	2472	145	2472	105	2472
128	2129	124	2129	89	2129
85	1413	82	1413	60	1413
57	942	55	942	40	942
28	471	28	471	20	471
0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0
29	471	27	471	20	471
58	942	55	942	40	942
86	1413	82	1413	59	1413
129	2129	124	2129	90	2129
150	2472	145	2472	104	2472
171	2815	167	2815	119	2815
188	3110	184	3110	132	3110
206	3404	201	3404	145	3404
189	3110	184	3110	132	3110
171	2815	166	2815	119	2815
150	2472	145	2472	104	2472
128	2129	125	2129	89	2129
85	1413	83	1413	59	1413
58	942	57	942	39	942
29	471	30	471	19	471
0	0	2	0	-1	0
0	0	0	0	0	0
30	471	26	471	20	471
58	942	54	942	40	942
86	1413	81	1413	60	1413
129	2129	122	2129	90	2129
150	2472	143	2472	105	2472
171	2815	163	2815	120	2815
189	3110	180	3110	132	3110
					132

207	3404	198	3404	145	3404
190	3110	181	3110	133	3110
171	2815	163	2815	119	2815
150	2472	143	2472	104	2472
129	2129	121	2129	89	2129
86	1413	80	1413	60	1413
58	942	53	942	40	942
30	471	25	471	20	471
1	0	-2	0	0	0
0	0	0	0	0	0
30	471	27	471	20	471
57	942	55	942	41	942
85	1413	81	1413	61	1413
128	2129	122	2129	91	2129
149	2472	144	2472	106	2472
170	2815	164	2815	122	2815
188	3110	182	3110	135	3110
206	3404	201	3404	147	3404
188	3110	184	3110	134	3110
170	2815	167	2815	121	2815
149	2472	146	2472	106	2472
131	2129	128	2129	94	2129
84	1413	82	1413	61	1413
56	942	56	942	42	942
28	471	28	471	21	471
0	0	2	0	1	0
0	0	0	0	0	0
30	471	29	471	22	471
60	942	58	942	43	942
89	1413	88	1413	64	1413
133	2129	133	2129	99	2129
154	2472	155	2472	116	2472
176	2815	179	2815	133	2815
194	3110	195	3110	147	3110
212	3404	214	3404	161	3404
193	3110	198	3110	147	3110
175	2815	176	2815	133	2815
154	2472	154	2472	116	2472
132	2129	132	2129	100	2129
87	1413	87	1413	67	1413
58	942	57	942	45	942
29	471	28	471	23	471
					133

0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
30	471	29	471	22	471
59	942	59	942	44	942
88	1413	89	1413	66	1413
133	2129	134	2129	99	2129
155	2472	155	2472	115	2472
176	2815	178	2815	132	2815
194	3110	196	3110	146	3110
213	3404	215	3404	160	3404
194	3110	196	3110	146	3110
176	2815	178	2815	132	2815
154	2472	155	2472	115	2472
133	2129	133	2129	99	2129
87	1413	90	1413	66	1413
59	942	59	942	44	942
29	471	30	471	22	471
0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0
30	471	29	471	22	471
59	942	59	942	44	942
88	1413	88	1413	66	1413
131	2129	133	2129	101	2129
153	2472	155	2472	118	2472
174	2815	177	2815	135	2815
192	3110	195	3110	149	3110
211	3404	214	3404	164	3404
192	3110	197	3110	149	3110
174	2815	176	2815	135	2815
153	2472	154	2472	118	2472
131	2129	132	2129	102	2129
86	1413	87	1413	68	1413
57	942	57	942	46	942
28	471	29	471	24	471
-1	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0
30	471	30	471	22	471
59	942	59	942	44	942
87	1413	89	1413	65	1413
132	2129	134	2129	100	2129
154	2472	157	2472	116	2472
175	2815	178	2815	133	2815
					134

193	3110	197	3110	147	3110
212	3404	215	3404	161	3404
193	3110	196	3110	147	3110
175	2815	178	2815	133	2815
153	2472	155	2472	116	2472
132	2129	133	2129	100	2129
86	1413	90	1413	67	1413
58	942	60	942	45	942
29	471	30	471	23	471
0	0	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0
30	471	29	471	22	471
59	942	58	942	44	942
88	1413	88	1413	66	1413
132	2129	134	2129	99	2129
154	2472	156	2472	116	2472
176	2815	178	2815	132	2815
194	3110	196	3110	146	3110
213	3404	216	3404	161	3404
194	3110	196	3110	146	3110
175	2815	177	2815	132	2815
154	2472	155	2472	115	2472
132	2129	133	2129	99	2129
87	1413	89	1413	66	1413
59	942	59	942	44	942
28	471	32	471	22	471
0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0
30	471	29	471	22	471
59	942	59	942	44	942
88	1413	88	1413	66	1413
131	2129	134	2129	100	2129
153	2472	156	2472	118	2472
175	2815	178	2815	134	2815
193	3110	197	3110	149	3110
212	3404	216	3404	163	3404
193	3110	196	3110	149	3110
174	2815	177	2815	134	2815
153	2472	155	2472	118	2472
131	2129	133	2129	101	2129
86	1413	87	1413	68	1413
57	942	58	942	46	942
					135

