



**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO TELESCÓPICO LINEAL CON AJUSTE
MANUAL PARA ASISTIR LA POLINIZACIÓN EN PALMA DE ACEITE
HÍBRIDO *Elaeis guineensis* x *Elaeis oleífera* (OxG) EN CASANARE.**

**SANTIAGO HENAO ROJAS
SANTIAGO VARGAS PARADA**

**UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
BIOINGENIERÍA
BOGOTÁ D.C
2023**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO TELESCÓPICO LINEAL CON AJUSTE
MANUAL PARA ASISTIR LA POLINIZACIÓN EN PALMA DE ACEITE
HÍBRIDO *Elaeis guineensis* x *Elaeis oleífera* (OxG) EN CASANARE.**

**SANTIAGO HENAO ROJAS
SANTIAGO VARGAS PARADA**

**Tutor Académico
MIGUEL FERNANDO MONTOYA VALLEJO
Cotutor Académico
JUAN JOSÉ CARRILLO CASTELLANOS**

**UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
BIOINGENIERÍA
BOGOTÁ D.C**

2023

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Fecha

DEDICATORIA

Todo el trabajo, esfuerzo realizado se lo dedico principalmente a Dios. Sus bendiciones, salud y sabiduría que me brinda cada día, hacen que pueda cumplir mis metas y sueños. A mi madre Brita Rojas, por su amor infinito, apoyo incondicional, paciencia, consejos y palabras acertadas en los momentos más críticos, pero sobre todo al esfuerzo y sacrificio que le conlleva para darme a mi más de lo necesario para cumplir mis sueños. A mi abuelita, María de Jesús por su apoyo y su amor, pero sobre todo por animarme en los momentos difíciles y estar cuando más la necesitaba. A mi hermano Leonardo Andrés, por ser mi consejero, crítico y modelo a seguir. A mi Padrino y a mi tía por tenerme presente siempre en sus oraciones y brindarme su cariño y su respaldo cuando estaba lejos de casa. A mi novia por ser mi gran motivación, por acompañarme en los momentos complicados y los momentos felices por darme apoyo sorteando todas las dificultades que se nos presenten a lo largo de nuestra vida. Finalmente a mis amigos, conocidos y quienes me han apoyado en este camino.

-Santiago Henao

El presente trabajo de grado lo quiero dedicar a todas las personas que me acompañaron en este arduo proceso. A mis padres Alberto Vargas y Naddy Parada, quienes a pesar de todas las dificultades me brindaron su apoyo incondicional y motivación para seguir adelante. Ellos junto a mis hermanas Alejandra y Sofía, son lo más importante de mi vida y mi más grande apoyo. A mis abuelitos quienes, ya sea desde acá o desde el cielo, me envían todas las fuerzas y bendiciones para que todo salga de la mejor manera posible. A María Fernanda Arias, quién siempre estuvo a mi lado alentándome a no rendirme nunca por más difícil que fuera la situación y brindado todo su amor en cada paso de todo este proceso. A Pablo Isaac Martínez Rey quien siempre tiene la disposición de escucharme y aconsejarme. Finalmente, a toda mi familia, amigos y conocidos, quienes de una u otra manera aportaron en la realización de esta meta tan importante.

-Santiago Vargas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseamos agradecer a nuestro tutor, Miguel Fernando Montoya Vallejo, y cotutor, Juan José Carrillo Castellanos por su invaluable ayuda, apoyo y orientación durante todo el proceso del proceso. Sus comentarios, sugerencias y correcciones fueron esenciales para lograr un proyecto de grado de calidad.

A la empresa Palmar el Quitebe; a don Armando Lemus por abrirnos las puertas, por brindarnos su colaboración en la realización de este proyecto de grado. Sus recursos, instalaciones y personal fueron fundamentales para la recolección y análisis de datos, así mismo haber tenido la oportunidad de vivir la experiencia de conocer el panorama y los retos reales de un ingeniero en campo; así mismo, deseamos resaltar nuestros agradecimientos para el Ingeniero Sergio Alejandro Lemus, de quien admiro su labor, dedicación y entusiasmo para dirigir una empresa, quien además confió en este proyecto, al Ingeniero Jaime Buelvas e Ingeniero Neyfer Hernández, quienes nos acompañaron en todo el proceso de aprendizaje y han estado siempre al pendiente de resolver cualquier inquietud en la parte industrial; también, agradecemos al supervisor de campo Álvaro Moreno por brindarnos su conocimiento y experiencia de tanto años trabajando en campo, así como sus increíbles aportes en este trabajo.

Asimismo, deseamos agradecer a nuestros familiares y amigos por su constante apoyo, comprensión y ánimo en los momentos difíciles. Su paciencia y cariño nos dieron la fuerza necesaria para seguir adelante y no rendirme. Finalmente, queremos agradecer a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron en el éxito de esta investigación. Sus aportes y sugerencias fueron valiosos para enriquecer nuestro conocimiento y experiencia.

¡Gracias a todos!

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
RESUMEN.....	15
ABSTRACT.....	16
I. INTRODUCCIÓN	17
II. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	20
III. JUSTIFICACIÓN	24
IV. OBJETIVOS	30
4.1 GENERAL	30
4.2 ESPECÍFICOS	30
V. MARCO DE REFERENCIA	31
5.1 MARCO TEÓRICO.....	31
5.1.1 Palma Aceitera	31
5.1.2. Morfología de la Palma Aceitera	33
5.1.3 Aceite de Palma.....	36
5.1.4. Polinización Asistida.....	39
5.1.5 Ácido Naftalenacético.....	42
5.1.6 Sistema Telescópico Lineal.....	43
5.2 MARCO GEOGRÁFICO	46
5.3 MARCO NORMATIVO.....	47
5.4 ESTADO DEL ARTE.....	50
VI. METODOLOGÍA	53

6.1 LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS.....	53
6.1.1 Requerimientos funcionales.....	53
6.1.2 Requerimientos de restricción.....	54
6.1.3 Requerimientos de calidad.....	54
6.1.4 Requerimientos del usuario.....	55
6.2 FASES DEL PROYECTO.....	55
6.2.1 Fase 1: Diseño del prototipo.....	55
A. Levantamiento de información de las palmas del híbrido OxG (<i>Elaeis guineensis x Elaeis oleífera</i>) mediante visita al palmar.....	55
B. Diseño de alto nivel y Bocetos.....	56
C. Selección diseño del sistema telescópico mediante matriz de decisión.....	57
D. Simulación computacional de posibles materiales del prototipo.....	60
E. Selección de materiales del prototipo.....	62
F. Diseño detallado.....	63
6.2.2 Fase 2: Construcción del prototipo.....	64
A. Cotización y adquisición de la lista de materiales para la construcción del prototipo.....	65
B. Adquisición del ANA.....	65
C. Ensamblaje del prototipo.....	65
D. Evaluación preliminar del funcionamiento de los componentes del sistema.....	65
6.2.3 Fase 3: Evaluación del prototipo.....	66
A. Capacidad de ascender y descender y aspersion de ANA.....	67
B. Tiempos de ascenso, descenso y aspersion de ANA en un ejemplar de OxG.....	69
C. Comparativa de alcance, tiempo y rango de aspersion entre método tradicional y prototipo telescópico lineal.....	70

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
7.1 FASE 1: DISEÑO DEL PROTOTIPO	73
A. Levantamiento de información de las palmas del híbrido <i>Elaeis guineensis</i> x <i>Elaeis oleifera</i> (OxG) mediante visita al palmar.....	73
B. Diseño de alto nivel y Bocetos	78
C. Selección diseño del sistema telescópico mediante matriz de decisión.....	85
Tabla 5. Peso relativo de los criterios de decisión para elección de boceto.....	86
D. Simulación computacional de posibles materiales del prototipo.....	88
E. Selección de materiales del prototipo	92
F. Diseño Detallado.....	95
7.2 FASE 2: CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	104
A. Cotización y adquisición de la lista de materiales para la construcción del prototipo	104
B. Adquisición del ANA	104
C. Ensamblaje del prototipo	105
D. Evaluación preliminar del funcionamiento de los componentes del sistema ..	109
7.3 FASE 3: EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO	111
A. Capacidad de ascender y descender y aspersion de ANA.....	111
B. Tiempos de ascenso, descenso y aspersion de ANA en un ejemplar de OxG.	115
C. Comparativa de alcance, tiempo y rango de aspersion entre método tradicional y prototipo telescópico lineal	118
VII. CONCLUSIONES.....	128
VIII. RECOMENDACIONES	138
BIBLIOGRAFÍA	141

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Adopción tecnológica en las diferentes fases del cultivo de palma. Adaptado de: (Rojas et al., 2016)	25
Tabla 2. Características de las herramientas en la aplicación de ANA en mezcla líquida. (García et al., 2021).....	40
Tabla 3. Escala fundamental de comparación por pares mediante la cual el decisor puede expresar sus preferencias entre dos elementos verbalmente y representar estas preferencias descriptivas mediante valores numéricos. (Saaty, Y., 2008).	57
Tabla 4. Peso relativo de los criterios de decisión para elección de boceto.....	86
Tabla 5. Pesos normalizados de los criterios de decisión para elección de boceto.....	86
Tabla 6. Matriz de decisión de boceto a implementar.	87
Tabla 7. Peso relativo de los criterios de decisión para elección de material del prototipo.	93
Tabla 8. Peso normalizado de los criterios de decisión para elección de material del prototipo.	93
Tabla 9. Matriz de decisión de material a implementar.	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de polinización con Ácido naftalenacético (ANA): A. ANA en polvo, B. ANA líquida (García et al., 2021).....	21
Figura 2. Uso de escaleras para polinización de ANA.....	22
Figura 3. Árbol de problema en polinización asistida en el híbrido OxG.....	23
Figura 4. Imágenes según tipos de cámara y espectros (RGB y NIR) (Pino V., 2019).....	24
Figura 5. Peso de racimos polinización Líquida o Polvo (A. M. García et al., 2020).	26
Figura 6. Comparativa acerca del manejo de la poda en las palmas: A. Palma podada, B. Palma sin podar. (Rojas et al., 2016).	27
Figura 7. Sistemas de movilidad de objetos en plantaciones de palma (Rojas et al., 2016)	27
Figura 8. Ejemplo de sistema telescópico para la carga de cámaras de grabación (Chicaiza y Guerrero, 2016).	28
Figura 9. Distribución de cultivos de palma en Colombia (Rojas et al., 2016)	33
Figura 10. Racimo y frutos de la palma aceitera: A. Racimo de <i>Elaeis guineensis</i> Jacq, B: Fruto maduro de palma de aceite.	34
Figura 11. Híbrido OxG en diferentes etapas. A. Híbrido OxG en etapa de establecimiento, B. Híbrido OxG de 3 metros de altura (Rojas et al., 2016).....	35
Figura 12. Usos del aceite de palma y sus coloraciones: A. Aceite rojo en tanque terminado, B. Aceite de palma en muestra de calidad.	37
Figura 13. Aceite de palmiste terminado y subproductos: A. Aceite de palmiste en prueba de calidad, B. Aceite de palmiste, C. Torta de palmiste.	37
Figura 14. Uso de biomasa en diferentes partes del proceso. A. Tusa de retención de humedad en suelos del cultivo. B. Uso de biomasa en caldera.	39
Figura 15. Polinización asistida: A, Palmas masculinas, polen de híbridos OxG, B. Palmas femeninas, inflorescencias de híbrido OxG.	40
Figura 16. Sistema telescópico robotizado láser. (Fan et al., 2004).....	44
Figura 17. Utilización de sistemas telescópicos en diferentes entornos: A. Brazo telescópico empleado en medios audiovisuales. B. Pértiga para eléctricos. (Chicaiza y Guerrero, 2016).	45

Figura 18. Imagen satelital del palmar el Quitebe.	47
Figura 19. Dispositivo para polinización de palma de aceite desarrollado por la UDES (Farfán, 2021).....	50
Figura 20. Dispositivo telescópico manual para porte de una cámara (Chicaiza y Guerrero, 2016).	51
Figura 21. Sistema de transporte telescópico convencional (Fan et al., 2004).....	52
Figura 22. Mástil Tubular Telescópico. (Mobrem, M., & Spier, C., 2012).....	52
Figura 23. Modelo 3D de un dispositivo telescópico lineal de 4 módulos.	60
Figura 24. Modelo mallado de dispositivo telescópico lineal.....	61
Figura 25. A)Ejemplo de geometría fija de SolidWorks. B) Sujeción para el estudio del dispositivo telescópico lineal.	61
Figura 26. Fuerzas aplicadas al modelo del dispositivo telescópico para su estudio.....	62
Figura 27. Fase 1 del proyecto; Diseño del prototipo.	64
Figura 28. Fase 2 del proyecto; Construcción del prototipo.	66
Figura 29. Ejemplo de pruebas de ascenso del dispositivo telescópico en lugar controlado.	67
Figura 30. Paso a paso prueba de ascenso y aspersión en campo.....	68
Figura 31. Paso a paso prueba de cobertura de aspersión.	69
Figura 32. Paso a paso polinización de palmas en una cuadrilla.	70
Figura 33. Paso a paso prueba de cobertura de aspersión de la fumigadora de espala de polinización.	71
Figura 34. Fase 3 del proyecto: Evaluación del prototipo.	72
Figura 35. A. Palma categoría A con altura de 2.27m desde el piso hasta el fruto. B) Palma categoría A con inflorescencias presentes. C) Vista de la distribución de una plantación con palmas de categoría A.	74
Figura 36. Palma categoría B con altura de 6.8 m.	74
Figura 37. A. Planta categoría C con altura de 10.69m desde el suelo hasta el fruto. B. distribución palmas categoría C.....	75
Figura 38. Vista modelada en 3D de la distribución espacial de los lotes de híbrido OxG.	76

Figura 39. Frutos palma de aceite. A) Racimo listo para polinizar. B) Racimo frutos polinizados.	77
Figura 40. Medición de racimo de frutos A) Largo B) Ancho.....	77
Figura 41. Prototipo 1, sistema robótico grúa con brazo extensible y sistema hidráulico para elevar.	79
Figura 42. Prototipo 1, modo de funcionamiento para el sistema robótico de brazo extensible y sistema hidráulico.....	79
Figura 43. Prototipo 2, sistema carro-robótico con brazo extensible (vertical) y sistema para anclaje a la palma.	80
Figura 44. Prototipo 2, sistema de movimiento para el sistema carro-robótico con brazo extensible (vertical) y sistema para anclaje a la palma.	81
Figura 45. Prototipo 3, sistema carro con brazo extensible (en ángulo) y sistema de giro. .	82
Figura 46. Prototipo 3, sistema de movimiento para el sistema carro con brazo extensible (en ángulo) y sistema de giro	82
Figura 47. Prototipo 4, sistema de polinización manual de chaleco.	83
Figura 48. Prototipo 4, funcionamiento del dispositivo telescópico.....	84
Figura 49. Diagrama de caja negra del sistema “Polinización Asistida”.....	84
Figura 50. Diagrama de caja gris del sistema “Polinización Asistida”.....	85
Figura 51. Resultado de estudio de análisis estático del Aluminio en Solidworks. A) Distorsión energética máxima. B) Desplazamiento resultante. C) Deformación equivalente. D) Desplazamiento general.....	89
Figura 52. Resultado de estudio de análisis estático del Polietileno en Solidworks. A) Distorsión energética máxima. B) Desplazamiento resultante. C) Deformación equivalente. D) Desplazamiento general.....	90
Figura 53. Resultado de estudio de análisis estático del PVC en Solidworks. A) Distorsión energética máxima. B) Desplazamiento resultante. C) Deformación equivalente. D) Desplazamiento general	91
Figura 54. Resultado de estudio de análisis estático del IMC en Solidworks. A) Distorsión energética máxima. B) Desplazamiento resultante. C) Deformación equivalente. D) Desplazamiento general	92

Figura 55. Diseño asistido por computadora (CAD) de estructura transportadora en A: vista superior y B: vista isométrica.....	96
Figura 56. Planos de Diseño asistido por computadora (CAD) de estructura transportadora	97
Figura 57. Diseño asistido por computadora (CAD) de eje o pivote del sistema telescópico vista isométrica.....	97
Figura 58. Planos de Diseño asistido por computadora (CAD) de eje o pivote del sistema telescópico.....	98
Figura 59. Diseño asistido por computadora (CAD) de A: Brazo telescópico modular y B: Juntas de módulos del sistema telescópico	99
Figura 60. Plano de Diseño asistido por computadora (CAD) de brazo telescópico modular	99
Figura 61. Plano de diseño asistido por computadora (CAD) de juntas de módulos del sistema telescópico.....	100
Figura 62. Diagrama circuital del sistema eléctrico del prototipo telescópico.	101
Figura 63. Diseño asistido por computadora (CAD) de sistema eléctrico del prototipo. A: Caja protectora de baterías. B: Baterías 12V. C: Soporte plástico. D: Switch. E: Pulsador. F Electro bomba	102
Figura 64. Brochure de Ácido Naftalenacético al 98% de Cenipalma.	105
Figura 65. Construcción sistema transportador del prototipo. A: Base tubular del sistema. B: Chasis tubular terminado y acople de las ruedas. C: Soporte de contenedor líquido. D: Soldadura de la malla al chasis.	106
Figura 66. Construcción sistema de eje del brazo telescópico.....	107
Figura 67. Ensamble del brazo telescópico. A) Juntas de acople del brazo telescópico modular. B) Ensamblaje de módulos del brazo telescópico.	107
Figura 68. Ensamblaje y soldadura de las baterías con la caja de protección.....	108
Figura 69. Ensamblaje y soldadura de componentes electrónicos. A: Pulsador. B: Soldadura switch C. Ensamblaje de componentes electrónicos con los soportes.....	109
Figura 70. Pruebas preliminares componentes mecánicos A) Funcionamiento módulos del brazo telescópico. B) Funcionamiento eje del brazo telescópico.	110

Figura 71. Prueba voltaje de salida de baterías conectadas en paralelo.....	111
Figura 72. Cinta plomada de medición para pruebas control.....	112
Figura 73. Prueba control de elevación del prototipo telescópico lineal con cinta plomada de medición. A) 3 metros de altura. B) 6 metros de altura. C) 9 metros de altura. D) 12 metros de altura.	113
Figura 74. Cuadrícula para pruebas de aspersión.....	113
Figura 75. Resultado de cobertura de aspersión de bomba de diafragma del prototipo. ...	114
Figura 76. Resultado de cobertura de aspersión de bomba de diafragma del prototipo. ...	114
Figura 77. Pruebas en campo de capacidad de polinizar palmas del híbrido OxG mediante aspersión de ANA líquido.....	117
Figura 78. Pruebas en campo de capacidad de polinizar palmas del híbrido OxG de categoría C.....	118
Figura 79. Comparativa de tiempo efectivo de polinización entre método tradicional y prototipo telescópico.	119
Figura 80. Pruebas de área de cobertura A) Sistema telescópico. B) Fumigadora de espala	120
Figura 81. A) Sistema de acople a tracción animal. B) Acople con el eje de dirección. C) Eje de dirección del carro transportador.....	123
Figura 82. A) Ruedas prototipo base de 8'. B) Sistema de ruedas y eje giratorio. C) Ruedas de 22' de carro transportador	124
Figura 83. Sistema de triple suspensión de carro transportador.....	125
Figura 84. A) Manubrio prototipo base. B) Manubrio prototipo mejorado.	126
Figura 85. A) Refuerzo en la base del eje giratorio. B) Refuerzo medio del eje giratorio.	126
Figura 86. Plano brazo telescópico, identificando los centros de masa de cada sección para cálculo de torque	127
Figura 87. Sistema de contrapeso brazo telescópico Azul) Manija. Rojo) Pesas.	128
Figura 87. Diagrama circuito de NE555 en configuración monoestable	132
Figura 87. Diagrama circuito del sistema electrónico de prototipo mejorado	133
Figura 88. Diseño final de prototipo mejorado	134

RESUMEN

El híbrido de la palma de aceite *Elaeis guineensis* x *Elaeis oleifera* (OxG) es un cultivo con alto índice de crecimiento de producción de aceite y sus derivados para Colombia. Desde su introducción al país ha demostrado tener mayor rendimiento productivo a comparación de otras especies, pero al ser una especie dependiente de la polinización artificial se ha detectado la inexistencia de métodos para realizar la polinización artificial en palmas del híbrido OxG a partir de los 3 metros de altura. El presente trabajo de grado tuvo como objetivo el desarrollo de un prototipo telescópico lineal con ajuste manual para asistir la polinización en palma de aceite híbrido OxG en Casanare con el fin de brindar a los palmicultores un método de polinización eficiente en palmas de hasta 12 metros de altura. Para lograr el cumplimiento del objetivo planteado se realizó la división del proyecto en tres fases, donde cada una se desarrolló entorno a dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos del proyecto. En la primera fase se realizó el diseño del prototipo, para ello se tuvo en cuenta la información obtenida mediante una visita de campo al palmar como los obstáculos presentes, el terreno y la caracterización de los ejemplares. Mediante una lluvia de ideas se realizaron diferentes bocetos de dispositivos telescópicos y sus posibles materiales de construcción, los cuales se seleccionaron mediante matrices de decisión por metodología **Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)**. En cuanto a la segunda fase del proyecto se realizó la construcción y ensamblaje de los sistemas del prototipo. Se realizó la cotización y posterior compra de los materiales y elementos para construir el prototipo, empezando por el carro transportador, el eje de elevación, el brazo telescópico y finalmente el sistema eléctrico y su posterior ensamblaje. La tercera fase corresponde a la evaluación y comparación del prototipo frente al método actual de polinización, donde se evaluaron los tiempos totales efectivos de polinización en un grupo de ejemplares del híbrido de entre 2 a 4 metros de altura empleando ambos métodos. Por otra parte, se evaluó y comparó el área de cobertura del polinizador artificial de ambos métodos. Finalmente se realiza la prueba de alcance del prototipo en ejemplares de categoría B y C (ejemplares con un rango de 5 a 12 metros de altura). El prototipo demuestra una mayor efectividad de polinización en términos de tiempo (51%), mayor área de cobertura (68%) y alcance en comparación con el método actual de polinización artificial.

ABSTRACT

The oil palm hybrid *Elaeis guineensis* x *Elaeis oleifera* (OxG) is a crop with a high growth rate of oil production and its derivatives for Colombia. Since its introduction in the country, it has shown to have a higher productive yield compared to other oil species, but since it is a species that depends on artificial pollination, the inexistence of methods to carry out artificial pollination in OxG hybrid palms from 3 meters has been detected. The objective of this degree work was the development of a linear telescopic prototype with manual adjustment to assist pollination in OxG hybrid oil palm in Casanare in order to provide palm growers with an efficient method of pollination in palms up to 12 meters length. To achieve the fulfillment of the objective, the project was divided into three phases, where each one was developed to achieve with each of the specific objectives of the project. In the first phase, the design of the prototype was carried out, for which the information obtained through a field visit to the palm grove was taken into account, such as the obstacles present, the terrain and the characterization of the specimens. Through a brainstorm, different sketches of telescopic devices and their possible construction materials were made, which were selected using decision matrices by Analytic Hierarchy Process or AHP methodology. Regarding the second phase of the project, the construction and assembly of the prototype systems was carried out. The quotation and subsequent purchase of the materials and elements to build the prototype were made, starting with the transporter cart, the lifting shaft, the telescopic arm and finally the electrical system and its subsequent assembly. The third phase its the evaluation and comparison of the prototype against the current pollination method, where the total effective pollination times were evaluated in a group of specimens of the hybrid between 2 to 4 meters high using both methods. The coverage area of the artificial pollinator of both methods was evaluated and compared. Finally, the range test of the prototype is carried out on category B and C specimens (specimens with a range of 5 to 12 meters in height). The prototype demonstrates higher pollination effectiveness in terms of time (51%), larger coverage area (68%), and range compared to the current method of artificial pollination.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria de la palma de aceite existen dos grandes pilares que dependen entre sí para generar la mayor producción de aceite posible; en primer lugar, se tienen los grandes cultivos donde se forma el fruto que contiene el aceite y la planta de beneficio, lugar donde se extrae el aceite del fruto. Ambos pilares tienen diferentes variables que son determinantes y que afectan la tasa de extracción de aceite (TEA), ambas se deben alinear con base a los objetivos trazados por cada planta.

Equilibrar estas variables y supervisar todas las etapas de producción de aceite de palma es una tarea que se debe realizar cuidadosamente y prestando especial atención a cada etapa de producción, para ello se requiere de una gran inversión en mano de obra e infraestructura, lo que a su vez implica en la investigación e implementación en avances tecnológicos y estudios científicos para incrementar la eficiencia en los procesos productivos.

Uno de los mayores desafíos que enfrenta la producción de palma es la pudrición del cogollo (PC), que deteriora los tejidos internos del cogollo (Ponguillo et al., 2021). Para hacer frente a esta problemática, se ha desarrollado un híbrido conocido como OxG (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*), que ha demostrado mayor resistencia a la Pudrición de Cogollo, en comparación con la palma africana común (Sánchez et al., 2021). No obstante, el híbrido presenta una enorme desventaja; como resultado de su cruce, su producción de polen es baja y su tasa de frutos abortados es alta, lo que requiere polinización asistida para lograr un llenado objetivo de frutos con almendra (Romero, 2018).

Uno de los diferentes métodos que existen para enfrentar esta problemática es con la hormona de crecimiento Ácido naftalenacético (ANA) en forma líquida, la cual genera crecimiento de los frutos solo estando en el ambiente cercano a este (Quimbiamba U., 2019). Como se ha podido observar, la hormona de crecimiento Ácido Naftalenacético (ANA) en forma líquida es una de las soluciones que se han propuesto para mejorar la problemática de la escasa polinización natural en palmas. Esta sustancia, que tiene efecto en el ambiente cercano al fruto, ha demostrado ser efectiva en el crecimiento y llenado de racimos, según lo reportado por (Quimbiamba U., 2019). Por otra parte, se presenta un nuevo problema para implementar

este método de polinización asistida el cual radica en la dificultad de aspersion de la hormona en alturas superiores a tres metros (Romero, 2018).

El presente proyecto consistió en desarrollar un prototipo telescópico lineal que se movilizara de forma eficiente por las cuadrillas del cultivo y que a su vez lleve el líquido de polinización (ANA) facilitando al trabajador llegar a alturas superiores de 3 metros disminuyendo la posibilidad de presentar problemas musculoesqueléticos. Consecuente con esta idea, presente proyecto de grado parte desde una problemática estructurada donde se identifica como el mayor problema la inexistencia de sistemas para polinizar artificialmente palmas de aceite en alturas superiores a 5 metros y cuya justificación radica principalmente en el desarrollo de un nuevo método de polinización que permita realizar esta tarea en ejemplares de la palma aceitera con alturas superiores a las mencionadas, obteniendo como resultado la disminución del porcentaje de racimos con gran parte de frutos abortados.

Por otra parte, se tuvo en cuenta que la implementación de este sistema resultó impactar consecuentemente a los trabajadores y el principal factor que afecta la salud, como son las lesiones en el manguito rotador, resultado de la manipulación de artefactos que requieren de una gran fuerza para operarlos. Por último, las pérdidas económicas se podrían disminuir gracias a la implementación del prototipo, debido a que al no existir posibilidad de polinizar palmas cuya altura supere los 3 metros, los palmicultores se ven en la obligación de cortar el ciclo productivo de estas palmas realizando la eliminación de estas para iniciar un nuevo cultivo.

En el presente documento se evidencia el proceso de diseño, construcción y evaluación del prototipo siguiendo la metodología concieve, design, implement and operate (CDIO) propuesta por Massachusetts Institute of Technology (MIT). En este, se desarrolla una amplia revisión bibliográfica acerca de la palma de aceite el proceso de extracción de aceite, las problemáticas asociadas a los procesos productivos de la palma y sus consecuencias. En cuanto al diseño, se desarrollaron varias opciones a dispositivos en un modelo asistido por computadora, los cuales fueron evaluados mediante matrices de decisión, utilizando el método de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), partiendo de criterios previamente definidos. Los materiales para implementar en el sistema telescópico fueron sometidos a un estudio de estático en el software SolidWorks para poder caracterizarlos en función a su

deformación y su posterior elección. Sumando el sistema electrónico del dispositivo, se realizó el diseño detallado. En la fase de construcción se realizó la cotización y adquisición de todos los materiales y componentes del prototipo para poder ser ensamblados por partes; carro transportador, brazo telescópico, eje o pivote y sistema electrónico. Finalmente se ensamblaron los anteriores sistemas y se procedió a realizar una evaluación preliminar de sus componentes tanto mecánicos como electrónicos. Finalmente, la última fase del presente proyecto consistió en la evaluación del prototipo en un lugar controlado y en campo, en las cuales se evaluaron la capacidad del prototipo de ascender a 3, 6, 9 y 12 metros y descender, así como también pruebas de cobertura de aspersión. En el palmar, se seleccionó un grupo de 22 palmas y se realizó acompañamiento en la labor de polinización con el método tradicional, en donde se tomaron los tiempos efectivos de polinizar cada ejemplar. En la siguiente jornada de polinización, se realizó la polinización con el prototipo desarrollado de los mismos ejemplares polinizados anteriormente y se tomó nuevamente el tiempo efectivo de polinización para posteriormente realizar la comparación de ambos métodos.

En los resultados obtenidos de la prueba de área de cobertura se puede concluir que el sistema de aspersión del prototipo telescópico tiene un 68% más área de cobertura que la bomba de espalda usada en el método tradicional de polinización. En cuanto a los tiempos efectivos de polinización, se pudo observar un 51.8% más eficiencia por parte del prototipo telescópico que realizando la misma tarea con el método y herramientas tradicionales. Finalmente, el prototipo telescópico mostró una gran capacidad de ascenso y aspersión en híbridos OxG de hasta 12 metros de altura, lo que demuestra su superioridad en términos de alcance si se compara con métodos tradicionales de polinización. Adicionalmente se desarrolló una última actividad correspondiente a una serie de propuestas de mejoras en el diseño del prototipo después de analizar el desempeño y puntos a mejorar en las pruebas de campo.

II. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Colombia es el cuarto país con mayor producción de aceite de palma a nivel mundial y primero en latinoamérica (Gutierrez, 2019). No obstante, el reto de la última década ha sido el manejo fitosanitario de la especie de palma africana *Elaeis guineensis* y la lucha contra la pudrición de cogollo (García, 2020), esta especie se mantiene como la más cultivada en el territorio nacional y latinoamericano (Diaz, 2022), sin embargo, el costo en pérdidas por la pudrición de cogollo (PC) de la última década supera los 3.000 millones de dólares (Ponguillo, 2021), por esta razón se ha visto la obligación de modificar genéticamente las especies para generar resistencia a la enfermedad (Billotte, 2019).

El híbrido *Elaeis guineensis x Elaeis oleífera* (OxG) es una de las opciones que mayor acogida ha tenido frente a esta problemática (Morales et al., 2009) y actualmente cuenta con más de 70.000 hectáreas cultivadas a lo largo de su territorio (Romero et al., 2020), tanto así que en algunas zonas ha sido necesario un cambio progresivo a esta especie. Una desventaja de este híbrido es la baja germinabilidad de su polen principalmente por ser un cruce interespecífico, que por añadidura, se ve aún más afectado por la baja actividad de los polinizadores naturales como insectos, consecuencia debido al uso de pesticidas dentro del cultivo (Kushairi & Amiruddin, 2020), generando una baja producción de inflorescencias masculinas (< 5g por inflorescencias) con una viabilidad de menos del 10 % y un escaso llenado de frutos partenocárpicos (Romero et al., 2020), por ello resulta necesario implementar métodos de polinización asistida que apoyen este proceso natural.

Desde el año 2018, los palmicultores adoptaron la aplicación de Ácido Naftalenacético (ANA) como sustancia polinizadora para suplir la deficiencia de polen generado por inflorescencias masculinas (García et al., 2020). Este método de polinización artificial ha implicado beneficios en el incremento de la tasa de extracción de aceite por racimo (Guataquira et al., 2019), aun así, el producto no ha sido utilizado en gran medida debido a que el mismo debe estar en el ambiente cercano al racimo (sea espolvoreado figura 1A o asperjado figura 1B), la morfología de la planta, las condiciones del terreno y la altura en la que se encuentran las inflorescencias. Estas variables dificultan a los trabajadores alcanzar y

disipar la hormona en la corona de la palma, especialmente cuando esta supera los 3 metros de altura (Rojas et al., 2016).



Figura 1. Tipos de polinización con Ácido naftalenacético (ANA): A. ANA en polvo, B. ANA líquida (García et al., 2021)

Como se observa anteriormente, estos métodos de polinización no tecnificados emplean equipos simples con rangos de altura limitados, hasta los 3 metros, que dependen en su mayoría de la destreza y resistencia del operario. En el caso específico de la polinización con ANA (mezcla líquida), el equipo de bomba aspersora puede ser adaptado con algunos tubos y/o mangueras, implementos que tienen un alto grado de dificultad para ser guiados hasta las inflorescencias cuando las estas superan los tres metros. (García et al., 2010). Además, la disposición de los frutos en la corona y las hojas de la palma exigen al trabajador un esfuerzo físico mayor, aunque en algunos casos se pueden utilizar escaleras para palmas y subir con equipos ligeros, como se observa en la figura 2, no deja de ser considerado un riesgo ergonómico tipo IV para las personas dedicadas a esta labor (Silva, 2014).

Adicionalmente, se suma el factor de que se deben cargar estos elementos para realizar la polinización y movilizarlos por las cuadrillas del cultivo en esas condiciones se traduce en una pérdida en la eficiencia de labor, situación que perjudica a los trabajadores que se les paga por hectáreas o inflorescencias polinizadas en el día (Fedepalma, 2021), como también incremento de riesgo de afectaciones en la salud del sistema musculoesquelético del operario.



Figura 2. Uso de escaleras para polinización de ANA

Otra alternativa es el uso de tubos más largos como se mencionó anteriormente, sin embargo, para este caso se han reportado lesiones en zonas como el manguito rotador, dado que el mismo se encargada de dar dirección y estabilidad a la hora de polinizar; generando molestias e inflamaciones como la bursitis o tendinitis que suelen presentarse de forma recurrente e incapacitan al trabajador para realizar su labor (Rojas et al., 2016). Como se mencionó anteriormente la altura máxima de los métodos actuales de polinización asistida en palma de aceite se mantienen en un rango de máximo 4 metros lo que obliga al palmicultor después de esta altura cosechar con polinización libre o natural y superada la altura de 16 metros o 15 años (según la especie), realizar la tala del híbrido, remover material orgánico, invertir en la preparación del terreno y esperar tres años a que la nueva palma comience su vida productiva, generando problemas tanto ambientales, como enormes pérdidas económicas a los palmicultores en la fase del establecimiento del cultivo (Daza et al., 2016).

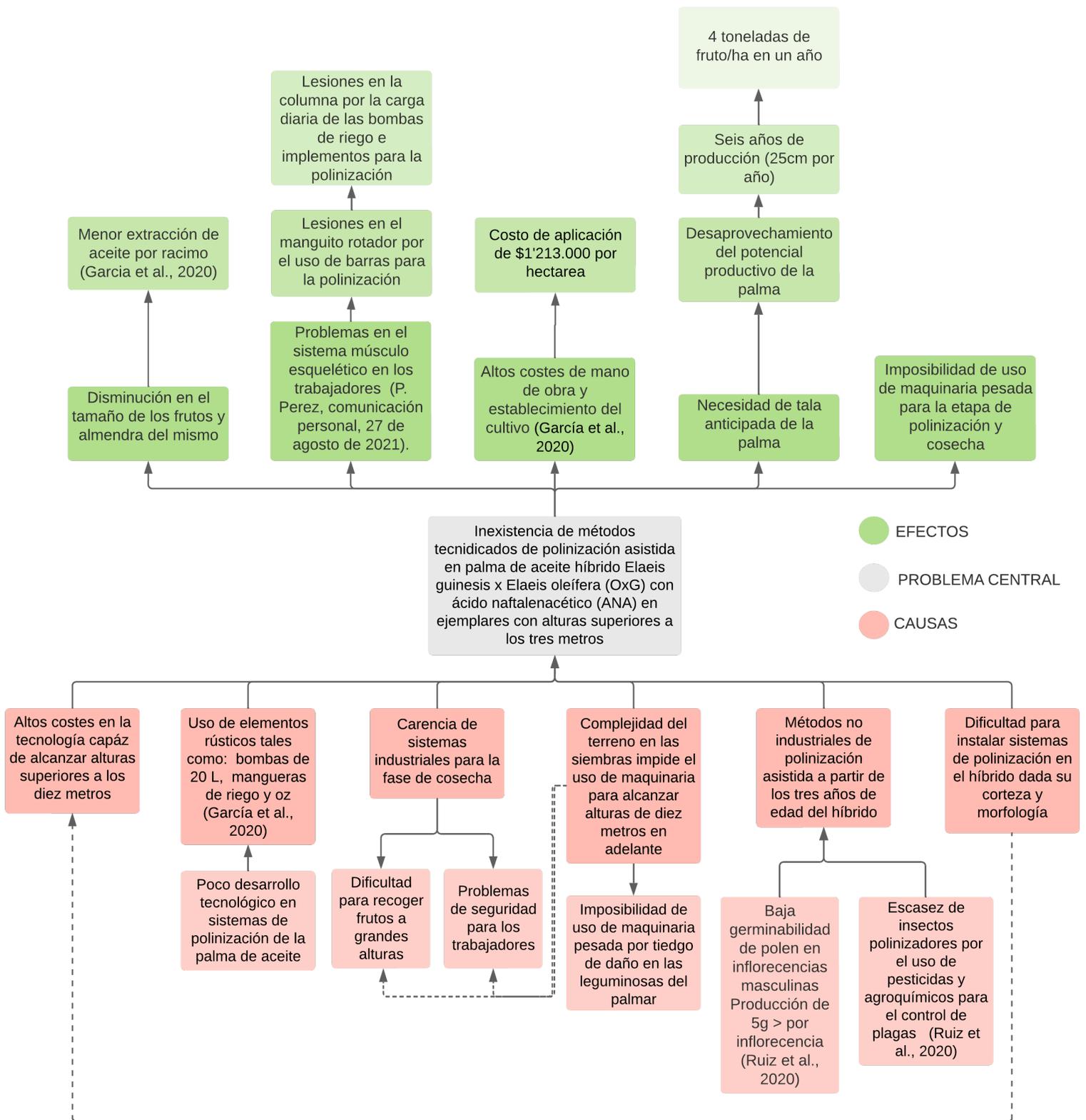


Figura 3. Árbol de problema en polinización asistida en el híbrido OxG

III. JUSTIFICACIÓN

Para lograr una producción eficiente y sostenible en el cultivo de palma de aceite, es fundamental implementar prácticas agroindustriales específicas y controlar los factores que influyen en la productividad del cultivo. Es importante tener en cuenta que la producción de aceite se lleva a cabo en el campo y, por lo tanto, el rendimiento de la Tasa de extracción de aceite (TEA) dependerá en gran medida de las prácticas de manejo utilizadas en el cultivo y de las brechas tecnológicas que afectan el rendimiento de este (García et al., 2016).

Sin embargo, gracias a la adopción de prácticas industriales y tecnológicas desarrolladas principalmente en Malasia, se han creado oportunidades para la innovación en el sector. Un interesante ejemplo de esto es el uso de drones, ver figura 4, los cuales están equipados con cámaras térmicas para monitorear el nivel de estrés de las plantas, causado por factores como el riego insuficiente o excesivo, la fertilización inadecuada, entre otros (Pino V., 2019). De esta manera, se pueden tomar medidas oportunas para mejorar la salud y productividad del cultivo, lo que contribuye a una producción más sostenible y rentable.

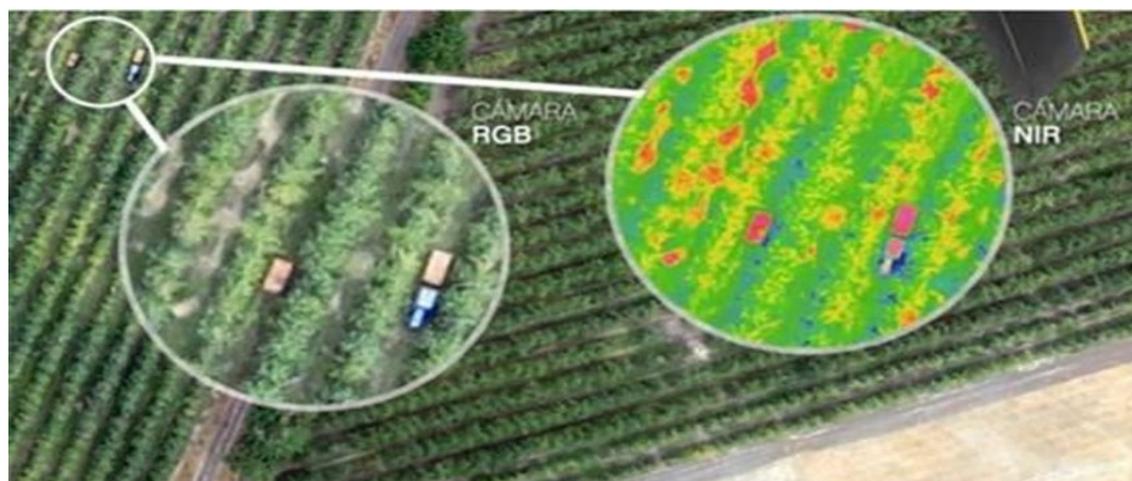


Figura 4. Imágenes según tipos de cámara y espectros (RGB y NIR) (Pino V., 2019)

Para el 2012, P. Franco, N. Arias y J. Beltrán realizaron un estudio sobre la adopción de la tecnología en las diferentes fases agronómicas del cultivo de palma, en él se obtuvo la siguiente información condensada en la tabla 1 donde la fase con menor adopción tecnológica es la de “labores culturales”, esta se basa en el trabajo de mantenimiento y cuidado que lleva

toda la etapa de producción del fruto, el cual es de gran importancia dado que de este depende en gran medida la formación del fruto final (Rojas et al., 2016).

Tabla 1. Adopción tecnológica en las diferentes fases del cultivo de palma. Adaptado de: (Rojas et al., 2016)

Fases agronómicas de un cultivo de palma de aceite en producción	Valor Máximo
Establecimiento del cultivo	20
Labores culturales	10
Manejo nutricional	30
Manejo fitosanitario	25
Cosecha y producción	15
Total de puntos y/o clasificación del nivel tecnológico	100

Como se mencionó anteriormente en la problemática, el cultivo de palma tiene diferentes problemas que abarcan desde el manejo ecológico y agronómico hasta un componente biomecánico con importantes afectaciones en la salud del trabajador. El presente prototipo, pretende resolver estas problemáticas unificando diferentes áreas de la bioingeniería, analizando el contexto general y tomando como referencia los últimos avances tanto como en investigación en la parte agrícola (productos para la polinización asistida como el ANA en suspensión líquida), y en el diseño mecánico para llegar a grandes alturas como lo son los dispositivos telescópicos además de sus infinitas posibilidades para el futuro de los procesos agrícolas como la futura implementación el análisis de fruto mediante cámaras y programas inteligentes o para asistir, medir y brindar información sobre la cosecha de los frutos a grandes alturas.

Consecuente con lo anterior, para el presente proyecto se espera asistir en el manejo de la polinización artificial en ejemplares con alturas de 3 a 12 metros, siendo una herramienta de apoyo que facilite llegar a las inflorescencias. El producto más eficiente para asperjar en la polinización asistida es el ANA mezcla líquida, sólo para aplicaciones después de anthesis (periodo de floración de la planta). Este ha demostrado que incluso sin despeje de espadas,

fibra vegetal que cubre el racimo, genera un aumento el peso promedio en 2,7 kg por racimo como se evidencia en la figura 5, representando más de 4 toneladas de fruto por hectárea en un año (J. García et al., 2010). Si bien el alcance del proyecto no permite comprobar el crecimiento del fruto mediante una evaluación agronómica, se presentan estudios donde ya se ha estudiado la hormona justificando su uso, por lo cual se elige como entrada imprescindible del sistema de polinización.

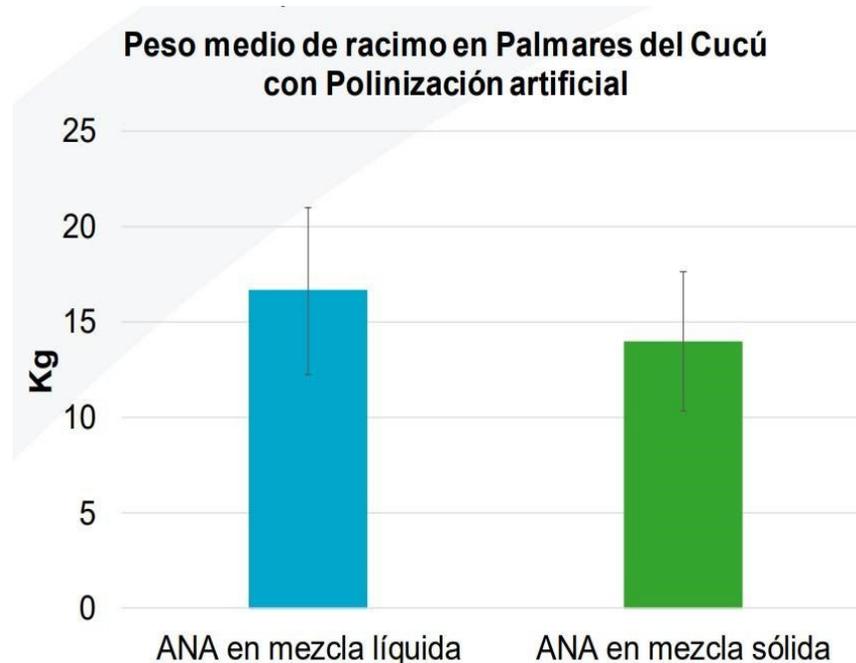


Figura 5. Peso de racimos polinización Líquida o Polvo (A. M. García et al., 2020).

Obstáculos

Como se mencionó en la problemática, la morfología de la palma se contempla como una dificultad para alcanzar las inflorescencias, esto principalmente por los tejidos fibrosos de las brácteas pedunculares y las hojas secas que naturalmente empiezan a caer y descomponerse (Rojas et al., 2016), lo cual es claramente un obstáculo para tener en cuenta en cualquier tipo de sistema polinizador que desee escalar por el tronco, también la disposición de sus hojas complica la llegada a las inflorescencias por la corona del mismo, requiriendo así un prototipo que tenga mayor precisión en la corona de las inflorescencias, así pues, es importante mantener la higiene de la planta en óptimas condiciones, como la palma podada de la figura 6A, razón la cual beneficia la salud de estas (Haran et al., 2020).



Figura 6. Comparativa acerca del manejo de la poda en las palmas: A. Palma podada, B. Palma sin podar. (Rojas et al., 2016).

Reducción de esfuerzo físico de los operarios

Al ser un dispositivo telescópico el operario no tendrá que manipular pesadas y estorbosas herramientas mientras realiza el proceso de polinización, tampoco realizar maniobras que pongan en riesgo su integridad como las mencionadas anteriormente en la problemática y también se espera que pueda ser transportado por el trabajador teniendo en cuenta la NTC ISO 11228 (Ortiz, 2022), mediante los sistemas actuales como se observa en la figura 7 u otro que pueda adaptarse de mejor manera a las condiciones del terreno, de modo que el trabajo físico será reducido al igual que las lesiones o problemas músculo-esqueléticos por esta actividad.



Figura 7. Sistemas de movilidad de objetos en plantaciones de palma (Rojas et al., 2016)

Dispositivos telescópicos

La aspersion del líquido se espera realizar a través de tecnología enfocada en un área de la mecánica conocida como dispositivos telescópicos, figura 8, los cuales son utilizados para desempeñar muchas tareas que implican riesgos de seguridad para los humanos en diferentes labores (Sattar et al., 2009). Los dispositivos telescópicos lineales se han implementado en diferentes campos para superar la limitante de llegar a cierta altura de manera segura y precisa, por ejemplo en la construcción de edificios y puentes, a menudo se requiere que los trabajadores trabajen en alturas elevadas. Los dispositivos telescópicos lineales, como las grúas y las plataformas elevadoras, se utilizan para instalar elementos estructurales en estas estructuras a grandes alturas. Estos dispositivos permiten que los trabajadores se muevan verticalmente a lo largo de la estructura para realizar tareas de instalación de manera segura y eficiente.

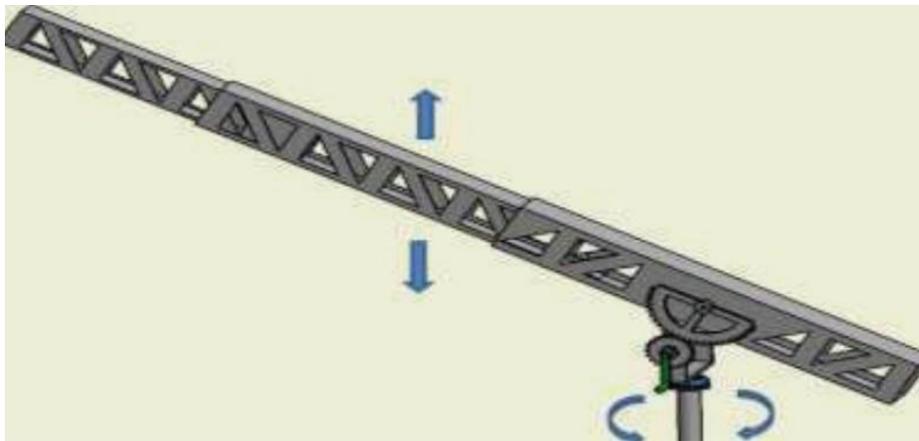


Figura 8. Ejemplo de sistema telescópico para la carga de cámaras de grabación (Chicaiza y Guerrero, 2016).

El acceso a espacios confinados es otro ejemplo de la implementación de estos dispositivos; para permitir el acceso a espacios confinados en altura, como la parte superior de los tanques de almacenamiento de productos químicos y los silos. Estos dispositivos permiten que los trabajadores accedan a estos espacios de manera segura y eficiente para realizar tareas de mantenimiento y limpieza. En rescate y salvamento en situaciones de emergencia, como incendios en edificios y rescates en alturas elevadas, los dispositivos telescópicos lineales, como las escaleras telescópicas, se utilizan para permitir que los equipos de rescate alcancen a las personas en peligro y los evacuen de manera segura. Estos dispositivos también se

utilizan para permitir que los equipos de bomberos alcancen los pisos superiores de los edificios en llamas para combatir el fuego. (Kumar & Sivakumar, 2017).

El diseño de los dispositivos telescópicos para llegar en diferentes alturas, dependen de la cantidad de secciones y la compensación de fuerzas para el prototipo (Sattar et al., 2009), de modo que, el presente prototipo espera solucionar por primera vez el problema de altura, polinizando palmas en una primera instancia entre 3 y 12 metros para luego en otra etapa llegar a las palmas de más 12 metros hasta las 15 donde aún son productivas, dando más de 4 años de cosecha con un promedio de 25 cm por año (Torres, 2015). Lo anterior se traduce en un impacto significativo en la economía del sector, esto debido a la posibilidad de aumentar el rango productivo de las palmas eliminando el factor de imposibilidad de polinizar los ejemplares por la altura.

IV. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Desarrollar un prototipo telescópico lineal con ajuste manual para asistir la polinización en palmas de aceite híbrido *Elaeis guineensis x Elaeis oleífera* (OxG) en Casanare.

4.2 ESPECÍFICOS

- Diseñar un prototipo telescópico lineal con ajuste manual para asistir la polinización en palmas de aceite híbrido *Elaeis guineensis x Elaeis oleífera* (OxG).
- Construir de un prototipo telescópico lineal con ajuste manual para la elevación y aspersion del polinizador Ácido Naftalenacético (ANA) en mezcla líquida en las inflorescencias de la palma de aceite en alturas desde 3 a 12 metros.
- Evaluar el tiempo requerido por el prototipo en polinizar 60 inflorescencias del híbrido *Elaeis guineensis x Elaeis oleífera* (OxG) y compararlo frente al tiempo empleado con técnicas convencionales de polinización usando ANA líquido en un grupo de palmas de la misma edad.

V. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 Palma Aceitera

La palma aceitera es una planta altamente productiva en términos de aceite (García, 2018). De hecho, es considerada la semilla oleaginosa más productiva del mundo. Una hectárea de plantación de palma aceitera puede producir en promedio entre seis y diez veces más aceite que otras semillas oleaginosas (Martínez & Gómez, 2016). Esto se debe a la alta eficiencia en la producción de aceite de sus frutos, así como a su capacidad para crecer en una amplia variedad de climas y suelos. Estas características hacen que la palma aceitera sea una importante fuente de aceite vegetal a nivel mundial, utilizada en una amplia gama de productos, desde alimentos y cosméticos hasta biocombustibles (García et al., 2016).

Desde sus inicios en el Golfo de Guinea, en África Occidental; de ahí su nombre *Elaeis guineensis* Jacq. y en América, donde se conoce como *Elaeis oleifera*, la palma aceitera ha vivido en armónica integración con otras especies en los suelos tropicales de Asia, África y América. Su amplia gama de productos incluye aceites comestibles, productos alimenticios refinados, cosméticos, pinturas, jabones, detergentes, tintas para impresoras, velas, biomasa y productos oleoquímicos (Hartley et al., 1983), y recientemente se ha presentado como una importante alternativa para satisfacer la creciente demanda energética a nivel nacional y mundial mediante biocombustibles (González et al., 2008). Hace 180 años, las primeras grandes plantaciones fueron establecidas por colonias holandesas en Indonesia y a finales de los años cincuenta, se desarrolla la iniciativa y las condiciones para promover los cultivos y desarrollar todo su potencial económico mediante materiales genéticos; esto principalmente por el crecimiento considerable de la demanda de grasas comestibles en un mundo de posguerra (Wambeck, 2005).

Los cultivos se extendieron extraordinariamente durante los años sesenta, cuando la oferta mundial de palma el aceite se duplicó. En particular, el gobierno de Malasia basó su política de desarrollo sobre el aceite de palma. En consecuencia, el país se convirtió en el primer exportador de aceite de palma en el mundo, cargo que ocupaba anteriormente África, que utilizaba la mayor parte de su producción para consumo local (Bernal et al., 2001).

La intensa investigación sobre la palma aceitera y el aceite de palma a nivel mundial explica su importante contribución y situación en el mercado de aceites y grasas. En Malasia, el éxito de la palma aceitera se atribuye a muchos factores, que incluyen condiciones climáticas favorables, infraestructura bien establecida, habilidades de gestión, recopilación de información para análisis estadístico y tecnología para el cultivo de palma aceitera y una estructura de propiedad de la tierra que favorezca el tipo de propiedad agrícola. No obstante, para seguir siendo competitivo y garantizar la sostenibilidad agrícola centrada al ámbito, económico, social y medioambiental, deben aplicarse diversas disciplinas como fisiología de cultivos, agronomía, genética, cultivo de tejidos, ciencia de datos, robótica y biotecnología, además de ello deben planificarse e implementarse estratégicamente desde la zona de campo hasta las plantas de beneficio, según su necesidad (Wambeck, 2005).

Se estima que la palma aceitera fue introducida en Colombia a comienzos del siglo XX, aunque su cultivo y producción extensiva de forma comercial, data de la década del 50. Entre 2003 y 2007 producían toneladas de aceite de palma en 200.000 hectáreas de tierra productiva. Para el 2015 se contaba con cerca de 500 mil hectáreas sembradas de diferentes especies de palma en 126 municipios de 17 departamentos generando alrededor de 1,2 millones de toneladas de aceite de palma crudo. (Rojas et al., 2016).

En 2020 se estimó que Colombia contaba con 750.000 hectáreas de tierra plantadas con aceite de palma. Durante los últimos diez años, hubo un crecimiento significativo en el mundo en la producción de palma aceitera, pasando del 26,2 % de la producción mundial de aceites comestibles y hechos en 2007-2008 al 31,2 % en 2017-2018, convirtiéndose así en la oleaginosa con el mayor rendimiento por hectárea del mercado. Hoy en día la agroindustria de la palma de aceite en Colombia es considerada como un sector estratégico distribuido en su territorio como se observa en la figura 9 y de talla internacional siendo el cuarto productor de aceite de palma a nivel mundial (Rojas et al., 2016).