28	471	28	471	24	471
0	0	-1	0	1	0
0	0	0	0	0	0
31	471	30	471	24	471
62	942	62	942	47	942
92	1413	92	1413	70	1413
138	2129	139	2129	110	2129
160	2472	162	2472	128	2472
183	2815	185	2815	146	2815
202	3110	204	3110	161	3110
222	3404	225	3404	177	3404
202	3110	204	3110	161	3110
183	2815	185	2815	145	2815
160	2472	162	2472	127	2472
137	2129	138	2129	109	2129
90	1413	91	1413	73	1413
59	942	60	942	49	942
28	471	29	471	25	471
-2	0	-1	0	1	0
0	0	0	0	0	0
31	471	31	471	24	471
62	942	62	942	47	942
92	1413	92	1413	71	1413
138	2129	139	2129	108	2129
161	2472	162	2472	126	2472
184	2815	185	2815	144	2815
203	3110	204	3110	160	3110
222	3404	225	3404	175	3404
203	3110	205	3110	160	3110
184	2815	185	2815	144	2815
161	2472	162	2472	126	2472
138	2129	138	2129	109	2129
91	1413	91	1413	72	1413
60	942	61	942	49	942
30	471	30	471	25	471
-1	0	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0
31	471	31	471	24	471
61	942	62	942	48	942
92	1413	93	1413	71	1413
139	2129	140	2129	107	2129
162	2472	162	2472	125	2472
					136

185	2815	185	2815	143	2815
204	3110	204	3110	158	3110
223	3404	224	3404	174	3404
204	3110	206	3110	159	3110
184	2815	185	2815	143	2815
161	2472	162	2472	125	2472
139	2129	139	2129	107	2129
91	1413	91	1413	71	1413
61	942	61	942	47	942
30	471	31	471	23	471
-1	0	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	0
31	471	31	471	24	471
62	942	61	942	48	942
92	1413	92	1413	71	1413
139	2129	138	2129	107	2129
162	2472	162	2472	125	2472
185	2815	185	2815	143	2815
204	3110	204	3110	159	3110
224	3404	225	3404	175	3404
204	3110	206	3110	159	3110
185	2815	184	2815	144	2815
162	2472	161	2472	125	2472
139	2129	138	2129	108	2129
92	1413	92	1413	72	1413
61	942	60	942	48	942
30	471	30	471	24	471
-1	0	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0
31	471	31	471	24	471
62	942	62	942	48	942
93	1413	92	1413	70	1413
140	2129	139	2129	106	2129
163	2472	162	2472	125	2472
186	2815	186	2815	143	2815
205	3110	204	3110	158	3110
225	3404	224	3404	174	3404
206	3110	205	3110	159	3110
186	2815	185	2815	143	2815
162	2472	163	2472	125	2472
140	2129	139	2129	108	2129
92	1413	91	1413	71	1413

61	942	61	942	48	942
31	471	31	471	24	471
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
32	471	30	471	24	471
62	942	62	942	48	942
92	1413	92	1413	71	1413
140	2129	139	2129	107	2129
163	2472	162	2472	125	2472
186	2815	185	2815	143	2815
205	3110	204	3110	159	3110
225	3404	223	3404	175	3404
205	3110	204	3110	159	3110
186	2815	184	2815	143	2815
162	2472	161	2472	125	2472
139	2129	138	2129	108	2129
92	1413	91	1413	72	1413
62	942	61	942	48	942
31	471	30	471	24	471
0	0	0	0	0	0

En las figuras (D1), (D2) y (D3) se muestran las gráficas de regresión lineal de las ecuaciones generales de calibración de los sensores.

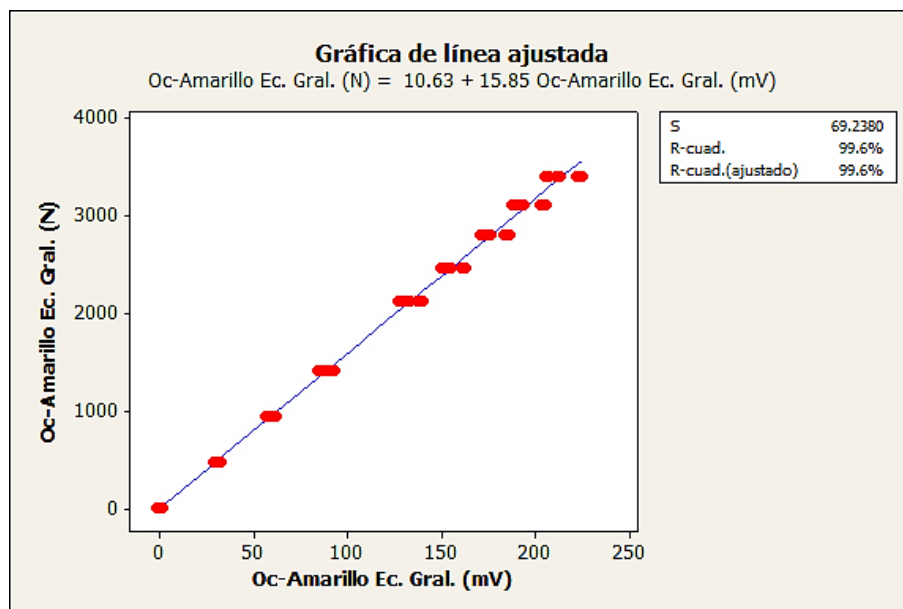


Figura D1 Ecuación general de calibración del (OA) y su constante.