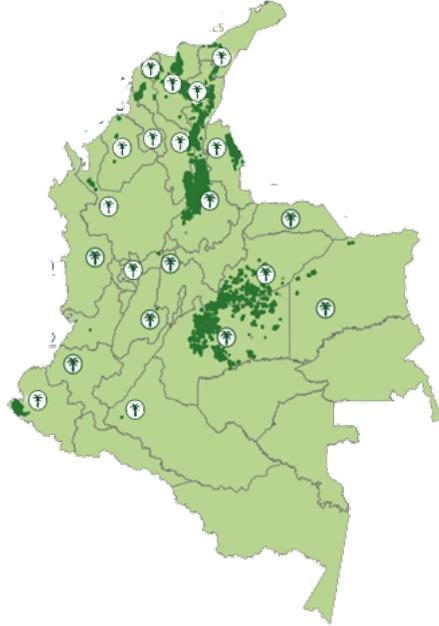


Figura 9. Distribución de cultivos de palma en Colombia (Rojas et al., 2016)

5.1.2. Morfología de la Palma Aceitera

La palma aceitera es un árbol no ramificado de 20 a 30 metros de altura. Las raíces surgen de la base del hipocótilo y más tarde del fuste basal del tallo. Las raíces primarias descienden profundamente de la base del tronco, pero se quedan cortas cuando el nivel freático es alto. De lo contrario, pueden producir raíces secundarias, terciarias y cuaternarias que forman una densa esfera alrededor de la misma (Marulanda et al., 2021). La mayoría de las raíces se encuentran en los 15 centímetros superiores del suelo, con una concentración primaria cerca de la palma y una concentración secundaria de 1,5 a 2 metros de la base. El crecimiento temprano de las plántulas da como resultado la formación de una base de tallo ancho o estipe (Rojas et al., 2016). El tronco no se forma hasta los 3 años; cuando el ápice ha alcanzado su diámetro completo en la forma de un cono invertido, después tiene lugar el alargamiento intermodal. La tasa de extensión depende de factores ambientales y hereditarios, y varía entre 25 y 50 centímetros por año (Verheye, 2010).

Las flores de la palma de aceite tienen la capacidad de crear miles de frutos esféricos, ovoides o alargados que forman racimos compactos que pesan entre 10 y 40 kilogramos cada uno. Antes de adquirir sus característicos tonos rojizos-anaranjados en su madurez

(dependiente también de la especie cultivada), los frutos de la palma aceitera son de color violeta oscuro, prácticamente negros. En el interior como se observa en la figura 10B, tienen una sola semilla (almendra), protegida rodeada por un endocarpio leñoso (cuesco) que a su vez se encuentra recubierto por una pulpa carnosa. Tanto el grano como la pulpa contienen grandes cantidades de aceite. El primero proporciona aceite de palmiste, mientras que el segundo proporciona aceite de palma o aceite rojo (Torres et al., 2004). El tallo (o despecho) de las oleaginosas es erecto y tiene forma de cono invertido.

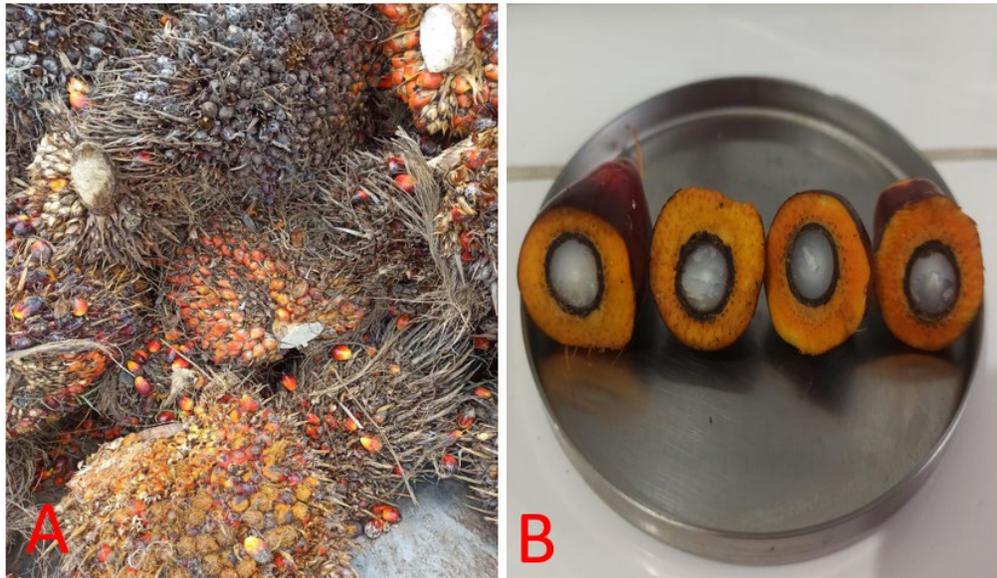


Figura 10. Racimo y frutos de la palma aceitera: A. Racimo de *Elaeis guineensis* Jacq, B: Fruto maduro de palma de aceite.

Antes de envejecer, es rugoso debido al pecíolo que lo rodea. Al llegar a la madurez es lisa, pero segmentada por las cicatrices que le producen sus casi cuarenta hojas al marchitarse y caer. Durante su mediana edad, las hojas crecen entre tres y seis metros, casi paralelas al suelo. Cada hoja está formada por unos 250 folíolos lineales, que crecen irregularmente a ambos lados del pecíolo (Rojas et al., 2016). El aspecto desordenado de la hoja es uno de los rasgos característicos de la especie. La vida productiva de la palma aceitera puede extenderse por más de 50 años, pero alrededor de los 20 o 25 años su tallo alcanza una altura que dificulta la recolección, marcando así el inicio de la renovación para las plantaciones comerciales (Torres et al., 2004).

Las palmas de aceite plantadas en el campo para la producción comercial requieren un gran

cuidado y protección para crecer, figura 11A, desarrollarse y alcanzar las etapas productivas y retributivas lo antes posible, como la de la figura 11B. Sin embargo, el manejo adecuado no es exclusivo de la etapa no productiva. A lo largo de su vida, las palmas de aceite requieren protección de la competencia para asegurarse que reciben cantidades adecuadas de agua, luz y nutrientes en los momentos adecuados, es por ello que la distribución en las cuadrillas se da con una disposición de 9 metros entre palmas (Sánchez et al., 2017). También requieren un manejo sanitario suficiente y que las hojas y los racimos se poden cuidadosamente para evitar cualquier daño (Wambeck, 2005).



Figura 11. Híbrido OxG en diferentes etapas. A. Híbrido OxG en etapa de establecimiento, B. Híbrido OxG de 3 metros de altura (Rojas et al., 2016).

Por tanto, el cultivo de la palma aceitera exige una mano de obra con diferentes niveles de habilidad y un amplio conocimiento. Las personas que trabajan en el campo saben que el manejo cuidadoso de los frutos durante la cosecha, recolección y transporte, así como su procesamiento oportuno, determinan la cantidad y calidad del aceite obtenido (Fedepalma, 2021). El diseño de la plantación y sus lotes, caminos, canales y molinos son fundamentales para agilizar el cultivo, mantenimiento, cosecha y transporte de la fruta a los sitios de procesamiento (Rojas et al., 2016).

5.1.3 Aceite de Palma

En el siglo XV, después de probar el aceite de palma en África, el explorador veneciano Alvise da Mosto dijo que "tiene aroma a violetas, sabor a aceituna y color que tiñe la comida como el azafrán, pero eso es aún más atractivo" (Fold & Whitfield, 2012). El rojo tropical del aceite de palma crudo es prueba de su alto contenido en caroteno (vitamina A), que es diecisiete veces superior al de las zanahorias al comparar un peso igual. Esto lo convierte en una de las mejores fuentes naturales de estos elementos vitales y, por tanto, una excelente alternativa para combatir la deficiencia de vitamina A que padecen las personas en muchos países en vías de desarrollo (Rojas et al., 2016).

Los tocoferoles y tocotrienoles (fracciones de vitamina E) son nutrientes importantes que se encuentran en el aceite de palma. Junto con los carotenos, actúan como antioxidantes para reducir el daño celular causado por sustancias tóxicas o la contaminación ambiental, que aceleran el envejecimiento y el desarrollo de algunas enfermedades. Además, los tocotrienoles son potentes compuestos anticancerígenos y antitrombóticos (Arunachalam, 2011). Otra característica única del aceite es su perfecto equilibrio entre grasas saturadas e insaturadas. Gracias a esto, no tiene impactos negativos en los niveles de colesterol de los consumidores. Incluso sin conocer sus beneficios, la gente en África lo ha estado usando como parte de su dieta durante más de cinco mil años. Incluso hoy, como entonces, el aceite de palma se consume crudo y sin refinar en varios países africanos (Arunachalam, 2011).

El aceite de palma es considerado como uno de los mejores aceites para freír, debido a que soporta elevadas temperaturas antes de refinarse como se muestra en la figura 12A, se observa un color rojizo, motivo por el cual se le suele llamar aceite rojo. Se utiliza en hogares, restaurantes y en la producción comercial de papas fritas, bocadillos inflados, empanadas, buñuelos, galletas de mantequilla y otros. Su calidad es posible determinarla por el color que presenta, figura 12B.

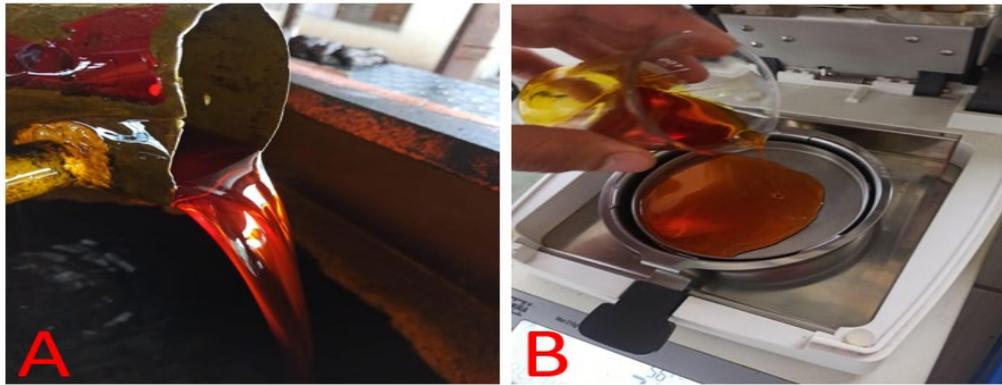


Figura 12. Usos del aceite de palma y sus coloraciones: A. Aceite rojo en tanque terminado, B. Aceite de palma en muestra de calidad.

El aceite de palmiste, presentado en la figura 13A y 13B se derrite por encima de los 30 °C y, al entrar en contacto con la boca, proporciona una sensación suave, similar a la de la manteca de cacao. También se preparan margarinas e ingredientes especiales para hornear pasteles, croissants y pan con palmiste, que les da volumen, textura suave y duración prolongada. Otros productos mejorados con aceite de palmiste son los dulces, la crema de café y la mantequilla de maní (Wambeck, 2005). Por otro lado, la torta de palmiste (figura 13C) es un subproducto del aceite de palma, se usa para producir alimentos concentrados para complementar la nutrición animal y este se extrae de la misma fruta (nuez) y pérdidas que no logra ser prensada.

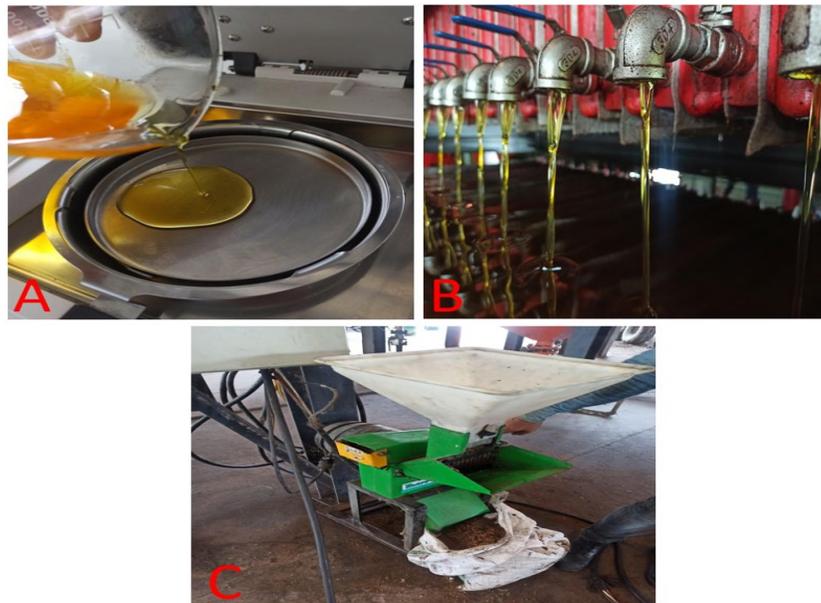


Figura 13. Aceite de palmiste terminado y subproductos: A. Aceite de palmiste en prueba de calidad, B. Aceite de palmiste, C. Torta de palmiste.

El aceite de palma y el aceite de palmiste son especialmente útiles para fabricar productos oleoquímicos tales como ácidos grasos, ésteres grasos, alcoholes grasos, nitrógeno graso y compuestos de glicerol. Últimamente han ido ganando fuerza para el uso de biocombustibles (González et al., 2008). En 1990, Rudolf Diesel había usado aceite vegetal para hacer funcionar el motor que lleva su nombre. Años más tarde, se demostró que el aceite de palma también podría tener estos usos con ventajas ambientales más significativas sobre los combustibles fósiles (Zárate et al., 2016).

Colombia produce biodiesel de aceite de palma que mezclado con diesel, permite operar automóviles, máquinas y se espera que un futuro cercano aviones, si y sólo si, la huella de carbono resulta ser menor que la de otros combustibles, trayendo entonces beneficios al medio ambiente, generando empleo y proporcionando un suministro de energías renovables (Sánchez, 2020). Además, actualmente se tiene una regulación obligatoria para añadir un porcentaje de 12 % biodiesel de palma por galón, incluido ya cuando se compra en cualquier gasolinera certificada (Wambeck, 2005).

La biomasa resultante del proceso de extracción del aceite de palma se puede utilizar de diferentes formas, entre ellas: devolverla al campo como parte del ciclo de nutrientes como por ejemplo la tusa del racimo de la figura 14A, ayudando a mejorar el suelo y retener la humedad; y como biocarbón, tanto en el campo como para capturar gases de efecto invernadero. También existe un uso potencial de biomasa para fabricar combustibles de segunda generación, celulosa, aglomerados, alimentos y maíz. Todos estos usos se enmarcan dentro de la tendencia global de una economía circular, o para mantener la caldera que genera el vapor en una planta de beneficio, como se observa en la figura 14B (Zárate et al., 2016).



Figura 14. Uso de biomasa en diferentes partes del proceso. A. Tusa de retención de humedad en suelos del cultivo. B. Uso de biomasa en caldera.

5.1.4. Polinización Asistida

La polinización asistida es un proceso mediante el cual se asperja, o espolvorea polen a las inflorescencias femeninas, para conseguir una óptima fecundación y consecuentemente, el incremento de la productividad de la cosecha (Forero et al., 2010). La polinización en palma aceitera (natural) se realiza de dos formas; por el viento o por insectos (Rojas et al., 2016); sin embargo, en nuevos cultivos con especies híbridas, en donde la producción de polen y la presencia de insectos polinizadores propios de este tipo de plantas es escasa, figura 15A, pueden introducirse insectos polinizadores nativos con la capacidad de realizar la misma función o realizar polinizaciones asistidas (García et al., 2021). Los racimos y frutos son el fin del proceso de una fecundación de inflorescencias femeninas que al ser polinizadas, forman frutos mediante una serie de procesos bioquímicos que culminan con la biosíntesis y el almacenamiento de triglicéridos (aceite).

La polinización asistida es necesaria en materiales híbridos (OxG), o donde existe una baja eficacia en la polinización natural. Esta práctica consiste en aplicar polen manualmente a inflorescencias femeninas como se observa en la figura 15B en el momento oportuno, es decir en antesis y sus posteriores días a esta fase (7 y 14 días) debido a la baja producción de polen de sus inflorescencias masculinas como se muestra en la figura 15A (Forero et al., 2010). Para ejecutar un proceso exitoso de polinización hay que evitar aplicaciones en momentos lluviosos, verificar visualmente las palmas de manera periódica no superior a 48

horas, con el fin de constatar el estado de antesis para la aplicación oportuna de la hormona (García et al., 2020).



Figura 15. Polinización asistida: A, Palmas masculinas, polen de híbridos OxG, B. Palmas femeninas, inflorescencias de híbrido OxG.

Para la correcta aplicación del Ácido en su presentación líquida se especifica que esta labor debe ser realizada por dos trabajadores; uno es el identificador el cual se encarga de observar e identificar dónde se encuentran las inflorescencias de la palma y los obstáculos presentes para poder llegar a las mismas. Por otro lado, el segundo trabajador es el aplicador, el cual tiene la labor de, gracias a la información obtenida por el identificador, procede a realizar la aspersión del Ácido en las inflorescencias. Las herramientas que se usan para esta labor se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de las herramientas en la aplicación de ANA en mezcla líquida. (García et al., 2021)

Herramientas Polinización asistida ANA Líquida	
Aplicador	Identificador
Bomba de espalda (20L)	Tubo de aluminio con punta de

Boquilla tipo cono hueco	gancho
Manguera	
Extensión de salida (Tubo de aluminio)	
Dispositivo móvil	

Estas herramientas limitan la polinización debido a que depende de la destreza del operario para operar y realizar esta labor de manera exitosa. La variable de la altura depende de la edad y morfología de cada palma, por lo que los palmicultores se ven en la obligación de tener varias herramientas de extensión para poder alcanzar las inflorescencias. Esto implica tener varios tubos con dimensiones diferentes para cada caso, lo que se traduce en mayores gastos. Por otra parte, se puede evidenciar que a mayor longitud del tubo para polinizar, mayor es el torque empleado por el operario para poder manipular el tubo y guiar la boquilla a las inflorescencias y sumando el peso aproximado de 30 kilogramos de la bomba de espalda y su respectivo contenedor son recurrentes las repercusiones en el sistema musculoesquelético del operario.

En cuanto a los rendimientos laborales hay factores que determina los potenciales productivos, tanto para el híbrido como para la mayoría de las especies de palma de aceite; en la tabla 1, se mencionaron las fases agronómicas del cultivo, pero es importante en términos de productividad que las mismas se realicen adoptando buenas prácticas para un mayor rendimiento. El mantenimiento de lotes (cuidado de calles, control de maleza, poda) es de vital importancia para que los operarios de las diferentes fases logren hacer un trabajo eficientemente, ya sea polinizar, podar, o cosechar (Mosquera et al., 2006). Este híbrido presenta alta precocidad a floración, entre los 18 y 22 meses después de siembra en campo e inflorescencias en anthesis expuestas en más del 60% lo que facilita la polinización artificial y la conformación de racimos (Bastidas Pérez, 2013). Con buen manejo agronómico, el híbrido expresa potenciales de productividad entre 25 y 35 toneladas de racimos de fruta fresca por hectárea al año quinto año producción, y entre 35 a 46 toneladas por hectárea al año en plantación adulta (Mosquera et al., 2016). Este híbrido tiene una tasa de crecimiento

de 25 a 32 cm por año durante su etapa de establecimiento, el cual es equivalente a un rango entre 5 y 6.5 años desde su siembra, posterior a esto la palma crece entre 50 y 70 cm por año, es decir que su mejor etapa productiva se presenta después de los 8 metros cuando la misma tiene aproximadamente 15-17 años, y se considera como palma adulta (Bastidas Pérez et al., 2020). También en los análisis de productividad laboral en plantaciones de palma de aceite en Colombia se identificó que el 85% de participación de cultivos en el total de hectáreas cultivadas, es palma adulta y 82% de la misma específicamente en el híbrido OxG (Ruíz Álvarez et al., 2022). Al realizar polinización asistida o artificial, la proporción de frutos partenocárpicos (sin semilla) en el racimo puede superar el 50% con polen, y con aplicaciones de ácido alfa naftalenacético (ANA) estos pueden llegar a ser el 99% del racimo. Además, el peso de los racimos se incrementa entre un 30% a 50% y se favorece su conformación dado que se presentan bajas tasas de malogros, entre el 0,2% al 2,8%. Con la aplicación del punto óptimo de cosecha para el corte de racimos en estadio 807 y 809, más la polinización asistida (polen o ANA), este híbrido tiene el potencial de lograr una tasa de extracción de aceite industrial de hasta el 26,3%, que corresponda a un potencial productivo de 7,6 toneladas por hectárea de aceite crudo de palma (Mosquera et al., 2016).

5.1.5 Ácido Naftalenacético

El ácido 1-naftalenacético (ANA), sus sales, éster y acetamida son reguladores del crecimiento de las plantas (PGR) que se denominan colectivamente acetatos de naftaleno. La actividad PGR de ANA se debe a su similitud estructural con la hormona vegetal natural ácido indolacético (IAA). Actualmente están registrados para su uso en varios cultivos frutales y frutales, incluidos manzana, cereza, olivo, naranja, pera, tangelo y mandarina (Mata & Natera, 2009). Como reguladores del crecimiento de las plantas, se pueden usar en los cultivos mencionados anteriormente para evitar la caída de frutas antes de la cosecha, árboles frutales delgados y retrasar la floración (Goren & Bukovac, 1973).

También pueden estimular el crecimiento y retrasar la caída de las hojas en plantas ornamentales. Aproximadamente 20,000 libras de los ingredientes activos de acetato de naftaleno se aplican anualmente en los EE. UU (Cabot & Llauro, 2004). Las clases de formulación registradas de acetatos de naftaleno, que pueden usarse en cultivos de alimentos,

incluyen polvo humectable, polvo, concentrado fluido, concentrado soluble y líquido listo para usar. Estas formulaciones se pueden aplicar utilizando equipos aéreos o terrestres al voleo, rociadores manuales, brocas, tratamiento por inmersión o empapado del suelo. Los acetatos de naftaleno se aplican típicamente como una solución de pulverización diluida (1-2 %), y el tiempo del tratamiento varía según el propósito de los tratamientos. El éster etílico y la acetamida de ANA se utilizan al principio de la temporada para controlar la formación de brotes y el cuajado (raleo), respectivamente. ANA o sus sales de amonio, potasio o sodio se pueden usar al principio de la temporada para el aclareo de la fruta o más tarde en la temporada para el control de la caída de la fruta (Goren & Bukovac, 1973).

5.1.6 Sistema Telescópico Lineal

Un dispositivo telescópico lineal es un mecanismo que permite la extensión y retracción lineal de un objeto o una carga. Estos dispositivos se utilizan comúnmente en una variedad de aplicaciones, como en maquinaria industrial, equipos de construcción, automóviles y mobiliario. Un ejemplo común de dispositivo telescópico lineal es el pistón hidráulico, que consiste en un cilindro y un émbolo que se mueve dentro de él. El pistón es accionado por un líquido presurizado, generalmente aceite hidráulico, que fluye hacia el cilindro y empuja el émbolo hacia fuera. Otro ejemplo es el actuador lineal eléctrico, que utiliza un motor eléctrico para generar movimiento lineal. El motor hace girar un husillo roscado, que se mueve a lo largo de un tubo de guía para extender o retraer el actuador. (Wang, Y., & Wang S., 2012).

Los dispositivos telescópicos lineales son componentes mecánicos utilizados para proporcionar movimiento lineal en una dirección axial. Estos dispositivos se componen de un conjunto de tubos que se deslizan uno dentro del otro para proporcionar una extensión variable. La versatilidad de estos dispositivos les permite adaptarse a diferentes situaciones y requisitos, lo que los convierte en una herramienta útil en una variedad de aplicaciones industriales y comerciales (Kumar & Sivakumar, 2017). En la industria automotriz, los dispositivos telescópicos lineales se utilizan en una variedad de aplicaciones, como la extensión de los brazos de las grúas para levantar y mover objetos pesados, como motores, transmisiones y piezas de carrocería. También se utilizan en el movimiento de las plataformas elevadoras para transportar vehículos dentro y fuera de los talleres de reparación y en la

extensión de los asientos en los vehículos de transporte público para proporcionar espacio adicional para los pasajeros. En la maquinaria pesada, los dispositivos telescópicos lineales se utilizan en la extensión de los brazos de las excavadoras y en la extensión de las cucharas para recolectar materiales. También se utilizan en los brazos de los cargadores para cargar y descargar materiales en los camiones y en la extensión de los sistemas de elevación de las grúas. (Liu, J., et al., 2019)

En la construcción, los dispositivos telescópicos lineales se utilizan en la extensión de los brazos de los andamios móviles, en la extensión de los brazos de las plataformas de trabajo, y en la extensión de los sistemas de elevación de las grúas. También se utilizan en la extensión de las vigas de acero para apoyar el peso de la estructura. En la industria aeroespacial, los dispositivos telescópicos lineales se utilizan en la extensión de los sistemas de sujeción para sujetar las piezas de la aeronave durante el ensamblaje. También se utilizan en los brazos de los robots para mover las piezas de la aeronave durante el proceso de ensamblaje. (Kumar & Sivakumar, 2017). En la robótica, los dispositivos telescópicos lineales se utilizan en los brazos de los robots para proporcionar movimiento lineal a las pinzas de sujeción. También se utilizan en los brazos de los robots para proporcionar movimiento lineal a las herramientas de corte y soldadura, como el sistema de la figura 16.

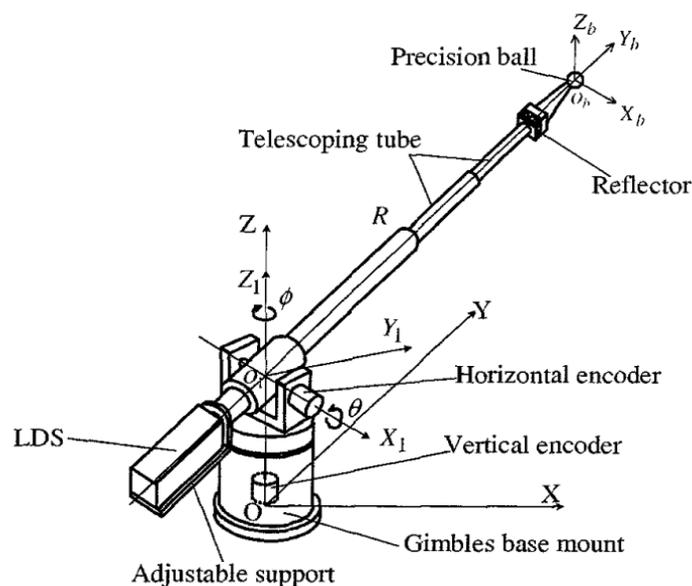


Figura 16. Sistema telescópico robotizado láser. (Fan et al., 2004)

En conclusión, los dispositivos telescópicos lineales son herramientas versátiles y útiles en una variedad de aplicaciones en la vida real. Desde la industria automotriz y la maquinaria pesada hasta la construcción, la industria aeroespacial y la robótica, estos dispositivos se utilizan para proporcionar movimiento lineal en una dirección axial. Al seleccionar un dispositivo telescópico lineal para su aplicación específica, es importante considerar la capacidad de carga, la velocidad de movimiento y el rango de extensión requerido para desarrollar la tarea deseada.

Los dispositivos telescópicos lineales también se pueden clasificar en función de su capacidad de carga, velocidad y carrera, entre otros factores. Al seleccionar un dispositivo telescópico lineal, es importante considerar las necesidades específicas de la aplicación para garantizar que el dispositivo elegido tenga la capacidad adecuada para la tarea en cuestión. Un Sistema Telescópico cuenta con una serie de tramos acoplados de tal forma que permite tener distintas longitudes de alcance del brazo, los mecanismos que constituyen el sistema, así como los materiales utilizados en la construcción hacen que el prototipo tenga un costo relativamente bajo con respecto a otros equipos de este tipo. Los sistemas de soporte telescópicos tienen diferentes aplicaciones, figura 17, desde la parte de medios audiovisuales, figura 17A, hasta escaleras, brazos para la construcción o pértigas para medición de líneas de alta tensión, figura 17B. (Chicaiza & Guerrero, 2016).