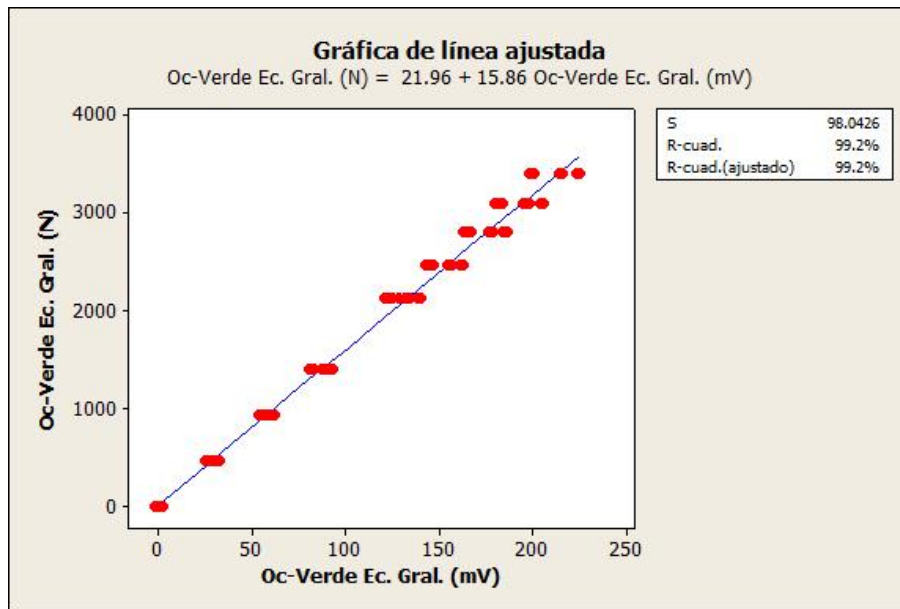


Figura D2 Ecuación general de calibración del (OV) y su constante.

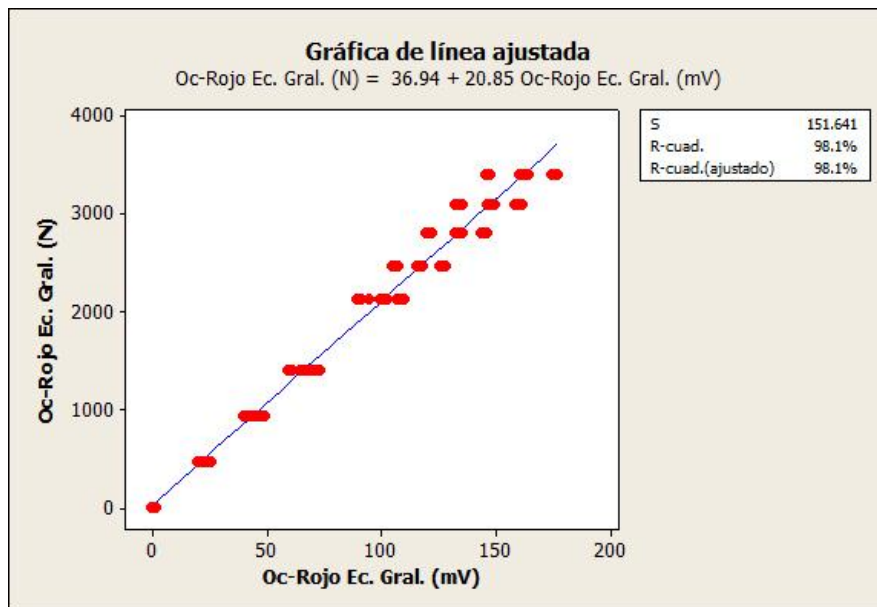


Figura D3 Ecuación general de calibración del (OR) y su constante.

APÉNDICE E

En los cuadros (E1), (E2) y (E3) se observan los datos de respuesta en *mV* multiplicados por la proporción que tiene como valor 1.31 el cual es igual a dividir el valor (*N*) del (OR)/(OA) u (OV), ver cuadro (4.1), contra los pesos conocidos del (OR) cuya capacidad es de 40 *kN*. Dichos pesos son llevados a unidades de fuerza por metro (*Nm*) ya que se multiplica la DBP por las fuerzas (*N*).

Cuadro E1 Datos de respuesta en *mV* del sensor (OR) a 0.54 *m* del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	26	254	26	254	26	254	26	254	26	254	26	254
96	52	509	52	509	52	509	52	509	52	509	54	509
144	79	763	79	763	79	763	77	763	79	763	80	763
217	118	1150	118	1150	118	1150	118	1150	118	1150	119	1150
252	139	1335	139	1335	138	1335	136	1335	138	1335	139	1335
287	159	1520	159	1520	157	1520	156	1520	157	1520	160	1520
317	176	1679	176	1679	174	1679	173	1679	173	1679	177	1679
347	191	1838	191	1838	191	1838	190	1838	190	1838	193	1838
317	176	1679	176	1679	174	1679	173	1679	174	1679	176	1679
287	157	1520	157	1520	157	1520	156	1520	156	1520	159	1520
252	140	1335	138	1335	138	1335	136	1335	136	1335	139	1335
217	118	1150	119	1150	117	1150	117	1150	117	1150	123	1150
144	80	763	80	763	79	763	77	763	79	763	80	763
96	55	509	52	509	52	509	51	509	52	509	55	509
48	28	254	26	254	26	254	25	254	26	254	28	254
0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0

Cuadro E2 Datos de respuesta en *mV* del sensor (OR) a 0.59 *m* del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	29	278	29	278	29	278	29	278	29	278	29	278
96	56	556	58	556	58	556	58	556	58	556	58	556
144	84	834	86	834	86	834	85	834	86	834	86	834
217	130	1256	130	1256	132	1256	131	1256	130	1256	131	1256

252	152	1458	151	1458	155	1458	152	1458	152	1458	155	1458
287	174	1661	173	1661	177	1661	174	1661	173	1661	176	1661
317	193	1835	191	1835	195	1835	193	1835	191	1835	195	1835
347	211	2008	210	2008	215	2008	211	2008	211	2008	214	2008
317	193	1835	191	1835	195	1835	193	1835	191	1835	195	1835
287	174	1661	173	1661	177	1661	174	1661	173	1661	176	1661
252	152	1458	151	1458	155	1458	152	1458	151	1458	155	1458
217	131	1256	130	1256	134	1256	131	1256	130	1256	132	1256
144	88	834	86	834	89	834	88	834	86	834	89	834
96	59	556	58	556	60	556	59	556	58	556	60	556
48	30	278	29	278	31	278	30	278	29	278	31	278
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0

Cuadro E3 Datos de respuesta en mV del sensor (OR) a 0.64 m del brazo de palanca.

Peso (kg)	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm	mV	Nm
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	31	301	31	301	31	301	31	301	31	301	31	301
96	62	603	62	603	63	603	63	603	63	603	63	603
144	92	904	93	904	93	904	93	904	92	904	93	904
217	144	1363	141	1363	140	1363	140	1363	139	1363	140	1363
252	168	1582	165	1582	164	1582	164	1582	164	1582	164	1582
287	191	1802	189	1802	187	1802	187	1802	187	1802	187	1802
317	211	1990	210	1990	207	1990	208	1990	207	1990	208	1990
347	232	2179	229	2179	228	2179	229	2179	228	2179	229	2179
317	211	1990	210	1990	208	1990	208	1990	208	1990	208	1990
287	190	1802	189	1802	187	1802	189	1802	187	1802	187	1802
252	166	1582	165	1582	164	1582	164	1582	164	1582	164	1582
217	143	1363	143	1363	140	1363	141	1363	141	1363	141	1363
144	96	904	94	904	93	904	94	904	93	904	94	904
96	64	603	64	603	62	603	63	603	63	603	63	603
48	33	301	33	301	30	301	31	301	31	301	31	301
0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0

En las figuras (E1), (E2) y (E3) se muestran las regresiones lineales a través del programa Minitab con una gráfica de línea ajustada de calibración del (OR) con

capacidad de 40 kN. Teniendo para las constantes del (OR) los valores $9.639 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$, $9.517 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$ y $9.544 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$ respectivamente.

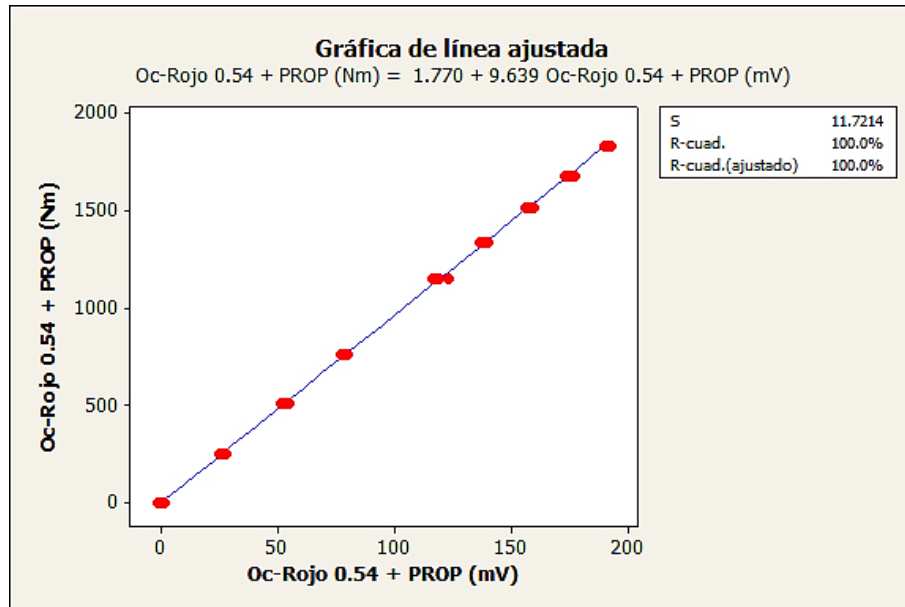


Figura E1 Línea ajustada del sensor (OR) F_x y su constante de calibración a 0.54 m del brazo de palanca.