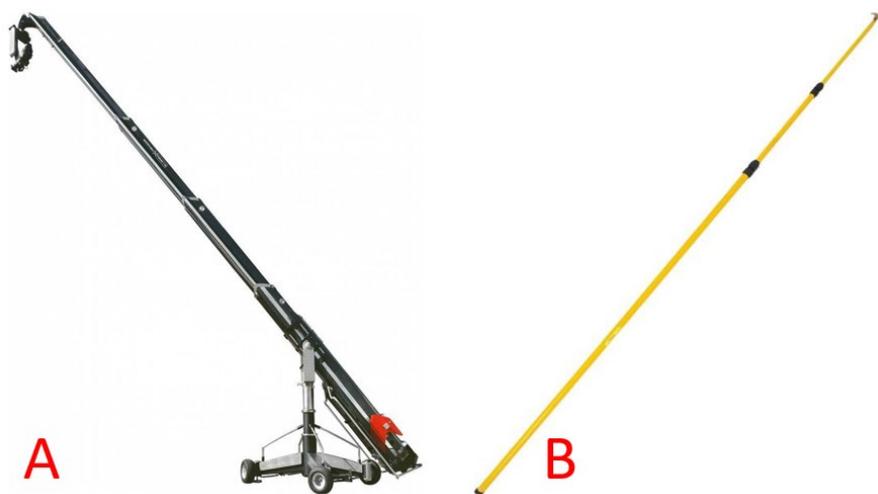


Figura 17. Utilización de sistemas telescópicos en diferentes entornos: A. Brazo telescópico empleado en medios audiovisuales. B. Pértiga para eléctricos. (Chicaiza y Guerrero, 2016).

5.2 MARCO GEOGRÁFICO

Los requerimientos de suelo y clima adecuados para el cultivo de la palma de aceite son: precipitación entre 2.000 y 2.500 mm/año; temperatura entre 26 y 29 °C; no tener épocas secas (meses); radiación solar diaria entre 16 y 17 MJ/m² y velocidad del viento menor a 10 m/s, sumado a suelos adecuados (textura franca) y una selección óptima de materiales genéticos para ambientes específicos (Rojas et al., 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, para el presente proyecto se delimitó el departamento de Casanare, principalmente por ser un departamento con varios cultivos de palma de aceite, y tener varios municipios con condiciones climáticas y requerimientos del suelo óptimos para el desarrollo correcto de la planta. Dada la naturaleza del proyecto es necesario conocer las plantaciones para la etapa de diseño y evaluación (incluidos en los objetivos); motivos por el que se establecen con los siguientes criterios que debe cumplir el palmar para realizar tanto la visita técnica como la evaluación del dispositivo:

- Que la finca permite la entrada para el reconocimiento inicial del cultivo.
- Que la finca que permita la evaluación del prototipo.
- Mayor facilidad de transporte para el prototipo medido en tiempo y distancia para llegar al sitio.
- Que las palmas seleccionadas cumplan con las especificaciones descritas anteriormente.

Gracias a lo anterior se pudo seleccionar y contactar con el siguiente palmar, a los que se les informó del interés de desarrollar el proyecto en ese espacio y presentó una solicitud formal para poder trabajar con los ejemplares existentes.

Palmar el Quitebe

Ubicado en el municipio de Nunchia, departamento de Casanare - Colombia, la hacienda cuenta con aproximadamente 1500 hectáreas sembradas y cultivadas desde el año 2000. En la Figura 18 se muestra la imagen satelital del cultivo y la distribución del cultivo en esta hacienda.

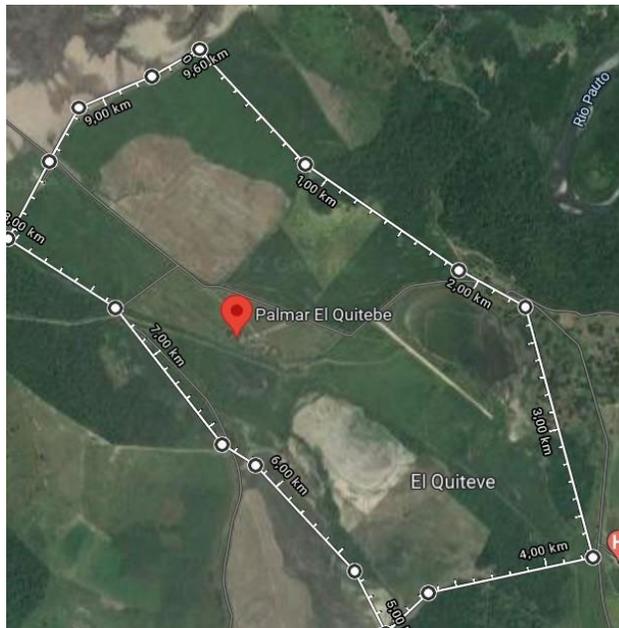


Figura 18. Imagen satelital del palmar el Quitebe.

5.3 MARCO NORMATIVO

- ISO 11228: Normas técnicas sobre manipulación, empuje, tracción y movimientos repetitivos de las cargas. En estas normas se realizan las recomendaciones en las diferentes formas de manipulación de cargas como la tracción, empuje, transporte, levantamiento, frecuencias y tiempos de transporte para pequeñas cargas, esta aplicación está diseñada en la evaluación de movimiento con objetos de 3kg con jornadas de 8 horas, por lo que se traduce en una aplicación adecuada para los diferentes procesos suministros.
 - ISO 11228-1: Esta parte proporciona directrices para la evaluación de la carga física que enfrentan los trabajadores durante el trabajo, específicamente en términos de levantamiento, transporte y descarga de cargas. También se incluyen recomendaciones para la evaluación de la postura y los movimientos repetitivos.
 - ISO 11228-3: Esta parte se enfoca en la evaluación de la carga física que enfrentan los trabajadores durante el trabajo en posición de pie. Se

proporcionan directrices para evaluar la carga en los pies, las piernas, la parte inferior de la espalda y los brazos, así como para la postura de pie y los movimientos repetitivos.

- ISO/TR 12295:2014 proporciona orientación sobre la evaluación y selección de equipo de protección personal (PPE, por sus siglas en inglés) para la cabeza en el lugar de trabajo. PPE se refiere a cualquier equipo o dispositivo diseñado para proteger al usuario contra riesgos que puedan amenazar su salud o seguridad.
- La norma ISO 6385:2016 establece principios ergonómicos para el diseño de sistemas de trabajo, con el objetivo de mejorar las condiciones laborales y la eficiencia productiva en diferentes campos, incluyendo el sector rural. Esta norma proporciona una perspectiva global que considera las necesidades humanas, sociales y técnicas, con el fin de obtener resultados que optimicen las condiciones laborales, la salud y la seguridad de los trabajadores.

En el caso específico del sector de la agroindustria de la palma, la aplicación de los principios ergonómicos establecidos en la norma ISO 6385:2016 puede ayudar a mejorar la eficiencia productiva y tecnológica sin sacrificar la seguridad y salud del personal. Al optimizar los recursos y mejorar las condiciones laborales, se pueden lograr resultados positivos en términos de productividad y rentabilidad para las empresas del sector.

- ISO 26800:2011 proporciona un marco general para que las organizaciones mejoren su desempeño, reduzcan riesgos e incrementen su eficiencia y efectividad.
- NTC 5693-1. Ergonomía, manipulación manual, levantamiento y transporte manual de cargas Cuyo objetivo es especificar límites para el levantamiento y transporte manual incluyendo variables de intensidad, duración y frecuencia de la tarea, permitiendo evaluar riesgos para la salud del trabajador y evitar lesiones y alteraciones osteomusculares, aplicable en los aspectos manuales de transporte y levantamiento para el sector en cuestión.
- NTC 5693-2. Ergonomía, manipulación manual empujar y halar Presenta los lineamientos para límites recomendados de halar y empujar con todo el cuerpo,

ofreciendo una guía para la evaluación de factores de riesgo importantes al realizar estas actividades y permite seguimiento con evaluación de riesgo para la salud de la población trabajadora.

- NTC 5693-3. Ergonomía, manipulación de cargas livianas a alta frecuencia. En la que se establece los lineamientos para las recomendaciones ergonómicas en tareas con trabajos repetitivos en donde la manipulación de cargas livianas tenga alta frecuencia permitiendo reducir del riesgo por trabajo repetitivo y optimizar el proceso productivo, norma que aplica para todo el trabajo repetitivo de siembra y recolección de frutas para el sector objeto de estudio.
- a. Peso o Masa del Objeto (Peso permisible a manipular)
 - Una persona: Hasta 25 kg (hombre).
 - Hasta 12.5 kg (mujer).
 - Dos personas: 24 a 33 kg (2/3 de la suma de sus capacidades individuales).
 - Tres personas: 34 a 37 kg (mitad de la suma de sus capacidades individuales)Manejo Mecánico: Superior a 37 kg.

Lo anterior aplica teniendo en cuenta que la manipulación manual de cargas se realiza en condiciones ideales como:

- Que la carga no se levante con una sola mano, sentado o arrodillado.
 - Que no sean objetos fríos, calientes o sucios.
 - Que el levantamiento no se haga en forma brusca o rápida.
 - Que no sea una carga inestable.
- NTC 5655. Principios para el diseño ergonómico de sistemas de trabajo. Establece principios básicos para orientar diseños en ergonomía en las áreas de trabajo buscando una aproximación en los diferentes aspectos involucrados de este, como el humano, técnico y social, a manera que el diseño garantice la eficiencia y seguridad del trabajador en cuestión, siendo esta homologada a las ISO internacionales y logrando de esta manera una mayor tecnificación y productividad cuando se aplican de manera adecuada en el sector agroindustrial.

5.4 ESTADO DEL ARTE

Como se mencionó anteriormente, los avances tecnológicos en la asistencia para la polinización de la palma de aceite en híbridos interespecíficos es muy limitada debido principalmente a la dificultad de el uso de la tecnología en un entorno hostil, sumando a esto la altura de la planta, la disposición de los frutos en la corona y las condiciones del terreno, aun así, existe un desarrollo en Colombia que intenta mejorar el sistema: la Universidad de Santander (UDES) lidera proyecto de co-creación de un nuevo dispositivo de polinización de palma de aceite, figura 19, el cual mejora el sistema para la polinización de hormonas y polen de presentaciones en polvo mediante un sistema de control que espolvorea de forma más eficiente la sustancia sobre la inflorescencias, de igual forma cuenta con una boquilla mejorada para mayor precisión y un diseño ergonómico a base de aluminio y correas para la parte eléctrica que disipa la hormona (Farfán, 2021).



Figura 19. Dispositivo para polinización de palma de aceite desarrollado por la UDES (Farfán, 2021).

Teniendo en cuenta que el anterior desarrollo no soluciona la pregunta problema, se continúa presentando una revisión bibliográfica de dispositivos que pueden servir al propósito del proyecto. La tecnología telescópica es una forma eficiente y adaptable a muchos entornos para tareas que requieren asistencia en trabajos de altura, como lo son los sistemas telescópicos manuales portar cámaras utilizadas para filmación; este desarrollo presenta una solución interesante, figura 20, para la problemática de llegar a alturas de 10 metros y ser manipulable cargando un objeto en la punta de este (Chicaiza y Guerrero, 2016).



Figura 20. Dispositivo telescópico manual para porte de una cámara (Chicaiza y Guerrero, 2016).

Otro de los ejemplos de las múltiples aplicaciones que tienen los dispositivos telescópicos en diferentes campos, es en el uso en mecanismos de transporte de puentes, el cual incluye diferentes módulos que tienen la capacidad de moverse en las direcciones X, Y y Z (Jik Lee et al., 2012). Este mecanismo consta de una viga, un carro, un set de tubos telescópicos y sus correspondientes módulos auxiliares como es posible observar en la figura 21. Estos módulos se componen de un sistema de administración de cables de señal y energía, un equipo de manejo remoto, un troquel y una grúa de elevación. El anterior trabajo fue patentado y demuestra un claro ejemplo de cómo los dispositivos telescópicos disminuyen drásticamente los problemas de seguridad al operar con cargas pesadas transportadas por metros a su posición final. Este caso puntual tiene la ventaja de que todo el sistema se opera de manera remota, asegurando el menor impacto posible en la seguridad de los operarios. (Fan et al., 2004)

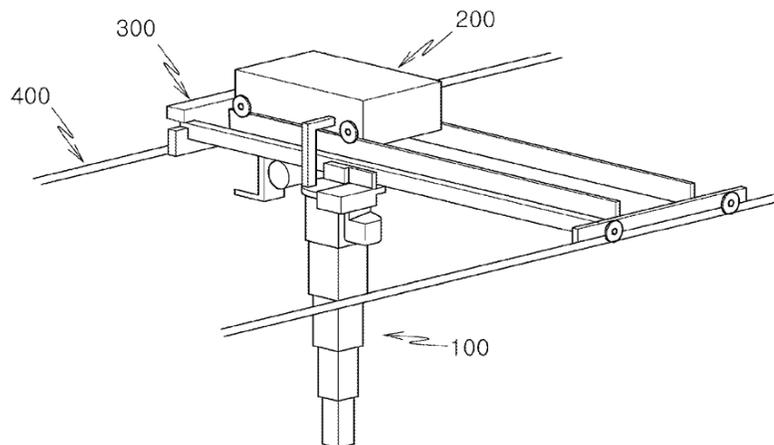


Figura 21. Sistema de transporte telescópico convencional (Fan et al., 2004)

Por otra parte, los dispositivos telescópicos se han usado más frecuentemente dado no solo a las diferentes longitudes que son posibles de alcanzar sino también que gracias a su diseño modular tienen una gran resistencia a diferentes tipos de cargas. Un claro ejemplo de ello es el diseño realizado por Movrem M. y Spier C., de un mástil tubular telescópico en Astro Aerospace - Northrop Grumman Aerospace Systems, figura 22, el cual ha tenido varias aplicaciones como el telescopio James Webb. Este sistema está compuesto por una serie de tubos de gran diámetro que se despliegan y retraen mediante un mecanismo extensible tubular almacenable prestando especial atención a la rigidez y sus frecuencias desplegables, variables que son de especial importancia en aplicaciones espaciales.

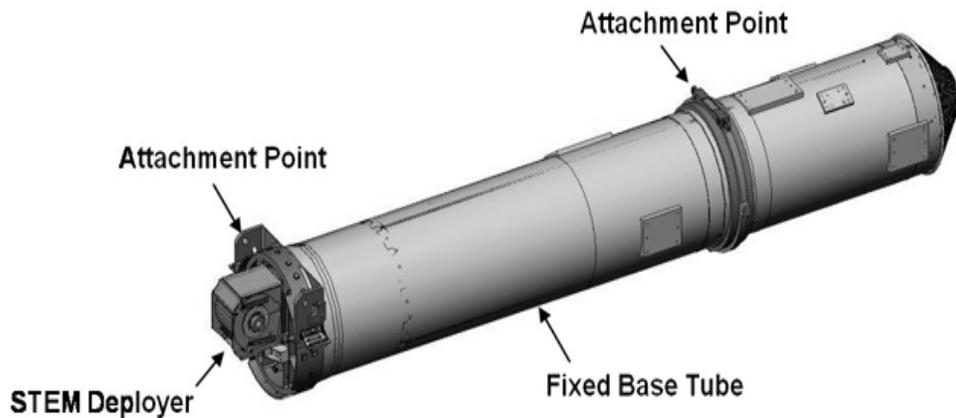


Figura 22. Mástil Tubular Telescópico. (Mobrem, M., & Spier, C., 2012)

VI. METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrolló bajo la metodología de división por fases, cada una se compone de un conjunto de actividades tecnológicas que permiten alcanzar los objetivos previamente establecidos. Para comenzar, se realizó una caracterización de las palmas del híbrido OxG (*Elaeis guineensis* x *Elaeis oleífera*). El objetivo de esta caracterización fue evaluar el entorno donde se implementó el prototipo, la disposición de las palmas en un cultivo, los obstáculos presentes y los requerimientos específicos que se deben tener en cuenta para la elaboración del prototipo. Esta caracterización fue de gran importancia para entender las condiciones en las que se llevaría a cabo la polinización de las palmas y como se debía diseñar el prototipo para adaptarse a estas condiciones.

6.1 LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS

6.1.1 Requerimientos funcionales

- El prototipo debe tener la capacidad de asperjar ANA-mezcla líquida en una proporción de 1:17 (ANA-Agua) sobre las inflorescencias de la palma en alturas entre 3m a 12m.
- El prototipo debe asperjar la cantidad de 150cc (187g) de ANA-mezcla líquida por inflorescencia, llevar un tanque de mínimo 20 L con una solución para polinizar de forma eficiente en una concentración de 1200 ppm. (García et al., 2010).
- El prototipo debe asistir al operario en el proceso de polinización de forma segura y eficiente.
- El prototipo debe tener un sistema de elevación con la capacidad de superar los obstáculos del tronco y hojas de la palma, manteniendo la estabilidad del prototipo.
- El prototipo debe contar con un sistema de aspersion líquida conectado con el sistema de elevación, que permita llevar el líquido a la altura de la inflorescencia de forma constante.
- El prototipo debe ser de operación manual.

- El prototipo debe estar equipado con una bomba que eleve la mezcla para realizar la polinización con la presión adecuada.
- El prototipo debe ser modular; adaptable a diferentes diámetros y alturas según sea su modo de elevación.

6.1.2 Requerimientos de restricción

- El prototipo no puede ser evaluado agrónomicamente (porcentajes de fertilización, cuajado de frutos, peso de racimos) por delimitación del alcance de tiempo.
- El costo de fabricación del prototipo no debe ser mayor al presupuestado en los Anexo 1, Tabla 1.
- El prototipo no debe afectar estructuralmente la palma de aceite.
- El prototipo únicamente podrá ser evaluado en cuadras del cultivo y palmas debidamente podadas.
- El prototipo no podrá operar en tiempo de lluvia dado que el sistema eléctrico no estará diseñado con protección IP.
- El prototipo será evaluado en el híbrido *Elaeis guineensis x Elaeis oleífera* (OxG), en el *Elaeis oleífera* o *Elaeis oleífera jacq* dada su semejanza estructural.
- El prototipo no debe implicar al operario la carga de un peso mayor a 30 kilogramos, peso de las actuales herramientas polinización.

6.1.3 Requerimientos de calidad

- Los componentes del prototipo deberán ser seleccionados teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas mencionadas en el marco geográfico.
- Debe tener un método de desmonte manual para ser retirado en caso de bloquearse o apagarse.
- Debe tener un sistema de ajuste para el tubo telescópico, cuya longitud recogida sea máximo 6 metros dada la disposición de las palmas en las cuadrillas de la plantación.
- Debe tener un interruptor para su control de prendido y apagado.
- Asegurar que el dispositivo cumpla con todas las normas de seguridad aplicables.
- El prototipo debe tener la capacidad de asperjar ANA líquido en mínimo un área de 0.12m² metros cuadrados.

6.1.4 Requerimientos del usuario

- Para el uso del dispositivo el operario debe realizar una capacitación.
- Proporcionar una guía de usuario fácil de entender y seguir que describa los procedimientos de uso y mantenimiento.

6.2 FASES DEL PROYECTO

El propósito final de cada fase del proyecto es cumplir con los requisitos de los objetivos previamente definidos siguiendo una serie de actividades, teniendo en cuenta los requerimientos previamente expuestos. Cada una de las fases depende de la inmediatamente anterior, siendo de esta manera seguir cronológicamente las actividades para dar poder de esta manera desarrollar las actividades futuras que, en conjunto, da cumplimiento al objetivo en su totalidad.

6.2.1 Fase 1: Diseño del prototipo

Esta primera fase se desarrolló en torno a dar cumplimiento al primer objetivo propuesto “Diseñar un prototipo telescópico lineal con ajuste manual para asistir la polinización en palmas de aceite híbrido *Elaeis guineensis* x *Elaeis oleífera* (OxG).” Para ello se exponen las actividades realizadas para poder obtener el diseño detallado, el cual es la finalidad de este primer objetivo.

A. Levantamiento de información de las palmas del híbrido OxG (*Elaeis guineensis* x *Elaeis oleífera*) mediante visita al palmar

Para comenzar, se llevó a cabo el levantamiento de información de las palmas del híbrido OxG (*Elaeis guineensis* x *Elaeis oleífera*). Se evaluó la morfología de las palmas a través de un protocolo estandarizado para poder caracterizarlas y clasificarlas según diferentes criterios, como su tamaño, especie y diámetro de tronco. De esta forma, se logró segmentar un primer grupo de palmas en base a su estado y necesidades específicas. Además, se tomó nota de las condiciones del terreno, las prácticas de manejo del cultivo y la polinización. Se pretende entablar una conversación con los trabajadores e ingenieros a cargo para conocer más sobre las problemáticas que enfrentan en el proceso de polinización y las estrategias que

utilizan para abordarlas en el campo. Con esta información, se tomaron decisiones informadas y eficientes para mejorar optimizar los procesos de polinización en el híbrido OxG.

B. Diseño de alto nivel y Bocetos

Gracias a los requerimientos planteados anteriormente, la revisión bibliográfica realizada y la visita a los palmares, se realizó una serie de propuestas por medio de una lluvia de ideas, de las cuales surgieron distintos bocetos aterrizados del sistema telescópico de elevación y de aspersión los cuales se plasmaron y evaluaron por medio de la construcción de dichas ideas en un modelo asistido por computadora (CAD), haciendo posible ver de esta manera sus ventajas y desventajas y posibles mejoras. Por otra parte, se explica el paso a paso de su funcionamiento para realizar la labor de polinización, sus grados de libertad de movimiento y su movilización por el palmar.

Diagrama de caja negra y Caja gris

- **Caja negra**

El diagrama de caja negra es una herramienta utilizada en ingeniería para representar el comportamiento de un sistema sin mostrar sus detalles internos omitiendo los procesos que se llevan a cabo y teniendo en cuenta únicamente las entradas al sistema como la salida del proceso de polinización asistida en los híbridos de palma de Aceite.

Esta es una herramienta sumamente importante en la ingeniería debido a que permite representar de manera sencilla el comportamiento de un sistema sin tener que conocer los detalles de su funcionamiento interno. (Kaner, C., & Bach, J., 2018)

- **Caja gris**

El diseño de un diagrama de caja gris es un proceso en el que se representa el comportamiento de un sistema en el que se conocen algunos de sus procesos internos. En este caso se evalúan las ya conocidas entradas y salidas, así como también los procesos que tiene cada una de las entradas para poder llegar a la salida, que en este caso es la polinización de las inflorescencias de la palma de aceite.

Para el diseño del diagrama de caja gris, se siguen los siguientes pasos:

Identificación de las entradas y salidas del sistema; se determinan cuáles son las entradas y salidas del sistema. Las entradas son los estímulos que recibe el sistema, mientras que las

salidas son las respuestas que da el sistema. También se identifican aquellos detalles internos del sistema que se conocen. Como paso siguiente se representa en el diagrama de caja gris los detalles internos del sistema que se conocen. Estos detalles se presentan como bloques con entradas y salidas, así como también los detalles internos del sistema que se desconocen como bloques sin entradas y salidas. La conexión de los bloques se debe realizar de manera que las entradas y salidas estén correctamente relacionadas entre sí. Para finalizar se valida el diagrama para asegurarse de que representa correctamente el comportamiento del sistema. (Kaner, C., & Bach, J., 2018)

Es importante destacar que el diseño de un diagrama de caja gris es un proceso iterativo en el que se pueden revisar los detalles internos conocidos y desconocidos del sistema para hacer ajustes en el diseño del diagrama y mejorar su representación del comportamiento del sistema.

C. Selección diseño del sistema telescópico mediante matriz de decisión

Para esta selección, se escogieron los diseños de bocetos más acordes con la problemática del proyecto mediante el uso de matrices de decisión de la metodología Proceso de Análisis Jerárquico (Jiménez, 2002), que se evaluarán en términos de cumplimiento de requerimientos.

- **Analytic Hierarchy Process (AHP)**

El proceso análisis jerárquico (AHP) es una metodología matemática utilizada para la toma de decisiones en situaciones complejas y multi-criterio. El AHP fue desarrollado en la década de 1970 por el matemático estadounidense Thomas L. Saaty, y se utiliza ampliamente en campos como la planificación empresarial, la ingeniería, la gestión de proyectos y la toma de decisiones en general. Para esto, se realiza la clasificación de diferentes opciones según su importancia gracias al establecimiento de criterios de decisión. Esta metodología de decisión combina matemáticas y psicología para comparar varias opciones y seleccionar la mejor mediante la implementación de la comparación por pares. (Saaty, Y., 2008).

Tabla 3. Escala fundamental de comparación por pares mediante la cual el decisor puede expresar sus preferencias entre dos elementos verbalmente y representar estas preferencias descriptivas mediante valores numéricos. (Saaty, Y., 2008).

VALOR	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importancia que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

El Proceso de Análisis Jerárquico utiliza álgebra lineal para evaluar los resultados de cada comparación por pares. Cada criterio recibe su propio peso de importancia. Cuanto mayor sea el peso, más importante es el criterio para la decisión principal. Esto se logra otorgando pesos a cada criterio de decisión para luego someter las diferentes opciones a evaluar no sin antes realizar las respectivas matrices de correlación las cuales consisten en convertir dichos pesos otorgados en pesos relativos para finalmente normalizarlos. Una vez se obtienen los pesos normalizados de los criterios de decisión, se estructura la matriz de decisión en la cual se digitan los criterios y sus respectivos pesos en las celdas de las filas y las opciones a evaluar en la primera columna como se muestra en la tabla 3. (Ishizaka, A. & Labib, A., 2011)

Por otra parte, para evaluar de manera cuantitativa las diferentes opciones (bocetos) se tiene que otorgar un valor de cumplimiento del criterio a cada opción, para ello se utiliza la escala de cumplimiento establecida por la metodología Proceso de Análisis Jerárquico donde; 0 indica que la opción que está siendo evaluada no cumple con el criterio de decisión formulado (0% de cumplimiento), 0.1 indica que dicha opción cumple ligeramente con el criterio (25% de cumplimiento), 0.5 es que cumple parcialmente con el criterio de decisión (75%) y 1 que la opción cumple con el 100% del criterio de decisión. Una vez se otorguen dichos valores a cada uno de los prototipos a evaluar para cada uno de los criterios de decisión se realiza la suma de dichos puntajes no sin antes multiplicándolos por el peso del criterio para así obtener

un resultado cuantificable, el cual, el más alto es la mejor opción para desempeñar la labor cumpliendo de la mejor manera con los criterios establecidos. De esta manera se puede realizar la elección de la opción a implementar. Para esta etapa de selección se definieron los siguientes criterios de decisión del prototipo telescópico linear:

- Capacidad de llegar a diferentes alturas. (A)

Si bien se sobreentiende que el dispositivo debe llegar hasta una altura de 10 metros, el prototipo debe tener la capacidad de guiar el aspersor en el rango establecido entre los 3 y 10 metros para, de esta manera, polinizar palmas de diferentes tamaños. Esto dependerá de la forma como se guíen los módulos y como los mismos son manipulados.

- Capacidad de evadir posibles obstáculos (B):

La morfología del híbrido interespecífico de la palma presenta diferentes obstáculos tales como los peciolos de las hojas, protuberancias en el tronco de la palma, hojas que dificultan el acceso a los frutos. Es por esto que es necesario tener en cuenta dicho criterio para que el prototipo tenga la capacidad de evadir los obstáculos anteriormente mencionados elevando eficazmente el sistema de aspersión hasta los frutos de la palma a polinizar.

- Grados de libertad de movimiento (C):

Los grados de libertad de movimiento se traducen en la capacidad de este para guiar el sistema de aspersión hasta las inflorescencias de la palma, asegurando que el sistema pueda asperjar el polinizador artificial en cada una de las mismas con una alta eficiencia.