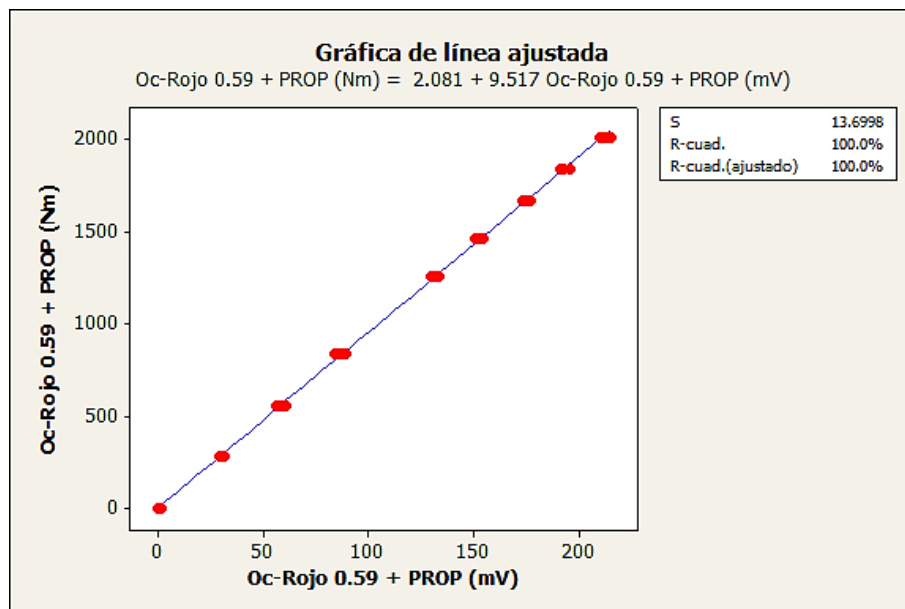


Figura E2 Línea ajustada del sensor (OR) F_x y su constante de calibración a 0.59 m del brazo de palanca.

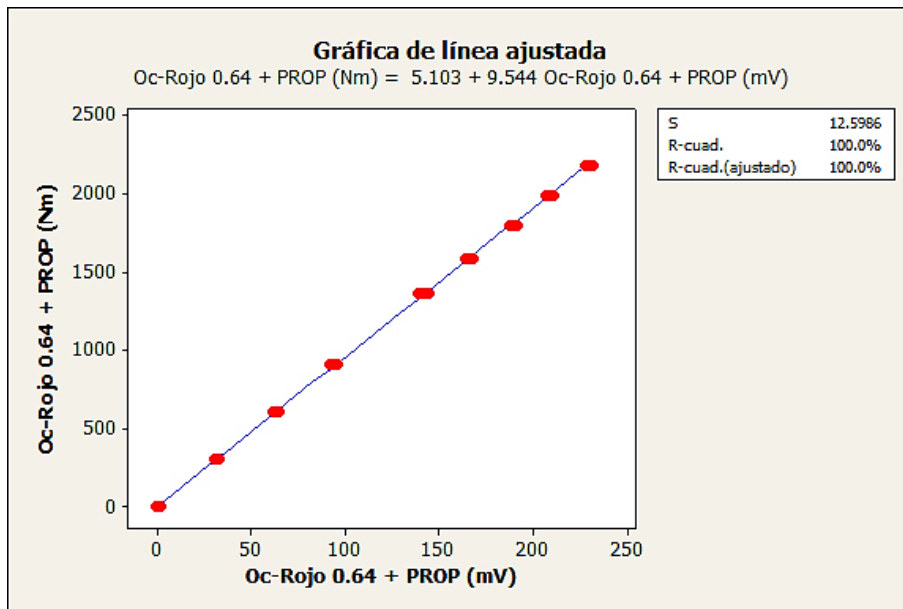


Figura E3 Línea ajustada del sensor (OR) F_x y su constante de calibración a 0.64 m del brazo de palanca.

En la figura (E4) Se muestra la ecuación general de calibración para el octagonal Rojo utilizando los datos de los cuadros (4.14), (4.15) y (4.16). Teniendo como valor de constante general $12.52 \text{ Nm} \cdot \text{mV}^{-1}$.

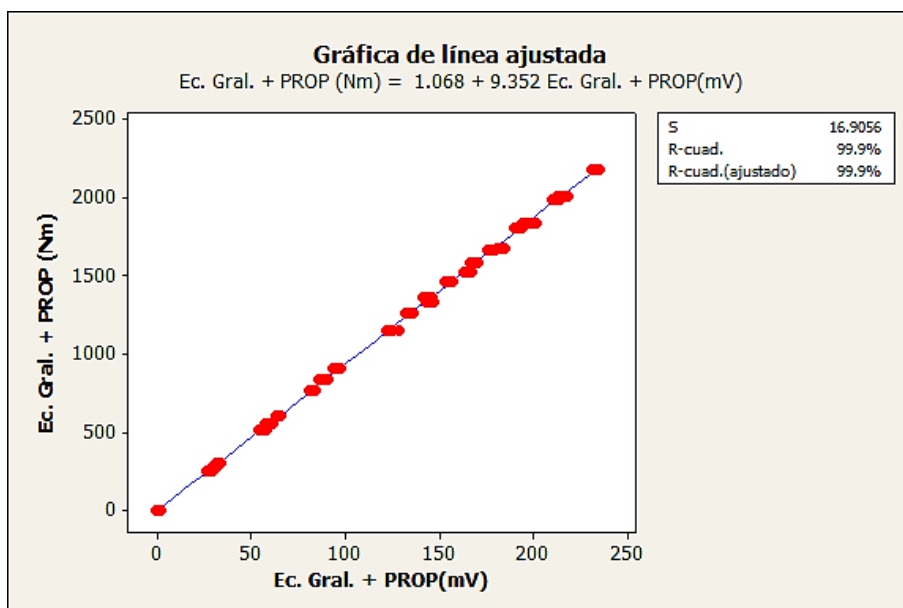


Figura E4 Ecuación general de línea ajustada del sensor Octagonal Rojo y su constante de calibración.

APÉNDICE F

En el cuadro (3.4) del capítulo tres se muestran los arreglos espaciales de cinceles realizados en esta fase de pruebas, con las cuales se les analizó estadísticamente su fuerza total (*kN*) por arreglo.

Análisis de arreglos de cinceles Vs fuerza en *kN* para las pruebas del grupo uno

Se realizaron pruebas con 5 arreglos espaciales de cinceles (tratamientos; 1,2, 3, 4 y 5) con las características que indica el cuadro (3.4), de los cuales se obtuvieron datos de fuerza en *kN* como se muestra en el cuadro (F1).

Cuadro F1 Datos de fuerza en *kN* para 5 arreglos con 4 repeticiones por arreglo.

SENSOR INTEGRAL (<i>kN</i>)					
	Arreglo	R1	R2	R3	R4
T1	1C20SA	2.63	2.56	2.89	1.58
T2	1C30SA	4.96	2.83	1.75	4.45
T3	1C40SA	17.18	9.15	8.42	8.29
T4	2C30SA	4.24	10.98	9.08	5.10
T5	2C40SA	8.45	12.85	14	10.35

Cuadro F2 Medias y desviación estándar de los Datos de fuerza en *kN* para 5 arreglos con 4 repeticiones por arreglo.

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. Agrupada			
Nivel	N	Media	Desv.Est.
T1	4	2.42	0.57
T2	4	3.50	1.48
T3	4	10.76	4.30
T4	4	7.35	3.21
T5	4	11.41	2.49
Desv.Est. agrupada			2.74

Análisis Estadísticos para los arreglos del grupo dos

En el cuadro (3.4) del capítulo tres se muestran las características de los arreglos espaciales de cinceles (9 tratamientos) realizados en esta fase de pruebas, con las cuales se les analizó estadísticamente su fuerza total (*kN*) por arreglo.

Análisis de arreglos de cinceles Vs fuerza en *kN* para las pruebas del grupo dos

Se realizaron 2 y 3 pruebas con arreglos espaciales de cinceles (tratamientos; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9) con las características que indica el cuadro (3.4), de los cuales se obtuvieron datos de fuerza en *kN* como se muestra en el cuadro (F3).

Cuadro F3 Datos de fuerza en *kN* para 9 arreglos con 3 repeticiones por arreglo.

TRANSDUCTOR INTEGRAL (kN)				
	ARREGLOS	R1	R2	R3
T1	2CF201CT20SA	2.93	5.07	4.00
T2	2CF201CT20AM	10.87	8.55	9.71
T3	2CF201CT20AG	8.51	7.55	8.03
T4	2CF201CT30SA	4.94	5.50	6.78
T5	2CF201CT30AM	7.09	10.72	11.29
T6	2CF201CT30AG	9.41	9.03	8.49
T7	2CF201CT40SA	7.52	7.20	9.21
T8	2CF201CT40AM	14.00	13.64	13.81
T9	2CF201CT40AG	15.02	13.69	15.37

Cuadro F4 Medias y desviación estándar de los Datos de fuerza en *kN* para 9 arreglos con 3 repeticiones por arreglo.

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. Agrupada				
Nivel	N	Media	Desv.Est.	
T1	3	4.00		1.07
T2	3	9.71		1.16
T3	3	8.03		0.48
T4	3	5.74		0.94
T5	3	9.70		2.27
T6	3	8.97		0.46
T7	3	7.97		1.08
T8	3	13.81		0.18
T9	3	14.69		0.88
Desv.Est. agrupada				1.10

Análisis Estadísticos para los arreglos del grupo tres

En el cuadro (3.4) del capítulo tres se muestran las características de los arreglos espaciales de cinceles (7 tratamientos) realizados en esta fase de pruebas, con las cuales se les analizó estadísticamente su fuerza total (*kN*) por arreglo, el área disturbada (m^2) y su resistencia específica (kN/m^2).

Análisis de arreglos de cinceles Vs fuerza en *kN* para las pruebas del grupo tres

Se realizaron 4 pruebas con arreglos espaciales de cinceles (tratamientos; 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7) con las características que indica el cuadro (3.4), de los cuales se obtuvieron datos de fuerza en *kN* como se muestra en el cuadro (F5).

Cuadro F5 Datos de fuerza en *kN* para 7 arreglos con 4 repeticiones por arreglo.

DINAMOMETRO BT (kN)					
	ARREGLOS	R1	R2	R3	R4
T1	4CF20ECO	13.24	14.60	15.45	12.83
T2	4CF202CT20AM	14.37	18.31	21.16	19.52
T3	4CF202CT20AG	20.88	20.37	22.95	17.45
T4	4CF202CT30AM	21.61	20.24	26.16	20.75
T5	4CF202CT30AG	19.00	21.69	18.91	19.95
T6	4CF202CT40AM	35.68	27.13	34.44	34.92
T7	4CF303CT30SA	34.25	34.28	31.72	32.25

Cuadro F6 Medias y desviación estándar de los datos de fuerza en *kN* para 7 arreglos con 4 repeticiones por arreglo.