- Facilidad de transporte del prototipo en el palmar (D):

Este criterio surge de la necesidad de facilitar el transporte de los equipos para polinizar a través del palmar dado a las largas distancias y jornadas laborales que se desembocan en afecciones en el sistema musculoesquelético en los trabajadores producto de la carga de los equipos convencionales para realizar la tarea de polinización.

- Ergonomía (E)

La ergonomía que presenta el prototipo es de suma importancia dado que se pretende mitigar las lesiones y afectaciones que presentan los operarios al cargar todas las herramientas y manipular las mismas para realizar la labor de polinizar el híbrido. Principalmente radica en la carga que debe realizar el operario para movilizar y operar el prototipo.

D. Simulación computacional de posibles materiales del prototipo

Para la elección de los materiales del diseño del prototipo, se planteó realizar una serie de simulaciones computacionales en el Software Solidworks versión 2021, en el cual primeramente se efectuarán análisis estáticos de las características mecánicas de los posibles materiales a utilizar en la construcción del prototipo. Para ello se diseñó un modelo 3D de un brazo telescópico modular simple de una envergadura de 20 metros como se muestra en la figura 23.

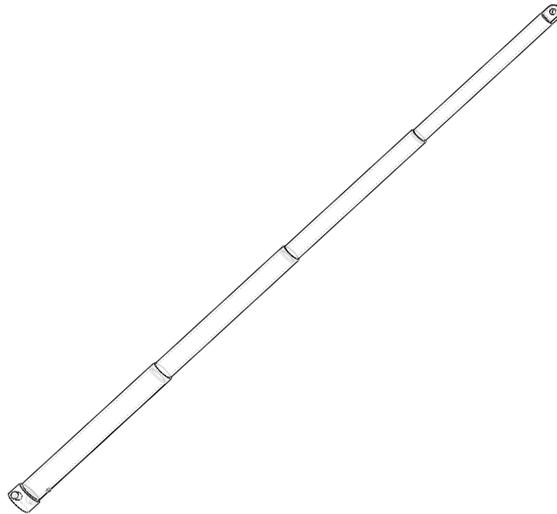


Figura 23. Modelo 3D de un dispositivo telescópico lineal de 4 módulos.

Gracias al software mencionado se puede establecer un material específico al modelo realizado y someterlo a diferentes escenarios donde se podrá analizar los resultados y datos de las simulaciones de tensiones y deformaciones, para evaluar su comportamiento bajo diferentes cargas y condiciones de carga. Este estudio se realizó bajo el escenario de la extensión total del dispositivo debido a que es el momento en el que el material del dispositivo presenta más estrés por las cargas presentes. También, el software mencionado permite la opción de estimar el peso del dispositivo modelado, variable que es fundamental a la hora de realizar la elección del material a usar. (SolidWorks, 2018). Para comenzar, se establece el material que se va a evaluar y se confirman que las propiedades que arroja el software coinciden con las investigadas en la bibliografía. Una vez se establece el material se procede a crear una malla en el prototipo, figura 24, con la finalidad de discretizar la

geometría del modelo en pequeños elementos triangulares. Lo anterior se hace para resolver ecuaciones físicas de manera numérica y obtener de esta manera los resultados del análisis.



Figura 24. Modelo mallado de dispositivo telescópico lineal

Como siguiente paso, se tiene que definir las restricciones de frontera, lo que implica definir las condiciones de apoyo de las partes fijas. En este caso se realiza una geometría fija en la parte inferior del brazo telescópico, lugar donde está anclado y presenta una sujeción fija como se muestra en la figura 25. Esto permite evaluar el modelo simulando una sujeción ya sea de tipo soldadura, un pivote, un eje entre otros.

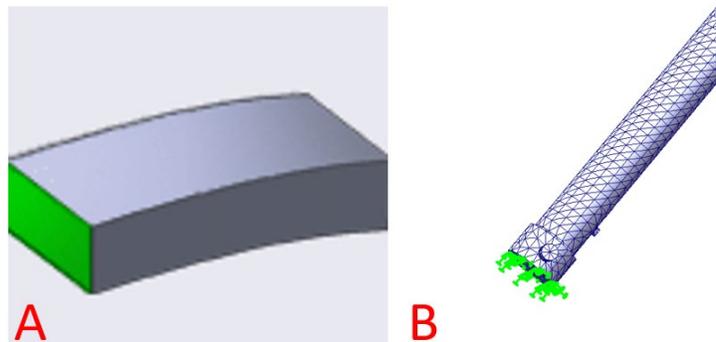


Figura 25. A) Ejemplo de geometría fija de SolidWorks. B) Sujeción para el estudio del dispositivo telescópico lineal.

Como último parámetro a definir antes de realizar el estudio es la definición de cargas y fuerzas. En este modelo en particular se evaluará únicamente la fuerza de gravedad, la cual se encuentra preestablecida en el software, debido a que es la fuerza más importante que

actúa en el brazo telescópico. Para ello se define la dirección de la fuerza de gravedad, posicionando el brazo telescópico a aproximadamente 45° con referencia al suelo (figura 26). Por último, se da la orden al software de iniciar el estudio y posteriormente crear un informe para ver los resultados detallados.

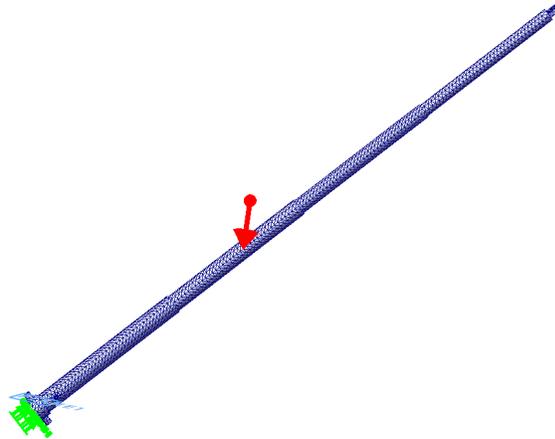


Figura 26. Fuerzas aplicadas al modelo del dispositivo telescópico para su estudio.

E. Selección de materiales del prototipo

Para la selección de los materiales que se utilizarán en el sistema telescópico lineal, se realizó una nueva matriz de decisión bajo la misma metodología de proceso de Análisis Jerárquico expuesta anteriormente, esta vez para determinar los materiales óptimos para la construcción del prototipo teniendo en cuenta como parámetros de selección los resultados de los estudios mecánicos de los materiales realizados en la actividad anterior. Se establecen los siguientes criterios de decisión para la selección del material del prototipo telescópico:

- Resistencia a la deformación (A):

Capacidad del material para resistir deformaciones bajo cargas externas. Este criterio es importante para productos que deben soportar cargas significativas, como estructuras o componentes mecánicos.

- Peso (B):

Masa del material y su importancia depende del tipo de aplicación para la que se esté evaluando. En algunos casos, el peso puede ser un factor crítico en el desempeño del producto, como en el caso de dispositivos portátiles o de vehículos.

- Resistencia a líquidos (C):

Capacidad del material para resistir la penetración de líquidos. Este criterio es importante para materiales que estarán expuestos a líquidos, como en el caso de recipientes o tuberías.

- Facilidad de manipulación (D):

Facilidad con la que el material se puede manipular, ensamblar y desmontar. Este criterio es importante para materiales que deben ser ensamblados o desmontados con frecuencia, como en el caso de dispositivos mecánicos.

- Precio (E):

Costo del material y es un criterio importante para evaluar la viabilidad económica de una aplicación. El precio del material debe ser comparado con su desempeño en la aplicación y con el costo de producción de materiales alternativos o de la competencia.

F. Diseño detallado

Una vez se obtienen los resultados de las matrices de decisión tanto del boceto del modelo del prototipo en general, como del material de construcción para el sistema telescópico, se procede a realizar el diseño detallado del prototipo teniendo en cuenta todos los requerimientos que debe cumplir. Se parte de las especificaciones del sistema, las cuales incluyen los requerimientos técnicos, las especificaciones del material y los estándares de calidad que se deben cumplir. Una vez hecho esto se procede a realizar los diagramas de ingeniería, los cuales se constituyen de planos de la estructura, el diseño del mecanismo telescópico, los componentes eléctricos y electrónicos, y cualquier otro detalle necesario para la construcción del prototipo, así como también una lista completa de materiales necesarios para la construcción del prototipo en la cual se detallan sus especificaciones y cantidades.

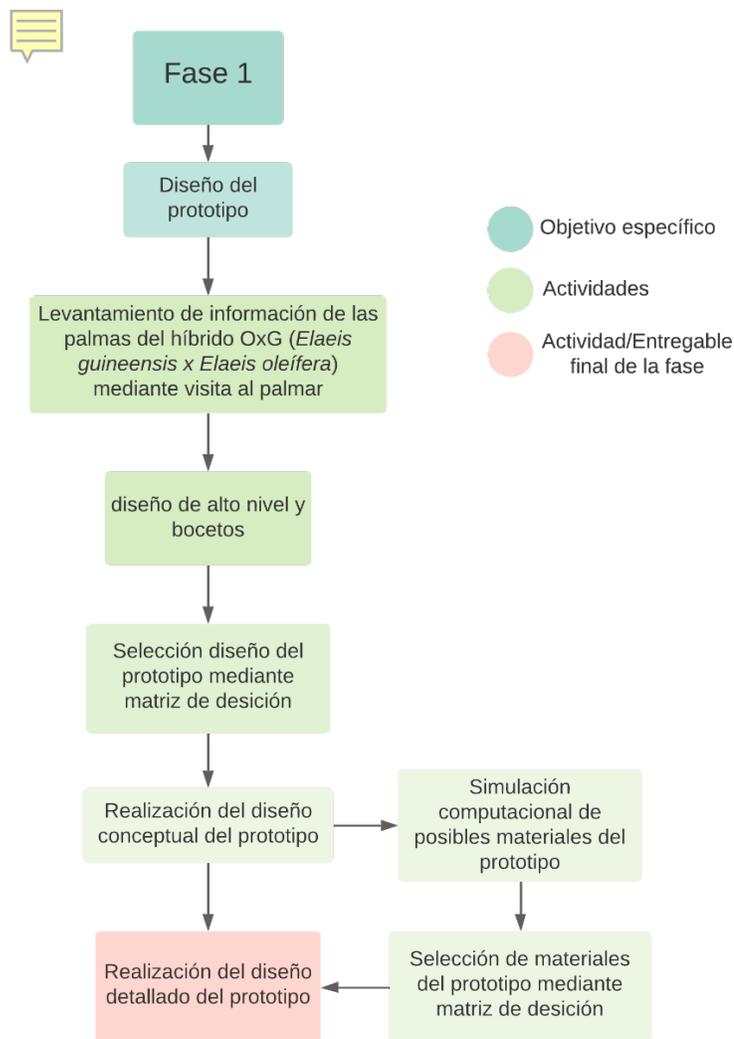


Figura 27. Fase 1 del proyecto; Diseño del prototipo.

6.2.2 Fase 3: Evaluación del prototipo

La segunda fase se desarrollará en torno a dar cumplimiento al segundo objetivo propuesto “Construir de un prototipo telescópico lineal con ajuste manual para la elevación y aspersión del polinizador Ácido Naftalenacético (ANA) en mezcla líquida en las inflorescencias de la palma de aceite en alturas desde 3 a 12 metros”, para ello se realizaron las siguientes actividades:

A. Cotización y adquisición de la lista de materiales para la construcción del prototipo

Para la cotización de los materiales y componentes necesarios para la construcción del prototipo se identifican dichos componentes y materiales realizando una revisión del diseño detallado en donde los planos y diagramas de ingeniería detallados del prototipo

Una vez se obtiene la lista completa de los componentes y materiales necesarios, se realiza la solicitud de cotizaciones a proveedores locales o internacionales con la finalidad de realizar una comparación y selección del proveedor ofrezca el mejor precio y calidad. Otro punto importante es la disponibilidad y los costos de envío en dado caso que se realice la cotización con proveedores internacionales. Por último, se realiza una suma del costo aproximado de todos los componentes y materiales con el fin de comparar y, si es necesario, ajustar para dar cumplimiento al presupuesto del proyecto establecido.

B. Adquisición del ANA

La adquisición del ácido Naftalenacético en presentación líquida se realizó mediante la página de Cenipalma dada la disponibilidad y calidad del producto.

C. Ensamblaje del prototipo

El proceso de construcción del prototipo se llevará a cabo en la ciudad de Yopal, con el acompañamiento de forma virtual del profesor Miguel Montoya en cada paso del proceso, donde se ensamblará el sistema telescópico lineal del prototipo, teniendo como guía los planos detallados y el diagrama electrónico del mismo realizado en la fase anterior. Para ello se tendrán en cuenta los requerimientos pertinentes para este sistema. Se realizarán las diferentes uniones soldadas del prototipo con un profesional al cual se le entregarán los planos y diagramas.

D. Evaluación preliminar del funcionamiento de los componentes del sistema

La evaluación preliminar del funcionamiento de los componentes del prototipo se realiza con el único objetivo de asegurar el buen funcionamiento de cada componente de manera individual antes de la puesta en marcha de todo el mecanismo. Esta evaluación se realiza tanto a los componentes mecánicos; brazo telescópico, llantas, bisagras, ejes y contrapesos, como también a los componentes electrónicos como las baterías, el switch y el pulsador.

Gracias a esta evaluación se garantiza el correcto funcionamiento de los componentes y el visto bueno para poder avanzar a la siguiente fase donde se desarrolla una evaluación de los componentes en conjunto bajo diferentes condiciones.

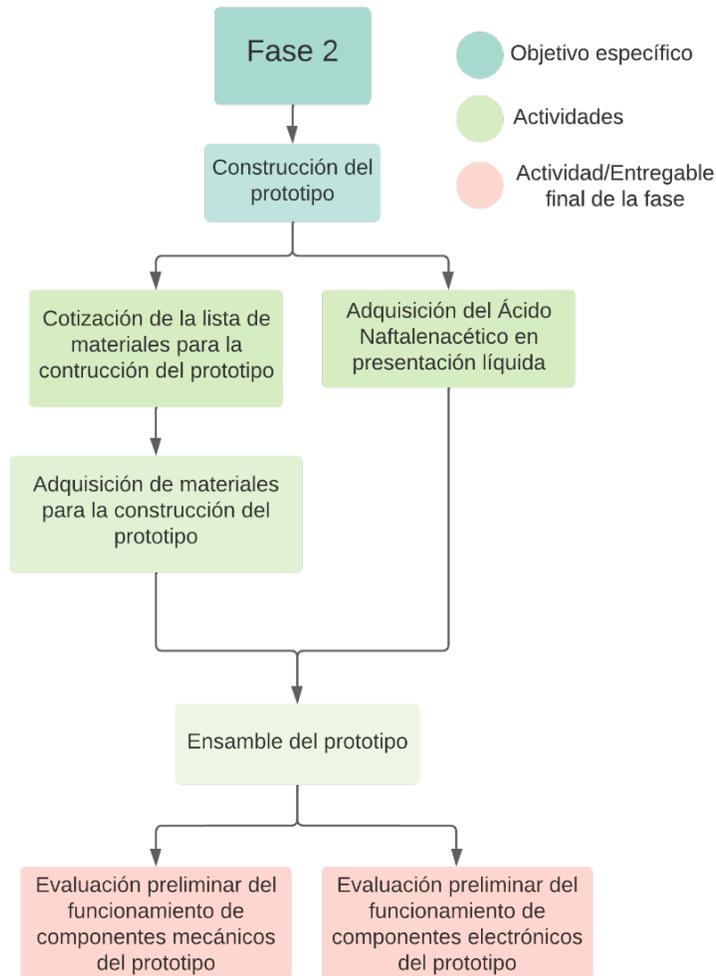


Figura 28. Fase 2 del proyecto; Construcción del prototipo.

6.2.3 Fase 3: Evaluación del prototipo

La tercera fase se desarrollará en torno a dar cumplimiento al tercer objetivo propuesto “Evaluar el tiempo requerido por el prototipo en polinizar 20 inflorescencias del híbrido *Elaeis guineensis* x *Elaeis oleífera* (OxG) y compararlo frente al tiempo empleado con técnicas convencionales y de polinización usando ANA líquido en un grupo de palmas de la misma edad.”, siguiendo las siguientes actividades:

A. Capacidad de ascender y descender y aspersión de ANA.

Las siguientes pruebas tienen como objetivo asegurar la capacidad del prototipo telescópico para ascender a diferentes alturas y asperjar ANA en presentación líquida. Para ello se establecen dos escenarios; un lugar controlado donde se miden alturas de 3, 6, 9 y 12 metros y se pone a prueba el prototipo para que en cada una de esas marcas de alturas pueda realizar la aspersión del líquido sin inconvenientes. Dichas alturas se establecen gracias a la categorización de las palmas realizada en la fase de diseño.

Para ello se posicionará el prototipo perpendicularmente a las marcas de dichas alturas. El operario libera y posiciona el brazo telescópico para ser extendido a la longitud deseada para llegar a las marcas de altura. Una vez la punta del brazo, la cual contiene el aspersor, alcance la altura, el operario oprime el pulsador con su mano libre para activar la bomba, la cual se encargará de llevar el líquido desde los contenedores hasta el aspersor. Una vez verificado el funcionamiento de los mecanismos tanto mecánicos como eléctricos y finalmente contraer los módulos del brazo telescópico. Este ejercicio se realizó un total de tres veces por cada altura mencionada para verificar el correcto comportamiento y funcionamiento de los sistemas tanto mecánicos como eléctricos del prototipo. En la figura 29 se puede ver el paso a paso de la prueba anteriormente mencionada.

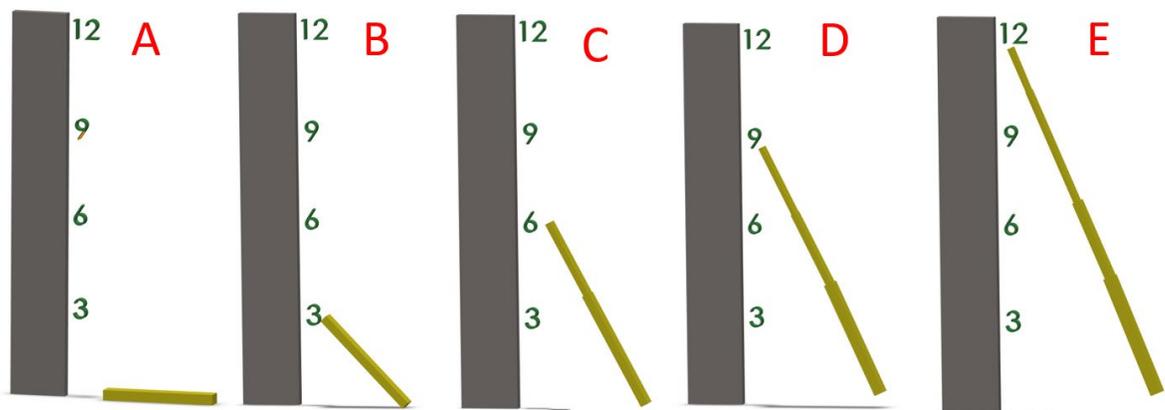


Figura 29. Ejemplo de pruebas de ascenso del dispositivo telescópico en lugar controlado.

Por otra parte, para las pruebas realizadas en campo (en el palmar), se realizó una serie de 3 pruebas en cada una de las categorías de las palmas (A, B y C). Para ello se transportó el dispositivo telescópico a cada uno de los ejemplares de cada una de las categorías para posteriormente identificar donde se encontraban las inflorescencias de cada uno de los

ejemplares. Una vez identificadas las inflorescencias, se asegura y se inclina el brazo telescópico para posteriormente extender sus módulos hasta alcanzar las inflorescencias de la palma. Posteriormente el operario activará la bomba mediante el uso del pulsador, que mantendrá oprimido hasta que el líquido llegue al aspersor y cubra las inflorescencias. El operario tuvo que guiar manualmente el brazo telescópico a todos los racimos presentes en la palma. Una vez se logre polinizar la palma con el Ácido, el operario detendrá la bomba, contrajo los módulos del brazo telescópico que finalmente asegurará. Al finalizar, llevará el dispositivo hasta el siguiente ejemplar, para repetir el procedimiento. Este proceso se puede detallar visualmente en la figura 30.

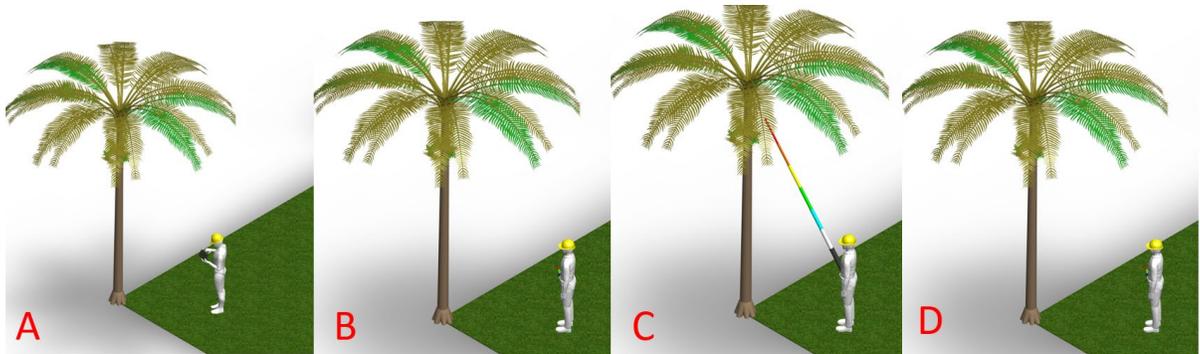


Figura 30. Paso a paso prueba de ascenso y aspersión en campo

Otra de las pruebas de control realizadas es la de cobertura de aspersión. Para ello se establece una cobertura mínima en metros cuadrados. Gracias al levantamiento de información realizado en la visita técnica se tomó la medida tanto el largo como el ancho de un total de 50 racimos de los ejemplares con el fin de identificar tanto el promedio como el máximo de los datos. Gracias a los datos recolectados en campo de las medidas de los racimos, se pudo establecer el requerimiento mínimo de cobertura del sistema de aspersión para cubrir la totalidad del área planteada de los racimos de la palma de aceite.

Para identificar el área de cobertura del aspersor se extendió la manguera en su totalidad, logrando una longitud de 12 metros, siendo el escenario de mayor esfuerzo requerido por la bomba para lograr la presión suficiente para llevar el líquido desde el contenedor hasta el aspersor. En una cartulina blanca se realizó un plano de 1.4m^2 , con marcas cada 10 centímetros en el eje X y Y. Esta cartulina se colocó en el piso y el aspersor en la mitad del primer vértice, cuya posición en el plano corresponde en (0,0). Una vez se fijó la manguera,

para evitar su movimiento por la presión, se encendió la motobomba accionando el pulsador. Una vez se activó el mecanismo, se dejó en funcionamiento durante 20 segundos, asegurando una presión constante. El líquido, previamente tintado para una mejor visibilidad, se impregnó en la cartulina, se realizó la medición del área de cobertura identificando las marcas en los lugares en que se tintó la cartulina y se comprobó si cubría el área mínima de aspersión requerida. En la figura 31 se muestra el paso a paso de la prueba de cobertura. Por otra parte, también se identificó el ángulo de aspersión de la boquilla para ser comparado con lo especificado por el proveedor.

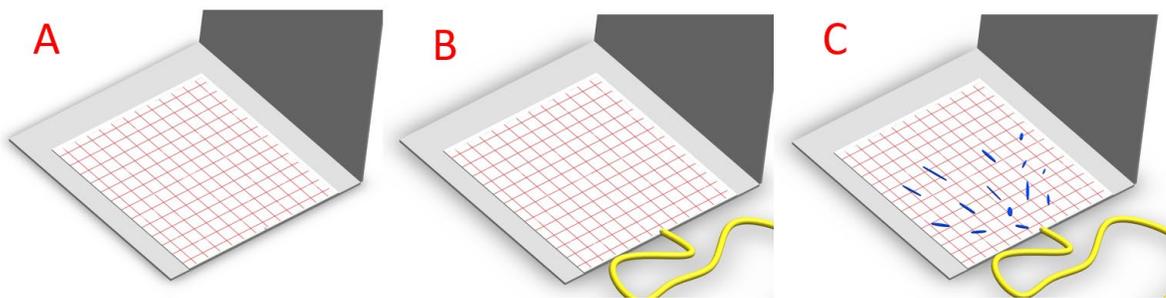


Figura 31. Paso a paso prueba de cobertura de aspersión.

Por último, se realizó una prueba de adaptabilidad del carro transportador en el terreno irregular del palmar. Para ello se llevó el prototipo con su capacidad máxima de carga del líquido y se recorrió una distancia de 200 metros pasando por las diferentes cuadrillas y asegurando su capacidad de movilidad al ser traccionado por un operario.

B. Tiempos de ascenso, descenso y aspersión de ANA en un ejemplar de OxG.

Para la evaluación del tiempo del prototipo en polinizar se toma en cuenta el tiempo individual que le toma al operario polinizar un ejemplar, una cuadrilla y 22 ejemplares, esto con la finalidad de comparar los tiempos con los métodos tradicionales debido a que es la cantidad de polinizador que lleva un operario en un contenedor de espalda en el método actual. Para ello se realizan los pasos descritos anteriormente en la figura 30.

La polinización de las palmas con el prototipo se realiza por cuadrillas, es decir en un total de 4 ejemplares, de esta manera se logra una mayor eficiencia en el tiempo de polinización debido a que el operario realiza la extensión del brazo telescópico una vez y luego mueve el carro transportador con el brazo extendido a las otras 3 palmas que conforman la cuadrilla para asperjar el líquido polinizador. El proceso anterior se describe visualmente en la figura

32, donde se logra apreciar la distribución de palmas por cuadrillas y el paso a paso para ser polinizadas. Estos tiempos se registraron por un observador, quien posteriormente depositó los datos en una tabla de Excel para posteriormente ser comparados.

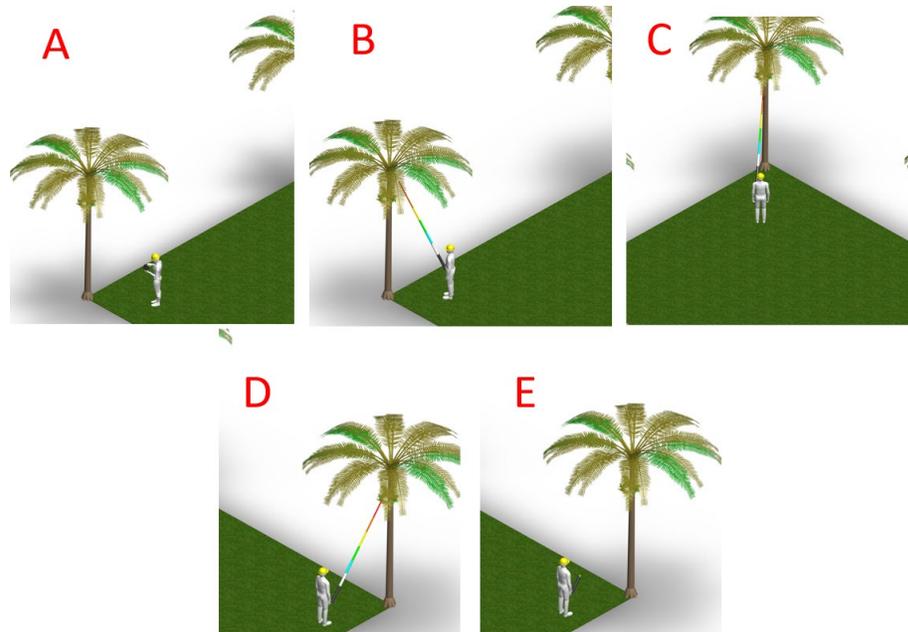


Figura 32. Paso a paso polinización de palmas en una cuadrilla.