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. Agrupada				
	Nivel	N	Media	Desv.Est.
T1		4	14.03	1.21
T2		4	18.34	2.89
T3		4	20.41	2.26
T4		4	22.19	2.70
T5		4	19.88	1.29
T6		4	33.04	3.97
T7		4	33.12	1.33
Desv.Est. agrupada				2.43

Análisis de arreglos de cinces Vs área disturbada en m^2 para las pruebas del grupo tres

Se realizaron 7 pruebas con arreglos espaciales de cinces (tratamientos; 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7) con las características que indica el cuadro (3.6), de los cuales se obtuvieron datos de área disturbada en m^2 como se muestra en el cuadro (F7).

Cuadro F7 Datos de área disturbada en m² para 7 arreglos con 4 repeticiones por arreglo.

		Área disturbada m ²			
	ARREGLOS	R1	R2	R3	R4
T1	4CF20ECO	0.39	0.39	0.45	0.41
T2	4CF202CT20AM	0.52	0.57	0.65	0.68
T3	4CF202CT20AG	0.67	0.75	0.60	0.35
T4	4CF202CT30AM	0.59	0.70	0.59	0.53
T5	4CF202CT30AG	0.51	0.59	0.70	0.73
T6	4CF202CT40AM	0.55	0.71	0.73	0.73
T7	4CF303CT30SA	0.59	0.72	0.71	0.55

Cuadro F8 Medias y desviación estándar de los datos de área disturbada en m² para 7 arreglos con 4 repeticiones por arreglo.

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. Agrupada				
	Nivel	N	Media	Desv.Est.
T1		4	0.41	0.02
T2		4	0.60	0.07
T3		4	0.59	0.17
T4		4	0.60	0.07
T5		4	0.63	0.10
T6		4	0.64	0.08
T7		4	0.68	0.08
Desv.Est. agrupada				0.09



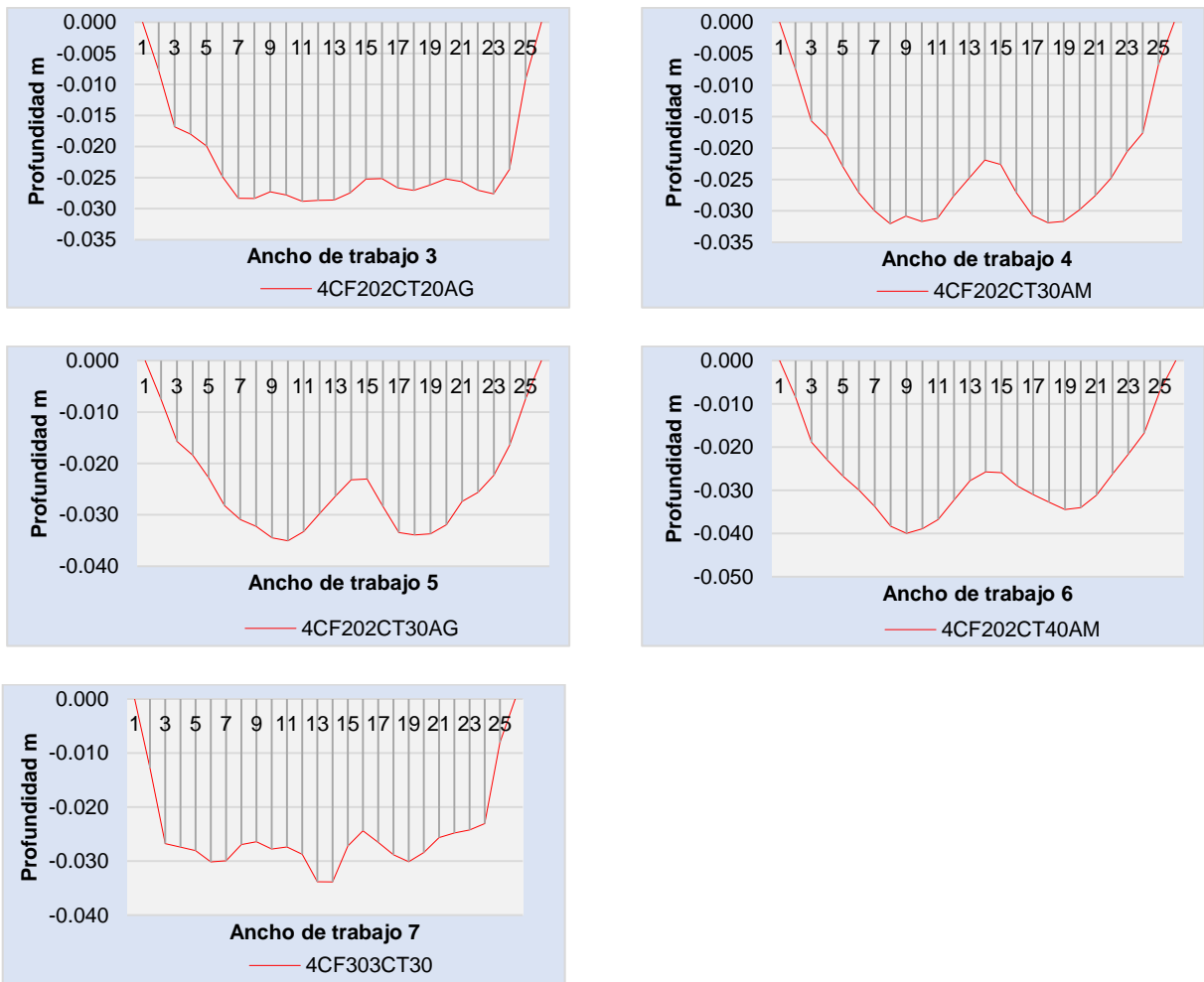


Figura F1 Imágenes de perfiles obtenidos en campo para las pruebas del grupo tres.

Análisis de arreglos de cinceles Vs resistencia específica en kN/m^2 para las pruebas del grupo tres

Se realizaron 7 pruebas con arreglos espaciales de cinceles (tratamientos; 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7) con las características que indica el cuadro (3.4), de los cuales se obtuvieron datos de resistencia específica en kN/m^2 como se muestra en el cuadro (F9).

Cuadro F9 Datos de área disturbada en kNm^{-2} para 7 arreglos con 4 repeticiones por arreglo.

		Resistencia especifica kNm^{-2}			
	ARREGLO	R1	R2	R3	R4
T1	4CF20ECO	33.83	37.92	34.14	31.14
T2	4CF202CT20AM	27.46	31.91	32.73	28.84
T3	4CF202CT20AG	31.25	27.34	38.48	49.43
T4	4CF202CT30AM	36.62	29.01	44.45	39.05
T5	4CF202CT30AG	37.19	36.56	27.14	27.52
T6	4CF202CT40AM	65.01	38.00	47.17	47.81
T7	4CF303CT30SA	58.12	47.53	44.92	58.86

Cuadro F10 Medias y desviación estándar de los datos de resistencia especifica en kNm^{-2} para 7 arreglos con 4 repeticiones por arreglo.

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. Agrupada				
	Nivel	N	Media	Desv.Est.
T1		4	34.25	2.78
T2		4	30.23	2.49
T3		4	36.62	9.70
T4		4	37.28	6.41
T5		4	32.10	5.51
T6		4	49.49	11.27
T7		4	52.35	7.16
Desv.Est. agrupada				7.15

APÉNDICE G

Diagrama de cuerpo libre para el transductor integral

Se analizó el marco transductor integral a través de un diagrama de cuerpo libre, en donde se realizaron sumatorias de momentos en cada punto actuante en el mismo marco. Cada sensor corresponde a cada punto analizado, como se muestra en la figura (G1). La distancia en z fueron a 0.54 m, 0.59 m y 0.79 m (simulando las tres profundidades de trabajo). a , $b1$ y $b2$, son distancias que permanecen constantes en el mismo marco del transductor integral.

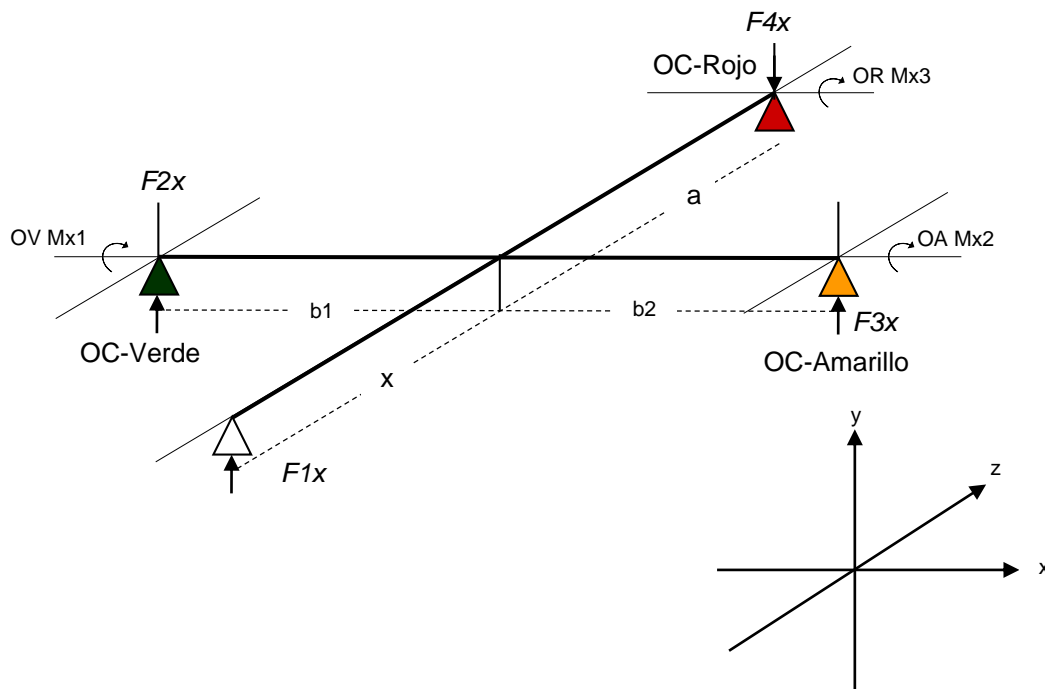


Figura G1. Diagrama de cuerpo libre correspondiente al transductor integral evaluado en laboratorio