C. Comparativa de alcance, tiempo y rango de aspersion entre método tradicional y prototipo telescópico lineal.

Estas comparaciones se realizaron gracias a la información recolectada en dos jornadas diferentes de polinización. En la primera jornada se realizó el acompañamiento a los operarios, quienes realizaron la polinización de los ejemplares OxG en anthesis con el método tradicional de esta labor. Se registró el tiempo que le toma al operario lograr polinizar un ejemplar, una cuadrilla y 22 ejemplares. Estos datos se depositaron en la tabla 3 del anexo 1. La segunda jornada se realizó a los 7 días de la primera jornada, debido a que es el tiempo dictado para realizar la segunda aplicación del ácido para una correcta polinización. En esta jornada el operario realizó la polinización de estos 22 ejemplares previamente marcados en la primera jornada, con el fin de evaluar el tiempo por ejemplar, por cuadrillas y por viaje con el prototipo de brazo telescópico en las mismas palmas que en la primera jornada. De esta manera se garantiza que el tiempo registrado será evaluado en las mismas condiciones que en la primera jornada. Estos datos se depositan en una tabla de Excel que posteriormente

y junto con la tabla de los tiempos de la primera jornada se grafican de manera que se pueda analizar qué método logró ser más eficiente en términos de tiempo de polinización.

En cuanto al rango de cobertura, se realizó una prueba con la bomba fumigadora de espala (herramienta usada en el método actual de polinización), en las mismas condiciones en las que se realizó la prueba del rango de cobertura del aspersor del prototipo telescópico. Para ello se realiza una tinción en el líquido de la fumigadora de espala y se asperja en una cartulina previamente marcada como se muestra en la figura 33. Una vez se logre identificar las marcas en la cartulina se realizará la medición y posterior cálculo del área de aspersion, el cual se comparará junto con el obtenido por el aspersor del brazo telescópico y analizará cual tiene una mayor cobertura de aspersion en términos de metros cuadrados.

Una vez se conocen los resultados de cada una de las pruebas se realiza una comparación descriptiva realizando un tratamiento estadístico de los datos que permitieron conocer aspectos como el promedio del tiempo neto de polinización, tiempo de movilización entre ejemplares y de área de cobertura, permitiendo de esta manera identificar el método más eficiente en realizar la labor en términos tanto de tiempo como de área de cobertura.

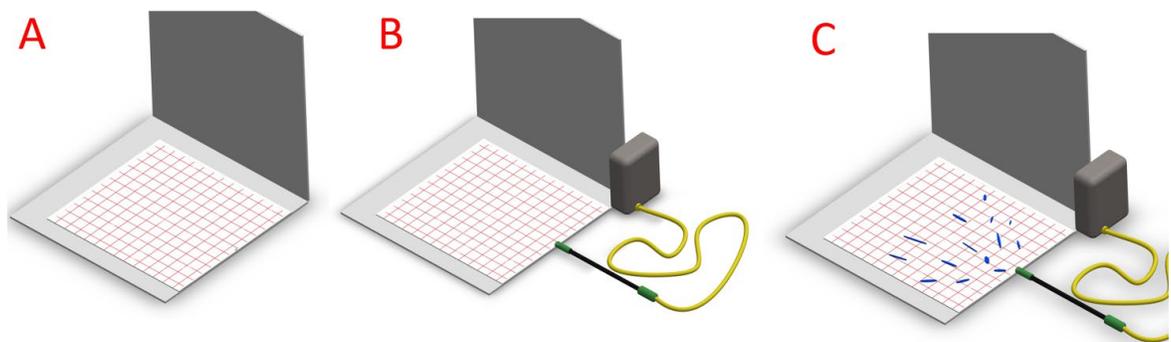


Figura 33. Paso a paso prueba de cobertura de aspersion de la fumigadora de espalda de polinización.

D. Propuesta de mejora en el diseño del prototipo.

Gracias a los diferentes resultados observados de las pruebas realizadas tanto en campo como en lugar controlado fue posible identificar posibles aspectos de mejora para ciertos mecanismos y componentes de prototipo. Para ello se analiza cada uno de los sistemas del prototipo (sistema de aspersion, sistema electrónico, carro transportador, brazo telescópico y eje de rotación) y se identifican las posibles mejoras que podrían incrementar el desempeño

del prototipo en la labor de polinización. Una vez fueron identificadas los sistemas a mejorar se realiza un rediseño del prototipo donde se implementan nuevos componentes. Este se realizó mediante varios diseños asistidos por computadora (CAD), cálculos, simulaciones y pruebas electrónicas en el software Proteus. Finalmente se nombraron los factores que mejoraron gracias al nuevo diseño.

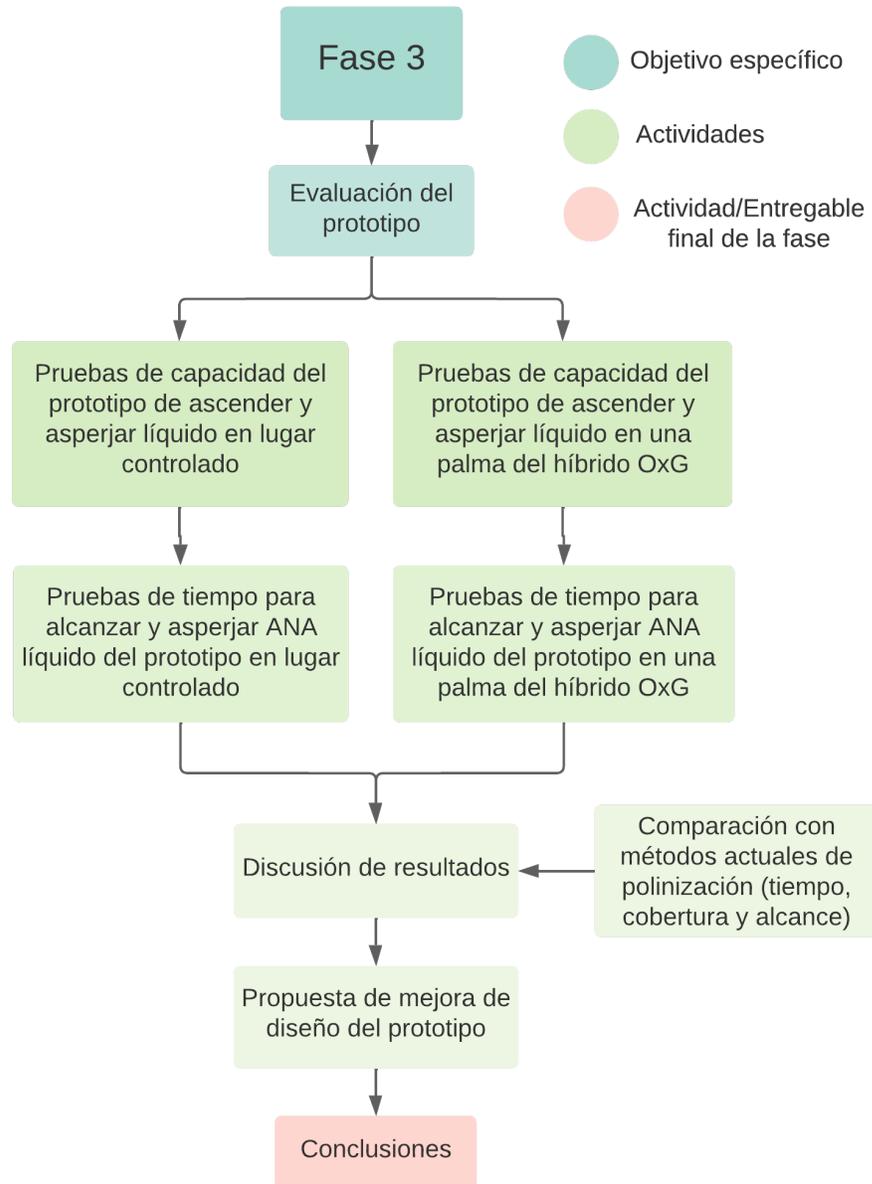


Figura 34. Fase 3 del proyecto: Evaluación del prototipo.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 FASE 1: DISEÑO DEL PROTOTIPO

A. Levantamiento de información de las palmas del híbrido *Elaeis guineensis* x *Elaeis oleífera* (OxG) mediante visita al palmar

Como resultado de esta exploración se tiene la caracterización de las palmas en base a su altura. Es posible caracterizar las plantas en tres categorías basadas en la altura de la palma. La categoría A, muestra palmas con altura menor a 5 metros, la categoría B palmas con altura entre 5-10 metros, y por último la categoría C, ejemplares con altura superior a 10 metros. Esto resulta muy importante dado que la morfología de la planta en cada categoría es muy diferente la parte del tallo, entre más pequeña es, más robusto es el mismo y tiene mayor cantidad de ápices de hojas caídas, sin embargo, a medida que crece las mismas suelen caerse, esto es de vital importancia si lo que se pretende es hacer un dispositivo que ascienda por el tallo.

- **Palmas inferiores de 5 m (Categoría A)**

Las plantaciones inferiores a los 5 metros (figura 35) se caracterizan por su diámetro ancho y por su cobertura externa y hostil formada por la base de las hojas que se van cortando o cayendo, esta población es muy importante dado que es la más joven del palmar y la más numerosa, sin embargo, dada su corta altura los trabajadores comentaron que no tenían mayores problemas para polinizar ni para cosechar.

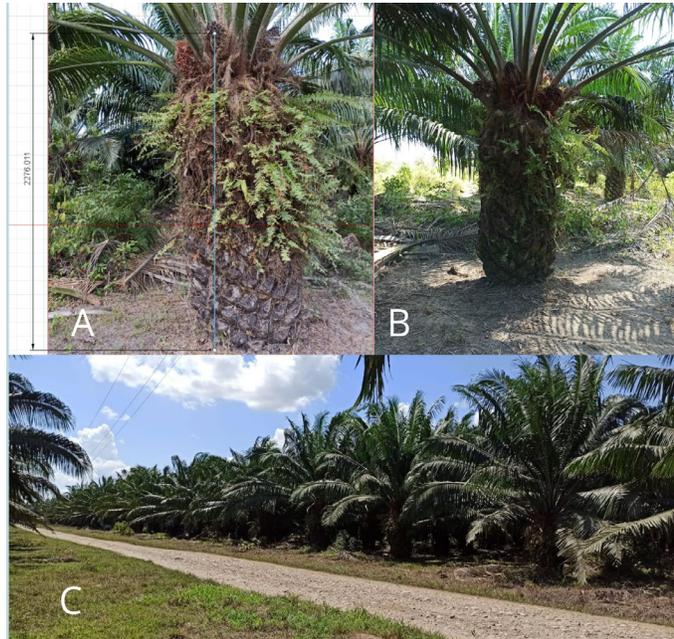


Figura 35. A) Palma categoría A con altura de 2.27m desde el piso hasta el fruto. B) Palma categoría A con inflorescencias presentes. C) Vista de la distribución de una plantación con palmas de categoría A.

- **Palmas entre 5m - 10 m (categoría B)**

Esta categoría se caracteriza por la disminución en aproximadamente la mitad del diámetro del tronco de la palma, para esta categoría ya se requiere un trabajo mayor por parte del operario para polinizar los frutos. También presenta un mayor grado de dificultad para realizar la cosecha de los racimos y la poda de la palma, figura 36.



Figura 36. Palma categoría B con altura de 6.8 m.

- **Palmas superiores a 10 m (categoría C)**

Esta última categoría, presenta plantaciones superiores a 10 metros, figura 37, los trabajadores comentan que las mismas se dejan de forma natural y se cosecha lo poco que producen dada la dificultad de la polinización, su diámetro es menor en comparación a las anteriores categorías y su tronco no muestra grandes protuberancias, por el contrario, es una superficie en general lisa y que según nos comentan es posible trabajar para dejar la superficie más limpia.

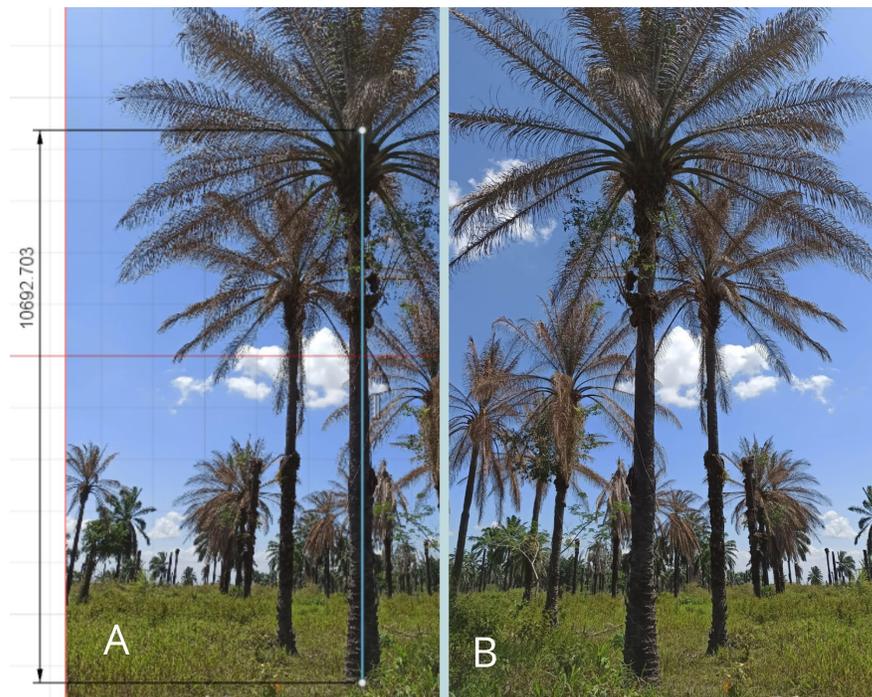


Figura 37. A. Planta categoría C con altura de 10.69m desde el suelo hasta el fruto. B. distribución palmas categoría C.

Por otra parte, se identificaron las condiciones del terreno, el suelo y vegetación. Se realizó un acompañamiento para conocer el trabajo diario de los operarios que realizan la polinización, identificando las herramientas usadas para el despeje y polinización en las palmas del híbrido. Fueron evidentes las problemáticas con la polinización tanto en frutos abortados como en frutos partenocárpicos (sin llenado de almendra), estos racimos de escaso llenado generan pérdidas. Como problemática principal se pudo comprobar la inexistencia de métodos de polinización en ejemplares cuya altura supere los 6 metros, siendo ejemplares que se talan o se dejan polinizar naturalmente, pero teniendo una muy poca productividad.

También, se realizó una inspección del lugar, gracias personal del palmar y la información bibliográfica recopilada en campo, se obtuvo información real de las problemáticas, tales como los problemas musculoesqueléticos presentes en los operarios que realizan la labor de la polinización, y de la distribución de las plantas en el palmar, lo que permitió generar un modelo 3D en Fusion 360, figura 38, para visualizar de una manera más técnica la distribución espacial del prototipo en el entorno.

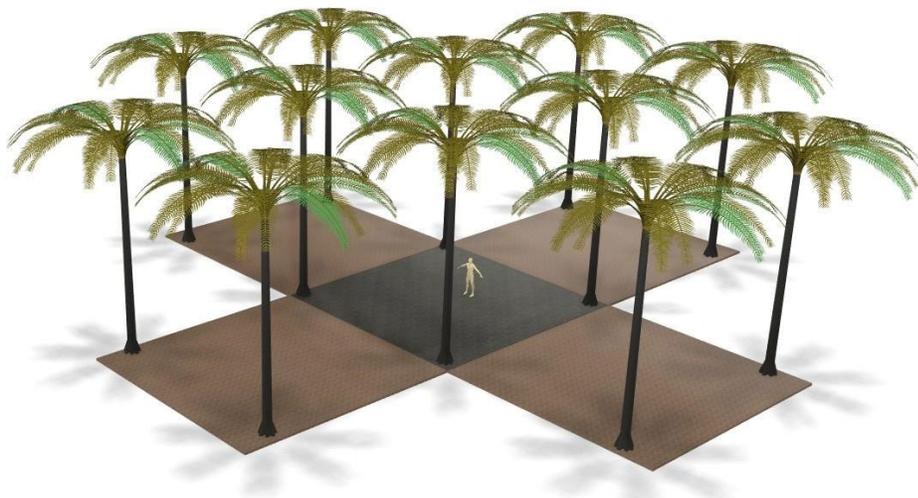


Figura 38. Vista modelada en 3D de la distribución espacial de los lotes de híbrido OxG.

- **Frutos**

Por otra parte, se lograron identificar las características físicas de los frutos del híbrido, figura 39, en los que visualmente se diferencian cuando los mismos están en su etapa de antesis y necesitan ser polinizados, como los que están listos para ser cosechados. Fue posible identificar los diferentes obstáculos, que la propia palma presenta, para alcanzar dichos frutos por lo que se hace evidente la necesidad de limpiar la palma retirando las hojas próximas al fruto.



Figura 39. Frutos palma de aceite. A) Racimo listo para polinizar. B) Racimo frutos polinizados.

Finalmente se realizó la medición de un total de 40 frutos para conocer el largo y el ancho de estos (figura 40), con el fin de establecer un área promedio. Lo anterior se realizó para realizar la evaluación de cobertura del aspersor implementado en el brazo telescópico y su comparación con el aspersor presente en la bomba fumigadora de espalada (herramienta usada para realizar la polinización actualmente). Los anteriores resultados se pueden observar detalladamente en la tabla 3 del anexo 1.



Figura 40. Medición de racimo de frutos A) Largo B) Ancho.

B. Diseño de alto nivel y Bocetos

Se realizaron 4 bocetos de mecanismos telescópicos que permitan alcanzar los 12 metros de altura gracias a la lluvia de ideas y levantamiento de información de esta clase de dispositivos. Gracias al programa SolidWorks versión 2021, estas propuestas se modelaron teniendo en cuenta la morfología de la planta, los posibles obstáculos que puede presentar su tallo, el promedio de diámetros para los híbridos de la palma que presentan alturas entre 3 y 12 metros y el estado general del terreno donde se transportará el dispositivo. Gracias a la ilustración de cada uno de los bocetos se describe su funcionamiento conceptualmente teniendo en cuenta los requerimientos previamente planteados.

Boceto No. 1

El presente prototipo está inspirado en el funcionamiento de las grúas hidráulicas implementadas en la industria de transporte de bienes. El dispositivo está compuesto de un carro con dos ejes y cuatro ruedas para facilitar el desplazamiento del prototipo por el palmar. Además, en el interior de dicho carro se encuentra el contenedor del ANA líquido, las baterías para suministrar corriente a los sistemas electrónicos, la bomba de aceite para el funcionamiento del cilindro hidráulico y la motobomba para la aspersión del ácido.

Por otra parte, el dispositivo cuenta con un sistema telescópico el cual puede extenderse hasta los 16 metros por medio de un sistema de engranajes y un servomotor. Para elevar el brazo telescópico hasta la altura deseada por el operario, el dispositivo cuenta con un cilindro hidráulico soldado en la parte superior del carro contenedor y al brazo telescópico (ver figura 41).

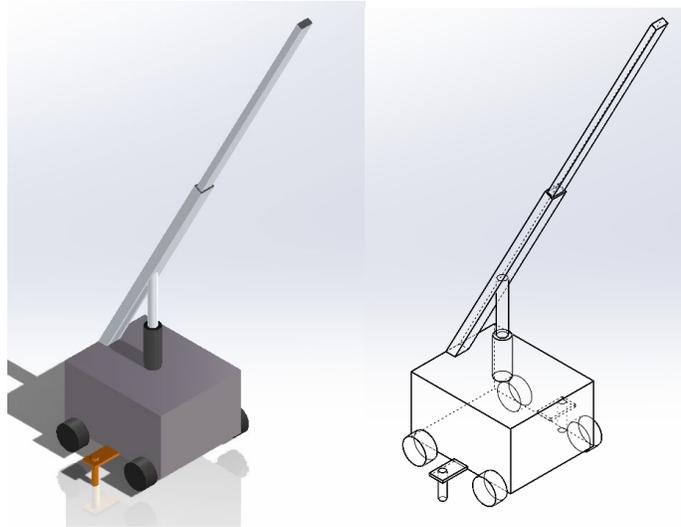


Figura 41. Prototipo 1, sistema robótico grúa con brazo extensible y sistema hidráulico para elevar.

Para elevar el sistema de aspersión hasta las inflorescencias de la palma, primeramente, el prototipo deberá estar fijado al suelo, lo cual se logra gracias a dos ganchos dispuestos en los laterales del carro contenedor, los cuales cuentan con un sistema de fijación simple; se extienden las guías de enganche para posteriormente enterrar los ganchos a la tierra.

Una vez el dispositivo se encuentra fijo, el cilindro hidráulico se extenderá, guiando el brazo telescópico a un ángulo de 70 grados para posteriormente activar el sistema de engranajes por medio del motor para lograr la extensión máxima del brazo de 16 metros, elevando de esta manera el sistema aspersor hasta las inflorescencias de la palma. (Ver figura 42)

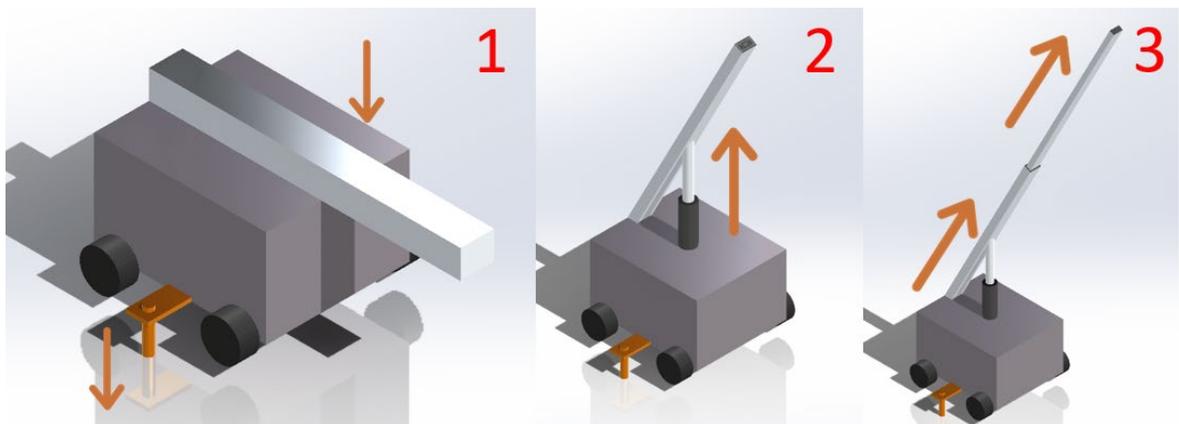


Figura 42. Prototipo 1, modo de funcionamiento para el sistema robótico de brazo extensible y sistema hidráulico.

El sistema de manipulación del dispositivo cuenta dos grados de libertad para guiar al sistema de aspersión a las inflorescencias que se desean asperjar con ácido, los cuales están dados en el eje x gracias al despliegue que realiza el brazo telescópico y en el eje y mediante la elevación de dicho brazo gracias al cilindro hidráulico.

Boceto No.2

El presente prototipo surgió gracias a la elaboración del dispositivo anterior, el cual se basa en el en un sistema telescópico manual o automático retráctil sin la necesidad de emplear un cilindro hidráulico para ser posicionado. Este prototipo tiene la capacidad de ascender el sistema de aspersión hasta los 12 metros de altura. Al igual que el anterior prototipo, el contenedor del ANA líquido, las baterías de suministro de energía y la motobomba se encuentran ubicadas al interior de un carro de dos ejes con cuatro ruedas para facilitar su desplazamiento por el cultivo de palmas.

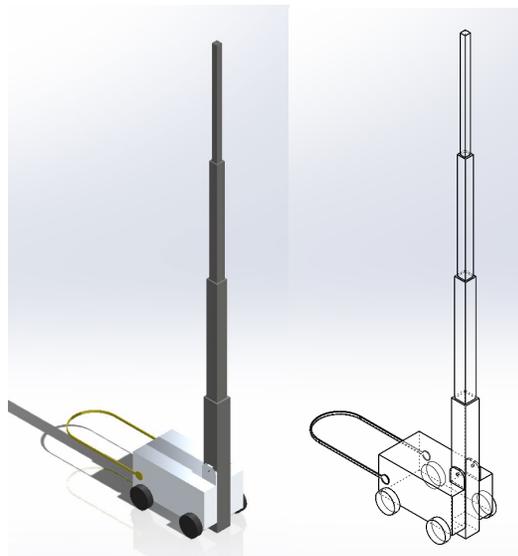


Figura 43. Prototipo 2, sistema carro-robótico con brazo extensible (vertical) y sistema para anclaje a la palma.

Para guiar el sistema de aspersión hasta la altura deseada, el prototipo debe estar sujeto a la palma para evitar el movimiento de este mientras se despliega el brazo telescópico. Para ello, en el carro cuenta con un sistema de correa de sujeción, la cual debe pasar por diámetro de la palma y ser asegurada. Una vez hecho esto el brazo telescópico se guiará manualmente a 90 grados con referencia al carro mediante un eje dispuesto en la parte superior del mismo y

activar un seguro tipo pasador. Por último, el brazo telescópico se desplegará hasta los 16 metros de altura gracias al sistema de engranajes alimentado por el motorreductor, el cual otorgará la fuerza necesaria para subir cada uno de los módulos del brazo telescópico hasta la altura deseada. (Ver figura 44).

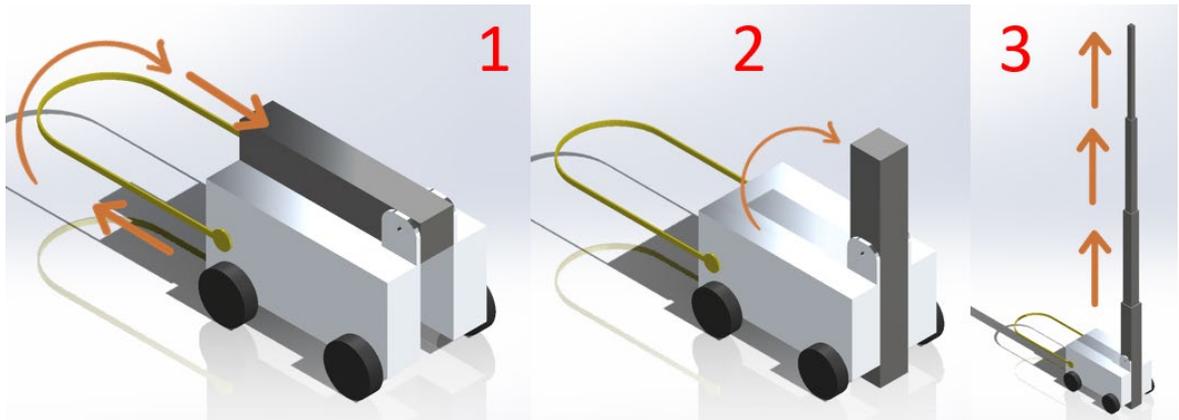


Figura 44. Prototipo 2, sistema de movimiento para el sistema carro-robótico con brazo extensible (vertical) y sistema para anclaje a la palma.

El presente prototipo tiene una capacidad de elevar el sistema de aspersión de dos grados de libertad, dado por la prolongación del brazo telescópico por el eje y el ángulo en que se puede fijar el brazo telescópico en el eje x. Por otra parte, en el presente dispositivo no se ve afectado por el diámetro de la palma debido a que no depende del tronco de esta para elevar el sistema de aspersión hasta las inflorescencias.

Boceto No.3

Este dispositivo, muy similar a los anteriores, tiene una distribución de cargas que da la opción de no ser sujetado a la palma o al piso. Su brazo telescópico se encuentra en la mitad del carro transportador el cual actúa de manera manual para la extensión de sus módulos. Como los anteriores bocetos, el dispositivo está pensado para ser traccionado por el operario. El carro transportador del presente dispositivo tiene dos ejes de los cuales uno es fijo y el otro es el que da la dirección para tener una mejor manipulación. La altura máxima a la que puede llegar el brazo telescópico es de 12 metros. El contenedor del ANA líquido, las baterías de suministro de energía, la motobomba y los demás componentes eléctricos se encuentran ubicadas al interior del carro Transportador. Ver figura 45.

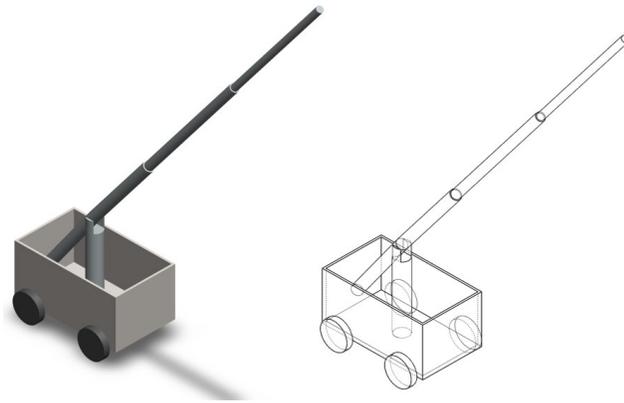


Figura 45. Prototipo 3, sistema carro con brazo extensible (en ángulo) y sistema de giro.

Para guiar la punta del brazo telescópico a las inflorescencias de la palma que se desean polinizar, el carro debe estar con sus ruedas bloqueadas para evitar el movimiento de este mientras se manipula el brazo, el cual se levantará y extenderá sus módulos para que el operario guíe manualmente el aspersor hasta el objetivo. Una vez la boquilla se encuentre cerca de las inflorescencias, el operario activará el sistema de aspersión para polinizar el ejemplar. Una vez el líquido se termine de asperjar, el brazo telescópico deberá contraerse nuevamente para poder movilizar el carro hasta una nueva palma. El paso a paso del funcionamiento conceptual del prototipo se muestra en la figura 46.

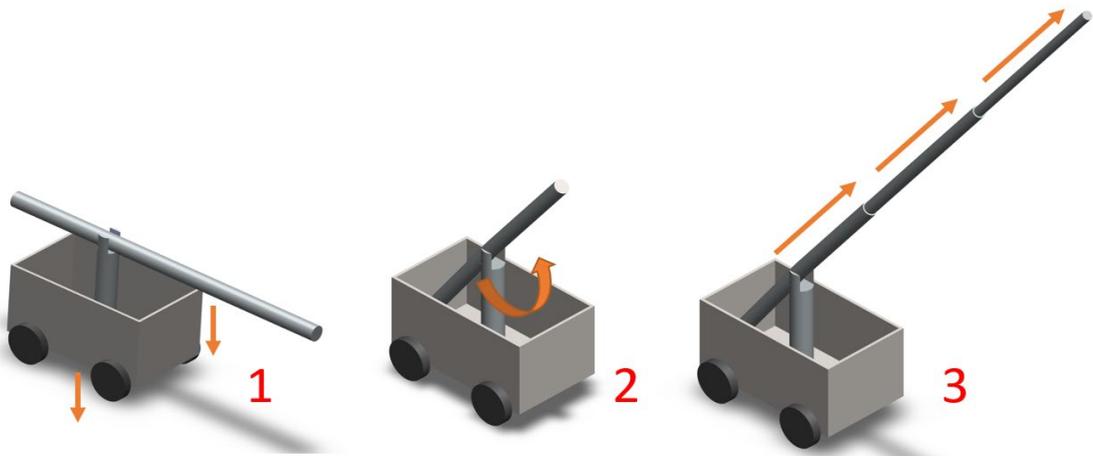


Figura 46. Prototipo 3, sistema de movimiento para el sistema carro con brazo extensible (en ángulo) y sistema de giro

El presente dispositivo tiene una capacidad de elevar el sistema de aspersión de tres grados de libertad, dado por la prolongación del brazo telescópico por el eje y el ángulo en que se puede variar manualmente el brazo telescópico en el eje X y Z. Este dispositivo tiene la

capacidad de realizar correcciones de posición inmediatamente gracias a su versatilidad en el movimiento del brazo telescópico.

Boceto No.4

Este dispositivo telescópico se compone de un chaleco y un brazo telescópico. El principio de funcionamiento es netamente manual por el operario, ya que estará colgado en su espalda como una maleta y la extensión de los módulos del brazo telescópico será manual, ver figura 47, contenedor del ácido, la bomba y los componentes eléctricos del sistema estará en una maleta de aluminio de tipo viaje para ser traccionada por el operario y no implicar una carga mayor al operario que desencadene problemas físicos. La altura máxima a la que puede llegar el brazo telescópico es de 12 metros.

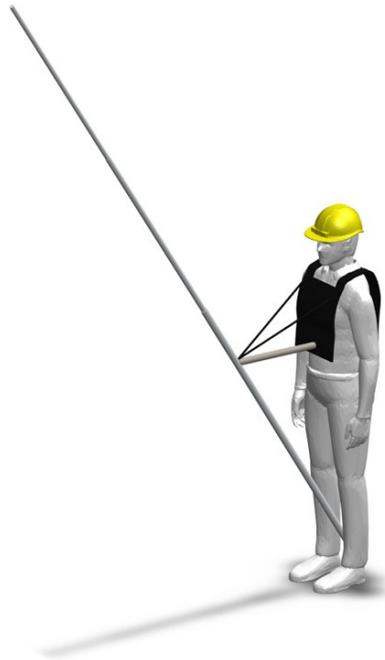


Figura 47. Prototipo 4, sistema de polinización manual de chaleco.

Para realizar la polinización el operario se deberá a 2 metros de la palma (para tener un buen rango de visibilidad e identificar los racimos de esta) y manipular el brazo telescópico para extenderlo hasta la altura deseada y acercarse físicamente a la palma para llegar lo más cerca posible a las inflorescencias como se puede observar en la figura 48. Una vez se logre posicionar correctamente el aspersor en el racimo, el operario activará la bomba para realizar

la aspersión del polen artificial. El rango de maniobrabilidad del dispositivo depende netamente del operario y su visibilidad. En cuanto a el material del brazo deberá ser de un material tanto ligero como resistente para evitar sobrecargas en la columna del operario como también posibles deformaciones de los módulos del brazo telescópico.

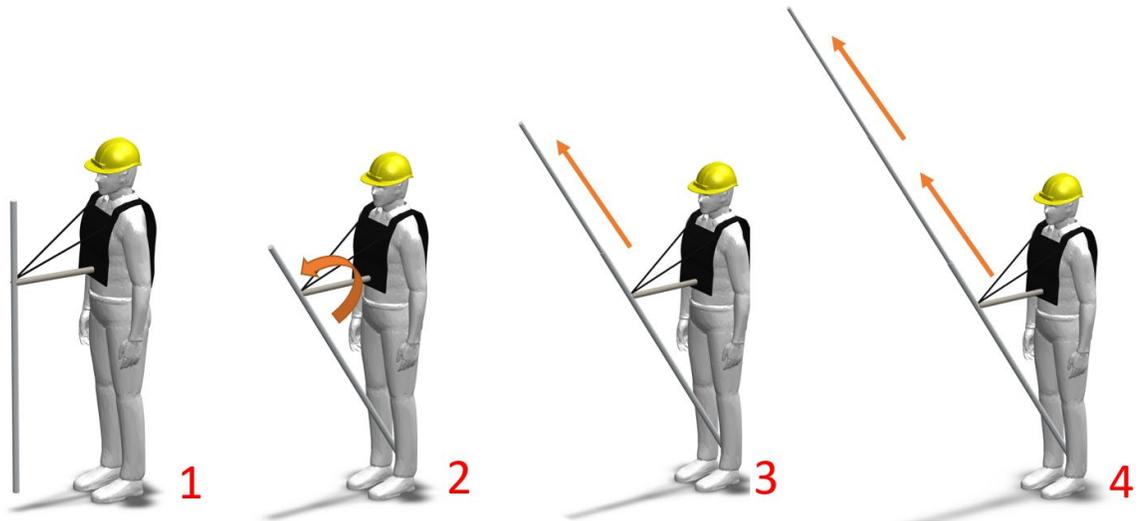


Figura 48. Prototipo 4, funcionamiento del dispositivo telescópico.

- Diagrama de caja negra y Caja gris



Figura 49. Diagrama de caja negra del sistema "Polinización Asistida".

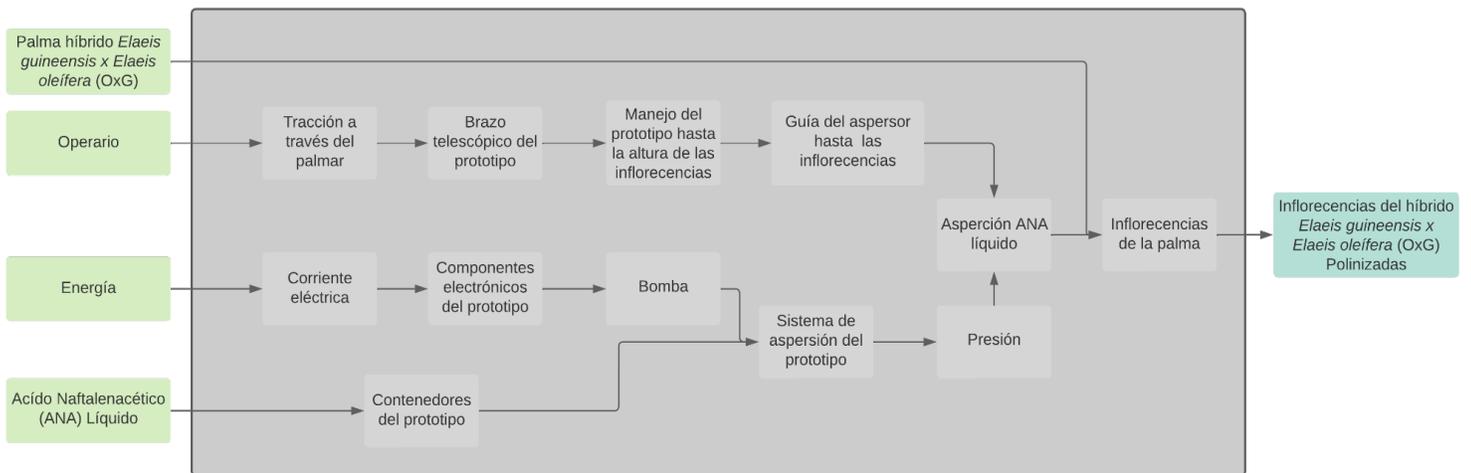


Figura 50. Diagrama de caja gris del sistema "Polinización Asistida".

En los anteriores diagramas presentados en las figuras 49 y 50, se identifica el proceso central (color negro) del sistema es la polinización asistida, en la cual sus entradas (color verde) son la palma del híbrido *Elaeis guineensis x Elaeis oleifera* (OxG), mismo que contiene las inflorescencias que se desean polinizar artificialmente. Por otra parte, el operario se encargará del manejo del prototipo a través del palmar para llegar a las palmas a polinizar, por otra parte, también será el encargado de guiar el dispositivo telescópico hasta la altura donde se encuentren las inflorescencias de la palma.

La energía requerida en el proceso será destinada para la activación de la motobomba y sus respectivos componentes electrónicos para generar la presión necesaria y de esta manera, al ser activo el sistema de aspersión por el operario, asperjar el Ácido por la boquilla del dispositivo telescópico, líquido que estará depositado en los contenedores del prototipo. Por último, se tiene una única salida del sistema (color azul) serán las inflorescencias del híbrido polinizadas.

C. Selección diseño del sistema telescópico mediante matriz de decisión

Para comenzar con la selección del boceto del sistema telescópico usando la metodología de análisis jerárquico primeramente se realizó una matriz de correlación en la cual se evaluó el peso de cada criterio previamente organizados, de esta manera poder tener un dato cuantificable de que tan importante es cada uno de los criterios a evaluar con los bocetos.

Para poder establecer dicho valor se enfrentan todos los criterios y se otorga un peso, en el cual se normalizan dichos valores para finalmente ser incluidos en la matriz de decisión.

Tabla 4. Peso relativo de los criterios de decisión para elección de boceto.

Criterio/Criterio	A	B	C	D	E
A	1.00	3.00	5.00	5.00	9.00
B	0.33	1.00	1.00	3.00	3.00
C	0.20	1.00	1.00	3.00	3.00
D	0.20	0.33	0.33	1.00	3.00
E	0.11	0.33	0.33	0.33	1.00
TOTAL	1.84	5.67	7.67	12.33	19.00

A) Capacidad de llegar a diferentes alturas, B) Capacidad de evadir obstáculos, C) Grados de libertad de movimiento, D) Facilidad de transporte, E) Ergonomía

Como es posible observar en la tabla 6, el criterio con mayor peso es el de la capacidad del prototipo para llegar hasta diferentes alturas comprendidas en un rango de 3 a 10 metros (resaltado de color verde en la tabla), dada la variedad de tamaños en los diferentes ejemplares los cuales tienen edades diferentes y por ende diferentes alturas.

Tabla 5. Pesos normalizados de los criterios de decisión para elección de boceto.

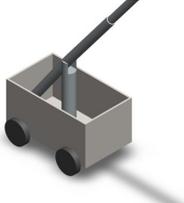
Criterio/Criterio	A	B	C	D	E	Peso del criterio
A	0.54	0.53	0.65	0.38	0.47	0.52
B	0.18	0.18	0.13	0.23	0.16	0.18
C	0.11	0.18	0.13	0.23	0.16	0.16
D	0.11	0.06	0.04	0.08	0.16	0.09
E	0.06	0.06	0.04	0.08	0.05	0.05
TOTAL	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

A) Capacidad de llegar a diferentes alturas, B) Capacidad de evadir obstáculos, C) Grados de libertad de movimiento, D) Facilidad de transporte, E) Ergonomía

Teniendo en cuenta el peso ya normalizado de los criterios, se procede a realizar la elección del prototipo con el que mejor se cumplen estos criterios. Para ello, como se explica en la

metodología, se otorga una valoración comprendida entre 0 y 1 y de esta manera obtener un resultado cuantificado del prototipo que mejor realiza la tarea de polinizar con los criterios evaluados anteriormente.

Tabla 6. Matriz de decisión de boceto a implementar.

Criterio & Peso/ Boceto	A	B	C	D	E	TOTAL
	1	0.5	0.5	1	0.1	0.79
	1	0.5	0.5	0.5	1	0.78
	1	0.5	1	0.5	1	0.87
	0.5	1	0.1	0.5	1	0.55

Como se puede observar en la tabla 7, el prototipo que mejor cumple con los criterios formulados es el número 3, esto debido a que gracias a su brazo telescópico modular permite alcanzar con facilidad todas las alturas comprendidas entre los 3 a los 12 metros. Por otra parte, el prototipo al tener 3 grados de libertad permitiendo ser manipulado en los tres ejes del plano cartesiano, asegura que puede llegar a cada una de las inflorescencias que la palma tenga para ser polinizadas. El dispositivo, al tener un carro transportador, permite que sea

movilizado por las cuadrillas del palmar ya sea por tracción otorgada por el operario o animal, lo que se traduce en una gran ventaja ergonómica al no ser cargado por el operario e, igualmente, las demás herramientas y los contenedores del líquido polinizador. Finalmente, el prototipo escogido es de uso manual, lo cual le permite al operario guiar el brazo telescópico en cualquier dirección sin ninguna limitante y otorga una ventaja debido a que su desmonte es de igual manera manual.

D. Simulación computacional de posibles materiales del prototipo

Los materiales evaluados por el software para realizar el estudio de análisis estático del modelo del brazo telescópico son definidos gracias a las características de dichos materiales para soportar la deformación unitaria bajo escenarios donde el material se encuentra bajo diferentes tipos de fuerza. Por otra parte, fue de gran importancia indagar sobre la disponibilidad de dichos materiales en el mercado. Gracias a esto se establecieron los siguientes materiales:

- **Aluminio (6063 - T6):**

El aluminio 6063 es una aleación de aluminio ampliamente utilizada en aplicaciones estructurales y arquitectónicas debido a sus propiedades mecánicas, estéticas y de procesamiento. Sus principales características son la capacidad de resistencia a la corrosión, la alta capacidad de conformado y mecanizado, la buena conductividad térmica, una gran capacidad de soldabilidad y su baja resistencia mecánica.

En el estudio de análisis estático ejecutado al brazo telescópico de aluminio, figura 51, se determinó que el prototipo tiene un peso aproximado de 22Kg que al ser evaluado bajo la gravedad de la tierra presenta una distorsión energética máxima de $6.706^{\circ}\text{N/m}^2$ presente en el primer módulo del brazo. Por otra parte, el aluminio presentó un desplazamiento resultante máximo de 1.01mm en el último módulo, siendo el de mayor desplazamiento a diferencia de los primeros tres módulos debido a la distancia de la base. Finalmente, el cálculo de deformación equivalente del estudio en el modelo presentó un valor máximo de 2.498^{-3}mm en el primer módulo del dispositivo telescópico. El resultado de este estudio se encuentra detallado en el informe 1 del anexo 2.

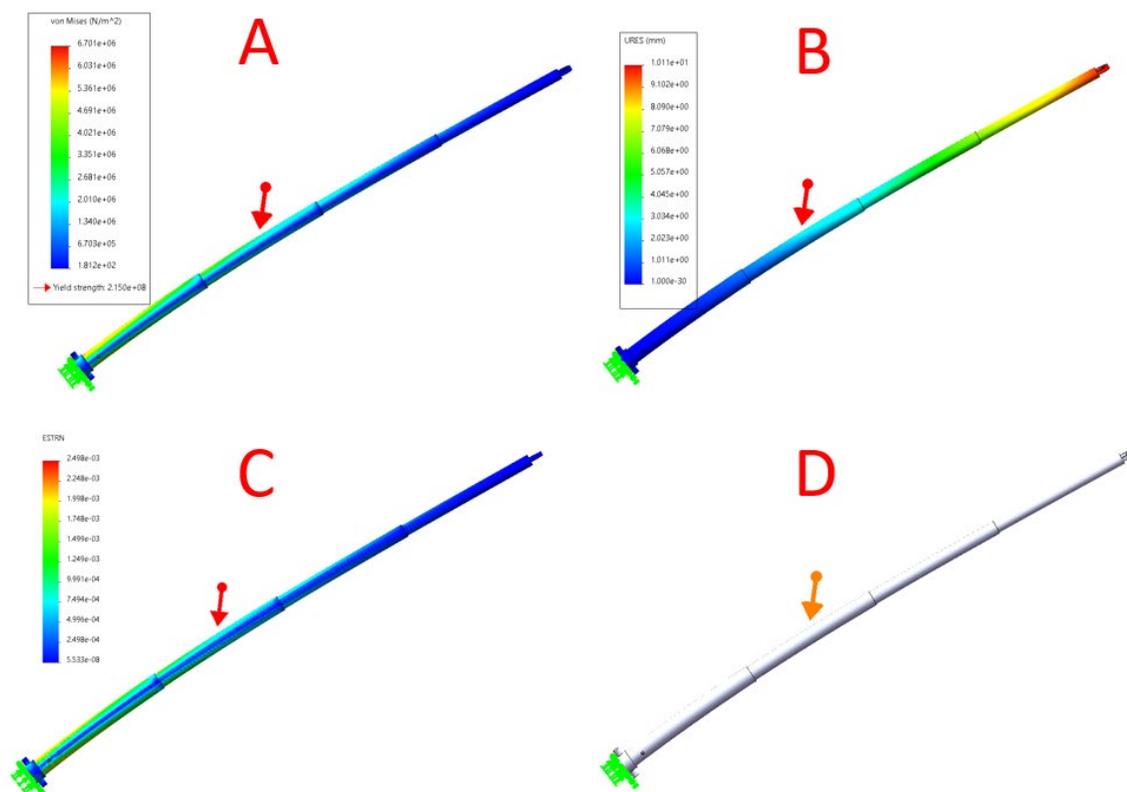


Figura 51. Resultado de estudio de análisis estático del Aluminio en Solidworks. A) Distorsión energética máxima. B) Desplazamiento resultante. C) Deformación equivalente. D) Desplazamiento general

- **Polietileno**

Los tubos de polietileno son un tipo común de tubería utilizada para una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la distribución de agua y gas, la agricultura, la minería, la construcción y más. Sus principales características son la durabilidad del material, la flexibilidad, ligereza, resistencia a agentes químicos externos, resistencia a la temperatura y su bajo costo.

Los resultados del estudio realizado al material polietileno, figura 52, arrojan que su distorsión energética máxima en su punto más susceptible es de 2.4826^6 N/m², un desplazamiento resultante máximo de 4.105^2 mm en el último módulo del brazo telescópico. Por otra parte, su deformación equivalente en su punto más vulnerable (primer módulo) fue de 2.49^{-3} , confirmando de esta manera su excelente resistencia a la gravedad. El peso

calculado del dispositivo por el software fue de 16Kg. Para ver el resultado del estudio detallado, el informe se puede observar en el anexo2, informe 2.

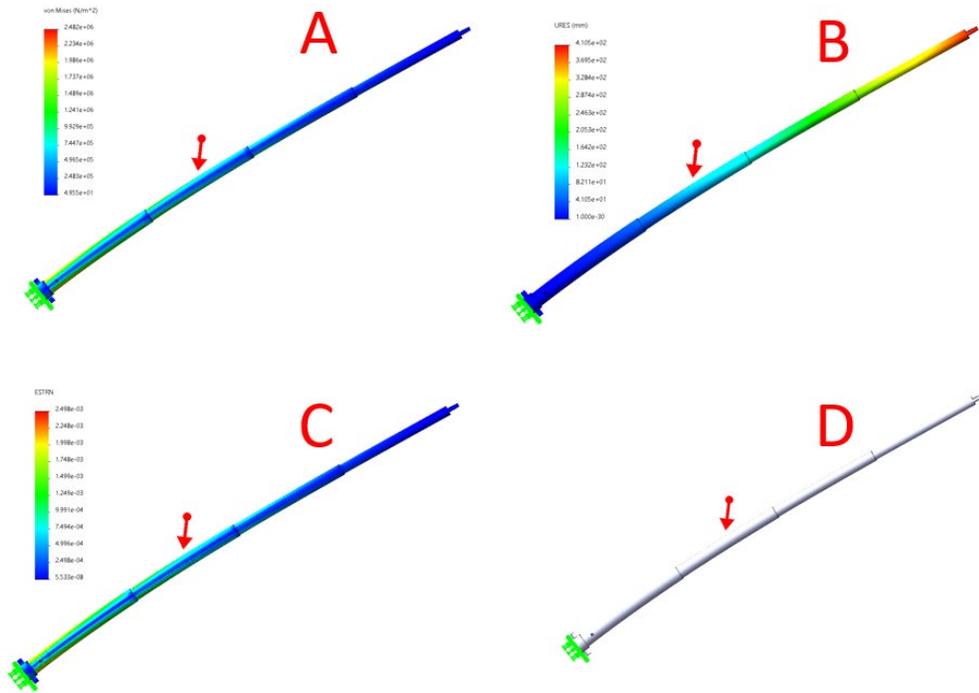


Figura 52. Resultado de estudio de análisis estático del Polietileno en Solidworks. A) Distorsión energética máxima. B) Desplazamiento resultante. C) Deformación equivalente. D) Desplazamiento general

- **PVC (Polyvinyl chloride)**

Los tubos de PVC (policloruro de vinilo) son un tipo común de tubería utilizado en aplicaciones de plomería, construcción, riego, tratamiento de aguas residuales, entre otras. Los tubos de este material resultan duraderos, ligeros, resistentes a productos químicos y temperaturas, económicos y de fácil instalación. Por otra parte este material presenta una resistencia a la tracción de 50 a 60 Mpa, lo que lo hace un material resistente en este tipo de aplicaciones, así como también su excelente rigidez con una elasticidad de 3000MPa aproximadamente.

En el estudio realizado a el brazo telescópico compuesto de PVC, figura 53, se obtiene una distorsión energética máxima en su punto más susceptible, primer módulo del dispositivo, de 2.409^5 N/m², un desplazamiento resultante máximo de 4.206^3 mm en el último módulo. Su deformación equivalente en el primer módulo fue de 3.695^2 . Finalmente, el software arroja

un peso aproximado del dispositivo de 15Kg. Si bien sus resultados inferen que el material tiene un muy buen módulo de elasticidad, su resistencia al impacto es baja, lo que lo convierte en un material de alto riesgo de fracturas ocasionadas por fatigas en el material. El resultado de este estudio se encuentra detallado en el informe 3 del anexo 2.

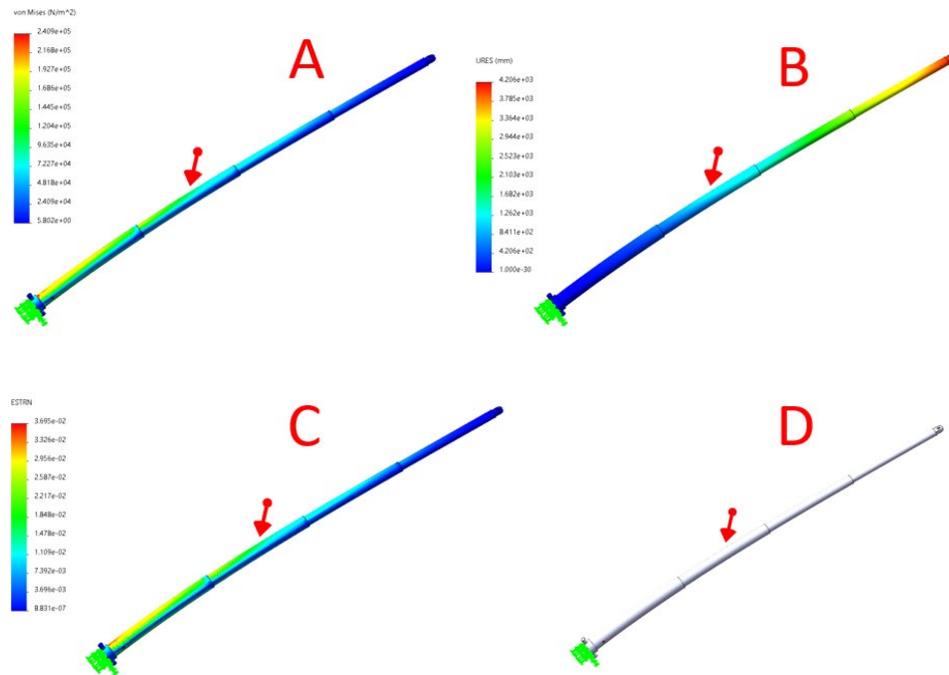


Figura 53. Resultado de estudio de análisis estático del PVC en Solidworks. A) Distorsión energética máxima. B) Desplazamiento resultante. C) Deformación equivalente. D) Desplazamiento general

- **IMC (Intermediate metallic conduit)**

El IMC (Intermediate Metallic Conduit) es un tipo de tubo de acero galvanizado utilizado para la protección de cables eléctricos en aplicaciones de construcción y de infraestructuras. Este material presenta una muy buena resistencia a la corrosión debido a su recubrimiento de zinc, lo que lo hace un material resistente a la humedad y la intemperie. Su resistencia a la compresión es muy buena, lo que lo hace tener la capacidad de soportar cargas considerables sin perder su forma. Por otra parte, el IMC es un material con muy buena rigidez, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde se busque una protección fuerte de elementos en su interior.

Los valores resultantes del análisis estático realizado al modelo del brazo telescópico conformado por IMC en la figura 54 arroja una distorsión energética máxima de 1.9067 N/m^2 en la unión entre el módulo 1 y 2, un desplazamiento resultante máximo de 1.021 mm en su punto más susceptible a la deformación, es decir, en el último módulo. Su deformación equivalente fue de 7.801×10^{-5} , resultando en una deformación mínima comparada con los demás materiales sujetos al estudio. Finalmente, el software arroja un peso aproximado del dispositivo de 25 Kg . Estos resultados comprueban que el acero galvanizado es un material muy resistente a la deformación a pesar de su alta densidad y peso. Para ver los datos al detalle del estudio realizado, ver anexo 2 informe 4.

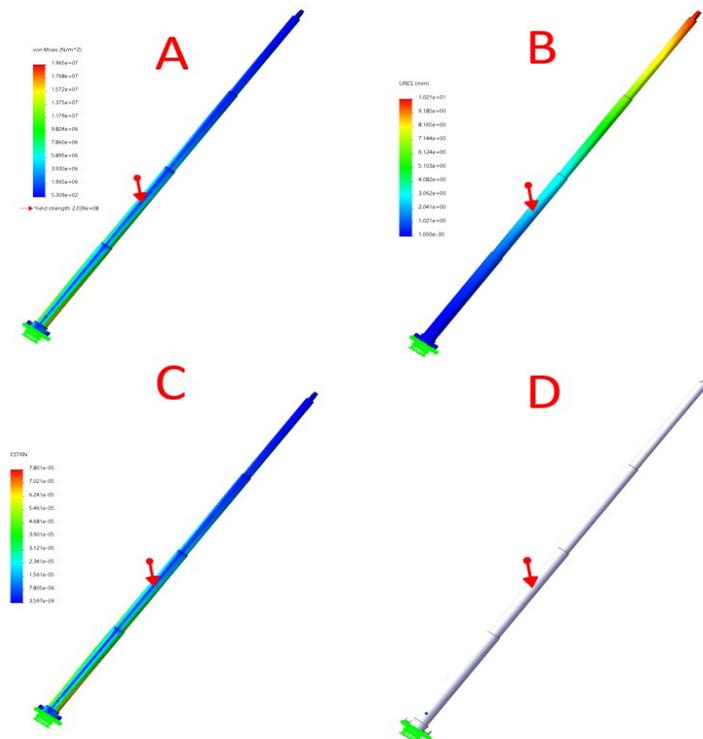


Figura 54. Resultado de estudio de análisis estático del IMC en Solidworks. A) Distorsión energética máxima. B) Desplazamiento resultante. C) Deformación equivalente. D) Desplazamiento general

E. Selección de materiales del prototipo

En la metodología de análisis jerárquico para la selección del material a implementar en el brazo telescópico del dispositivo se implementó una matriz de correlación en la cual se evaluó el peso de cada criterio, los cuales fueron previamente organizados. De esta manera se obtiene un dato numérico de la importancia de cada uno de los criterios a evaluar con los

materiales. Para poder establecer dicho valor se enfrentan todos los criterios y se otorga un peso, en el cual se normalizan dichos valores para finalmente ser incluidos en la matriz de decisión.

Tabla 7. Peso relativo de los criterios de decisión para elección de material del prototipo.

Criterio/Criterio	A	B	C	D	E
A	1.00	5.00	5.00	7.00	7.00
B	0.20	1.00	1.00	3.00	3.00
C	0.20	1.00	1.00	3.00	3.00
D	0.14	0.33	0.33	1.00	3.00
E	0.14	0.14	0.33	0.33	1.00
TOTAL	1.69	7.48	7.67	14.33	17.00

*A) Resistencia a la deformación. B) Peso. C) Resistencia a líquidos. D) Facilidad de manipulación.
E) Precio.*

Cómo es posible observar en la tabla 9, el criterio con mayor peso es el de la resistencia a la deformación, información que puede ser obtenida de las simulaciones realizadas. Esta propiedad mecánica indica cuál es la capacidad del material para mantener su forma original y su funcionalidad después de ser sometido a una determinada carga. Esta característica también indica la ductilidad y la rigidez del material.

Tabla 8. Peso normalizado de los criterios de decisión para elección de material del prototipo.

Criterio/Criterio	A	B	C	D	E	Peso del criterio
A	0.57	0.67	0.65	0.49	0.41	0.56
B	0.12	0.13	0.13	0.21	0.18	0.15
C	0.12	0.13	0.13	0.21	0.18	0.15
D	0.08	0.04	0.04	0.07	0.18	0.08
E	0.08	0.02	0.04	0.02	0.06	0.05

TOTAL	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
--------------	------	------	------	------	------	-------------

A) Resistencia a la deformación. B) Peso. C) Resistencia a líquidos. D) Facilidad de manipulación.

E) Precio.

Teniendo en cuenta el peso ya normalizado de los criterios, se comienza a evaluar qué material puede ser implementado en el prototipo con el que mejor se cumplen estos criterios. Para ello, como se explica en la metodología, se otorga una valoración comprendida entre 0 y 1 y de esta manera obtener un resultado cuantificado del prototipo que mejor realiza la tarea de polinizar con los criterios evaluados anteriormente.

Tabla 9. Matriz de decisión de material a implementar.

Criterio & Peso/ Material	A	B	C	D	E	TOTAL
	0.56	0.15	0.15	0.08	0.05	
Aluminio (6063 - T6)	0.5	0.5	0.1	1	0.5	0.48
Polietileno	0.1	1	0.1	0.5	1	0.31
PVC (Polyvinyl chloride)	0.5	0.5	1	1	1	0.64
IMC (Intermediate metallic conduit)	1	0.5	1	0.5	0.5	0.86

Como se puede observar en la tabla 10, el material que mejor cumple con los criterios formulados es el IMC (Intermediate metallic conduit). Su resistencia a la deformación (criterio con mayor peso) es una característica que, como se pudo comprobar en las simulaciones realizadas, otorga al brazo telescópico una muy buena rigidez y una menor fatiga del material al ser sometido a diferentes cargas. Por otra parte, el peso, si bien no es ideal, es aceptable al compararlo con la extensión total de brazo telescópico (12 metros) y, al estar ubicado y fijado en el carro transportador, no implica una carga al operario que manipula el prototipo. Otra de las ventajas del material es su resistencia a los líquidos y humedad. Al ser un producto galvanizado, presenta una cobertura de zinc, la cual protege el material de la oxidación ya sea por el ambiente húmedo en el palmar o por el mismo líquido que transporta

la manguera en su interior. Por último, el costo del material es asequible teniendo en cuenta el presupuesto destinado para la compra de este.

F. Diseño Detallado

Para el diseño detallado del prototipo se dividieron los diferentes sistemas para ser diseñados de manera individual. Al realizar el diseño de esta manera se garantiza una correcta visualización de la ubicación de cada componente y sus respectivas medidas. Por cada uno de estos sistemas se realizan sus respectivos planos para posteriormente ser usados en la construcción y ensamblaje del prototipo.

- **Sistema de carga y transporte**

Este sistema consiste en un dispositivo que permite transportar el brazo telescópico, los componentes electrónicos, contenedores del líquido polinizador y herramientas del operario. Su diseño presenta una carrocería tubular, lo cual permite una reducción de peso del prototipo. En su parte inferior presenta un piso de malla con el fin de evitar acumulación de líquidos sobre la carrocería que dificulten la limpieza y a futuro que desgasten la estructura debido a la oxidación del hierro; esta malla es soldada sobre ángulos de 4 mm de espesor y 3.8 cm de ancho. Por otra parte, se añaden dos compartimentos para ubicar los contenedores del polinizador, los cuales son posicionados de manera que se distribuyan equitativamente los pesos. El sistema presenta cuatro ruedas de 10 pulgadas, ideales para transportarlo en el terreno irregular del palmar. Las dos ruedas posteriores tienen la característica de girar sobre su propio eje y otorgar la capacidad de girar en diferentes direcciones facilitando la maniobrabilidad de este en el terreno rocoso tal y como se muestra en la figura 55, mientras que las dos ruedas delanteras son fijas para un mayor control en la línea de conducción.

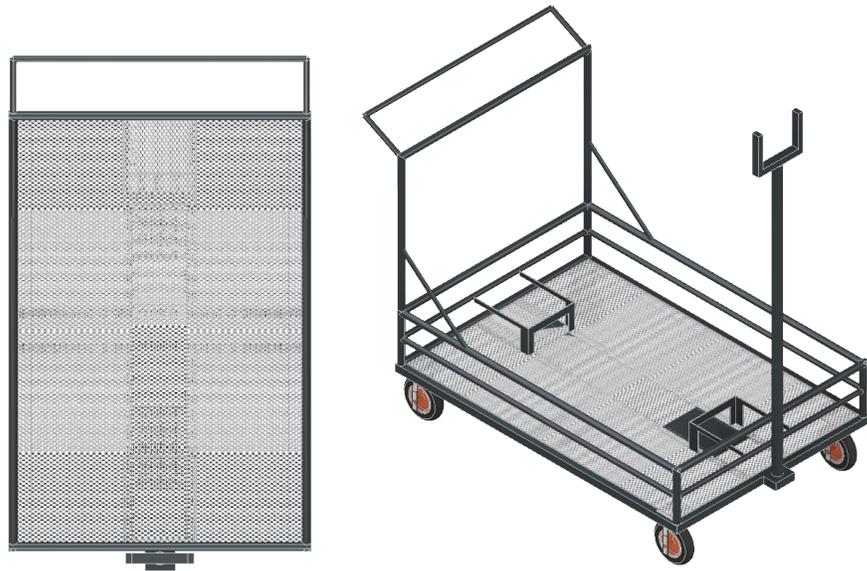


Figura 55. Diseño asistido por computadora (CAD) de estructura transportadora en A: vista superior y B: vista isométrica

El anterior diseño tiene un largo de 1.5 metros y un ancho de 1 metro, lo que le otorga una mayor estabilidad considerando la longitud total del brazo telescópico. Por otra parte, su altura es de aproximadamente 50 centímetros como se puede observar en los planos de la figura 56, haciendo que el dispositivo tenga un centro de gravedad bajo, permitiendo que al momento de movilizar y accionar el prototipo a través del palmar con el brazo telescópico extendido tenga una buena estabilidad y un bajo riesgo de volcar el contenido en su interior.

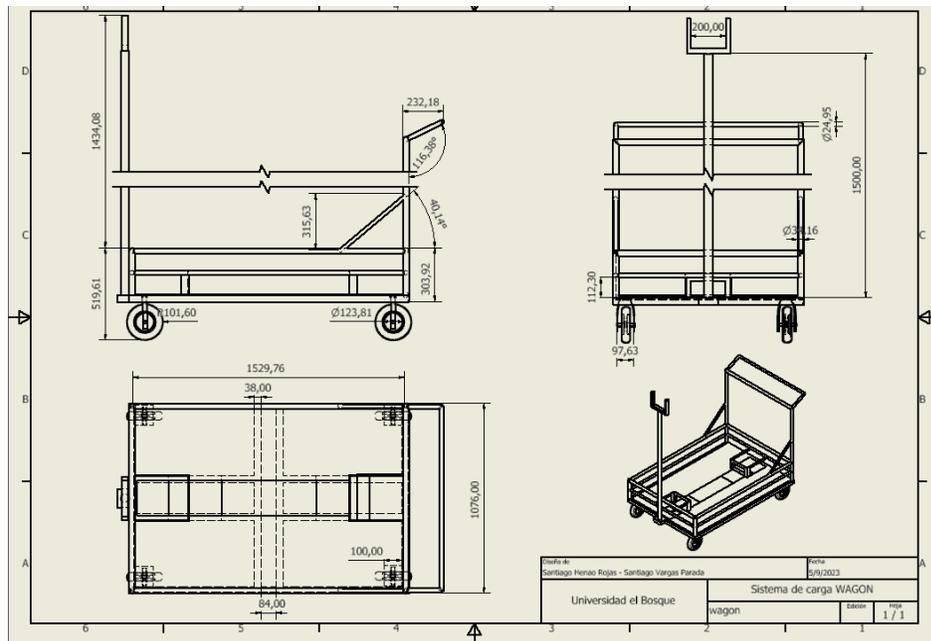


Figura 56. Planos de Diseño asistido por computadora (CAD) de estructura transportadora

- **Sistema de eje**

El eje se encuentra ubicado en la mitad espacial del carro transportador, donde su sujeción está dada por la soldadura sobre el mismo chasis del carro. Este eje tiene la capacidad de girar 360° gracias a su sistema de rotación interna entre tubos por diferencia de diámetros alineados en un mismo eje como se puede observar en la figura 57A, el eje también tiene un tornillo prisionero (figura 57B) para bloquear o ajustar su giro; función que está pensada para evitar movimientos del brazo telescópico mientras se realiza la polinización o si desplaza en una zona con un grado alto de desnivel. En su parte superior, el eje presenta una platina asegurada por un pin metálico, cuya función es girar y, de esta manera, elevar el brazo telescópico en el ángulo deseado para poder alcanzar la altura específica donde se encuentran las inflorescencias a polinizar.

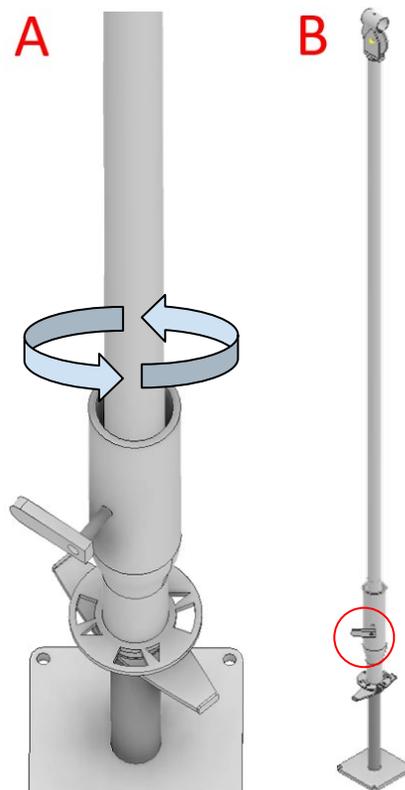


Figura 57. Diseño asistido por computadora (CAD) de eje o pivote del sistema telescópico vista isométrica

Como se puede identificar en los planos de la figura 58, el eje tiene una altura total de 150 centímetros, lo que se traduce en un ángulo de elevación del brazo telescópico de 80°. Por otra parte, su base tiene un largo de 16 centímetros. Es el componente que soporta el peso del brazo telescópico, y se adapta mediante una pieza con rosca cuadrada que permite un rango de movimiento de 67cm, esto con la finalidad de adaptarse a las diferentes alturas de los trabajadores; este eje se construyó del mismo material que el brazo dada su excelente resistencia a la deformación y su rigidez.

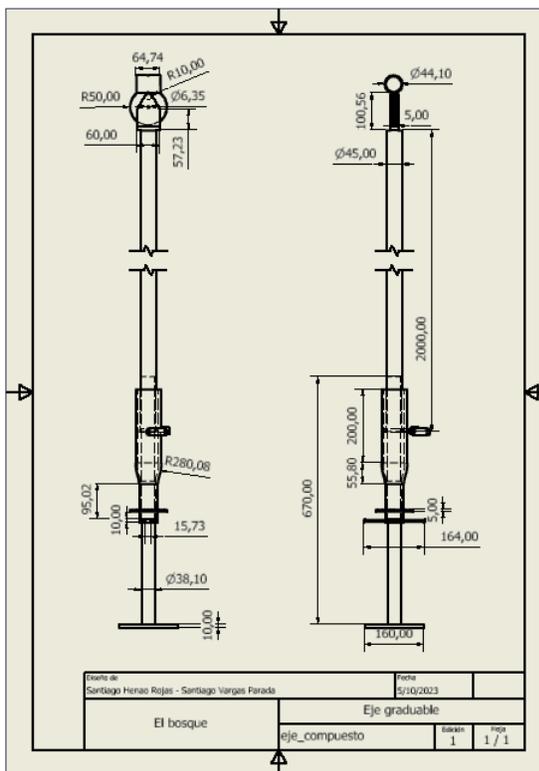


Figura 58. Planos de Diseño asistido por computadora (CAD) de eje o pivote del sistema telescópico

- **Sistema Brazo telescópico**

El brazo telescópico es el sistema principal del prototipo. Su diseño se basa en 4 tubos de acero galvanizado de diferentes diámetros ($\frac{1}{2}$ in, $\frac{3}{4}$ in, 1 in, 1- $\frac{1}{4}$ in) que se unen entre sí gracias a las juntas de unión. El primer módulo (1- $\frac{1}{4}$ in) tiene una longitud de 6 metros y un calibre de 2.6 mm, mientras que los módulos restantes tienen una longitud de 3 metros y un calibre de 2 mm, medida que reduce el peso total del sistema. Como se puede observar en la figura 59A. Por otra parte, cada una de las juntas tiene la capacidad de bloquear el módulo

extendido a la longitud que se desee, figura 59B, para ello se extiende el módulo hasta la longitud deseada y se gira para ser asegurado. De esta manera se garantiza que el sistema telescópico se pueda adaptar en cualquier altura para realizar la polinización.



Figura 59. Diseño asistido por computadora (CAD) de A: Brazo telescópico modular y B: Juntas de módulos del sistema telescópico

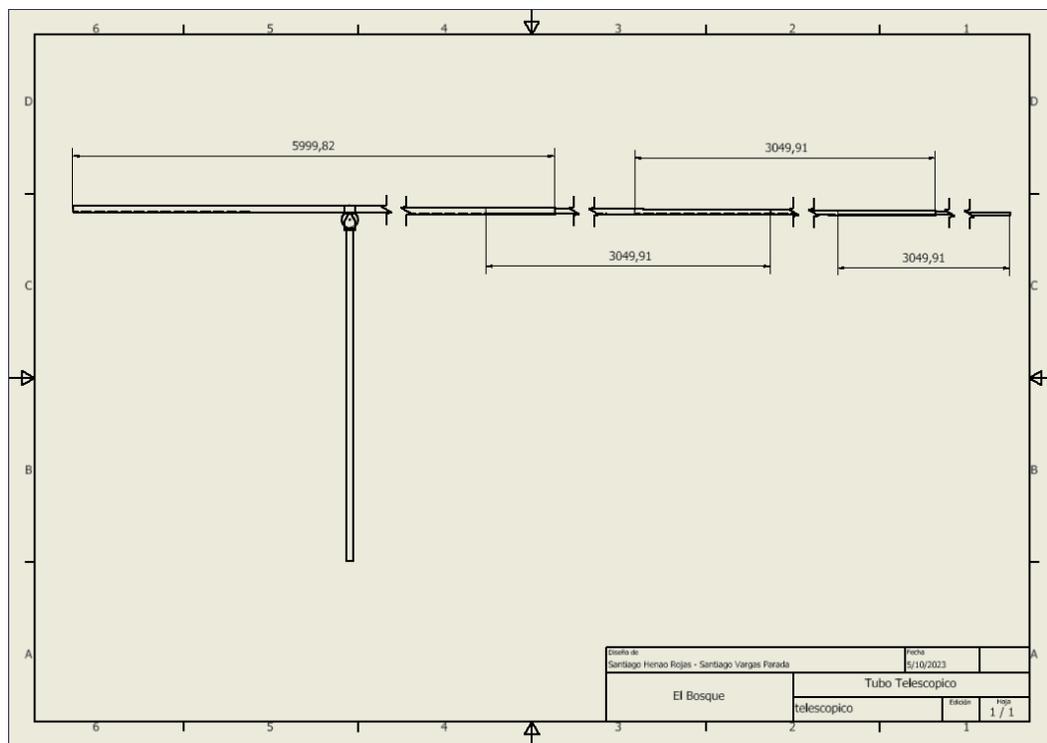


Figura 60. Plano de Diseño asistido por computadora (CAD) de brazo telescópico modular

Las juntas de los módulos, al ser acoples de los diferentes diámetros de los tubos, están soldados con el fin de que la rosca pueda ajustar la unión de 2 tubos, lo que garantiza una resistencia ideal para las cargas que afectan el brazo. Como se puede observar en la figura

61, sus medidas no sobrepasan los 5 centímetros de largo. Estas juntas tienen la facilidad de, en caso de ser necesario, reemplazarlas fácilmente retirándose de los tubos con una llave fija.

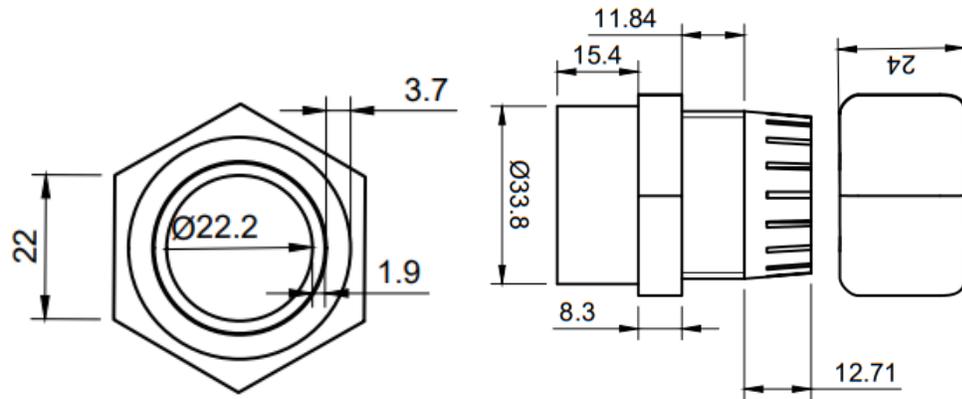


Figura 61. Plano de diseño asistido por computadora (CAD) de juntas de módulos del sistema telescópico.

Fue importante categorizar el propósito de los diferentes perfiles de los módulos telescópicos en los diseños como el presentado en la figura 8; el perfil cuadrado, con estructura de armazón que ahorra material y genera gran resistencia dada la distribución de fuerzas entre sus nódulos, pero que a su vez se ve afectado por el peso de sus materiales con propiedades mecánicas resistentes pero de gran masa; los triangulares como la figura 20, que presentan una mayor resistencia a los momentos flectores comparado con los otros; tienen menor peso, pero requieren sistemas de ensamblajes con poca libertad y con gran dificultad a la hora de unir (Chicaiza y Guerrero, 2016); y los de perfil circular, que para esta fase de diseño fueron adecuados, dado que este permite el encaje de mucho tubos con diámetros consecutivos; poco peso y gran libertad a la hora de ajustarse eficientemente a las alturas requeridas gracias a las juntas diferenciales de rosca (figura 59B) únicamente adaptables para perfil circular, las cuales fijan mediante presión y aumento de la fricción estática al tubo consiguiente (Yépes Rincón et al., 1980).

También se identificó la razón de porque otros dispositivos no han sido implementados en las labores diarias, como se muestra en la figura 19, equipo que pese a contar con un tubo ligero de 2 metros, un sistema de aspersión con baterías y paneles solares no es un dispositivo que se use en campo por su poca autonomía y su gran esfuerzo biomecánico. (Farfán, 2021). Por ello los sistemas de palanca o brazos telescópicos con pivote y contrapeso son una alternativa que ayudan con esta problemática, dado que permiten implementar más secciones

con mayor peso y reducir el esfuerzo al operario dada la compensación de fuerzas y torques mediante la ubicación del pivote y contrapeso.

Sistema eléctrico

El prototipo presenta un sistema eléctrico simple. Se conforma de dos baterías de 12 volts y 7.5 amperios conectadas en paralelo que a su vez se conectan en serie con un switch que da paso de corriente a un pulsador y finalmente a la electrobomba de 12V, como se muestra en la figura 62. Las baterías se recargan a través de un adaptador de corriente de AC a DC, que se conecta a los bornes que se encuentran en la parte superior de las mismas.

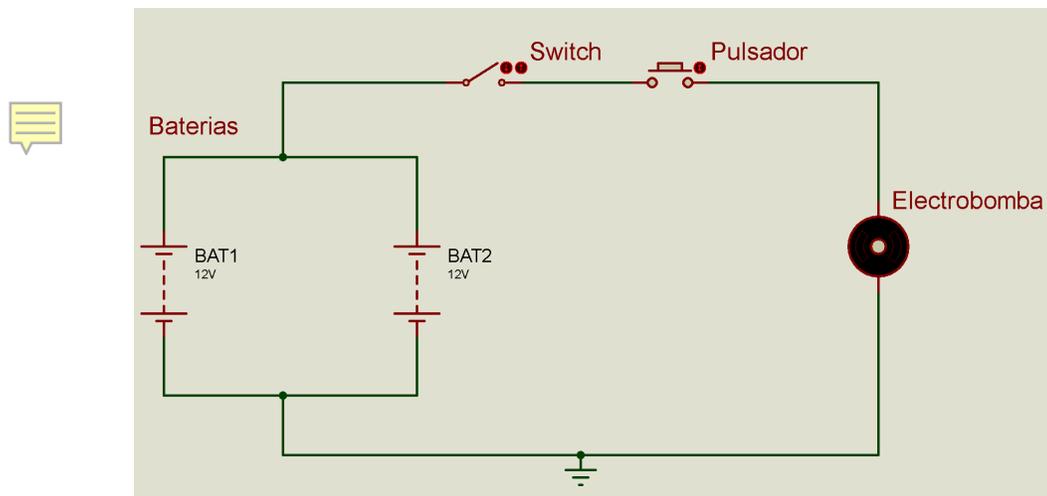


Figura 62. Diagrama circuital del sistema eléctrico del prototipo telescópico.

Este circuito eléctrico se encuentra protegido por una caja de PLA, la cual evita daños en las baterías y un soporte que fija el switch y el pulsador al carro transportador como se muestra en la figura 63. Para accionar el dispositivo y realizar la aspersión del líquido se debe activar el switch. Luego, el pulsador da el paso de corriente a la electrobomba cuando es activado para generar la presión necesaria y llevar el líquido hasta el aspersor ubicado en un extremo del brazo telescópico. De esta manera se garantiza una poca pérdida del líquido pues se pretende que el dispositivo primero sea ubicado cerca de las inflorescencias y se active cuando el operario pulse el botón y realice la aspersión.

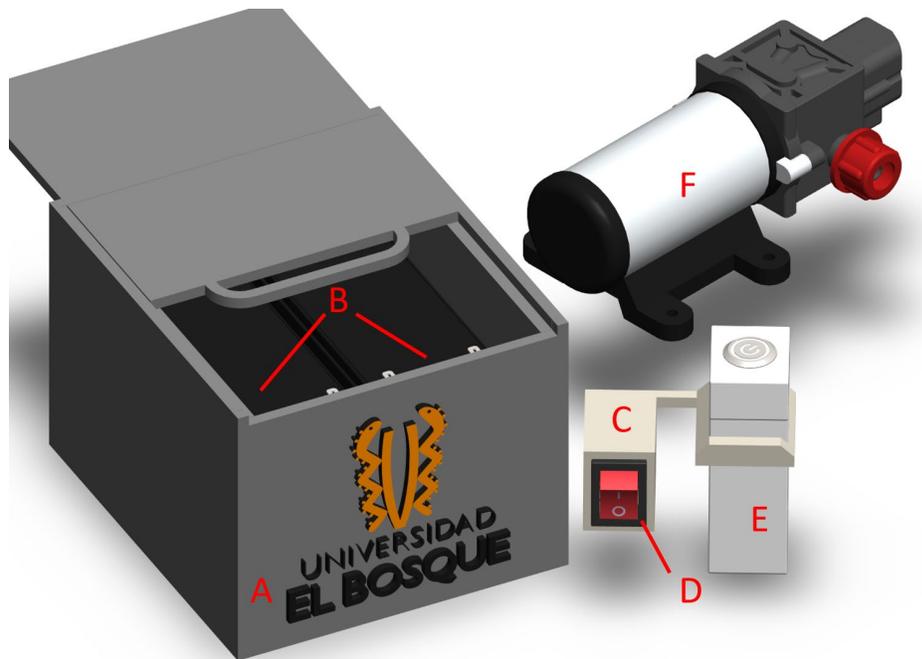


Figura 63. Diseño asistido por computadora (CAD) de sistema eléctrico del prototipo. A: Caja protectora de baterías. B: Baterías 12V. C: Soporte plástico. D: Switch. E: Pulsador. F Electrobomba

La electrobomba implementada para el sistema de aspersión del prototipo cuenta con las siguientes especificaciones:

- Voltaje de Entrada: 12V (9-14.4V)
- Corriente: 7.5A
- Potencia Nominal: 72W
- Caudal: 6.0L/min
- Presión: 0.90MPa

Teniendo en cuenta que la longitud máxima del brazo telescópico en extensión es de 12 metros con ángulo máximo de 60°, se procede a calcular la pérdida de presión en la manguera de ½' que compone el mecanismo. Para ello se calcula la velocidad de flujo líquido en la manguera, donde la ecuación de continuidad es:

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2$$

Donde A1 y A2 son las áreas de las secciones transversales de la manguera en los puntos inicial y final, respectivamente, y v1 y v2 son las velocidades del flujo de líquido en esos puntos. Dado el diámetro de la manguera (154.2mm) se realiza el cálculo del área utilizando la fórmula del área de un círculo: $A = \pi * r^2$, donde r es el radio. Dicha área corresponde a

76.2mm² o 0.0762m². De esta manera, el área de la sección transversal de la manguera (A1 y A2) será entonces:

$$A1 = A2 = \pi * (0.0762)^2 = 0.01823m^2$$

Dado que el caudal (flujo) de líquido es de 6.0 litros por segundo, se necesita convertirlo a metros cúbicos por segundo, ya que el sistema SI utiliza metros cúbicos. Debido a que 1 litro es igual a 0.001 metros cúbicos, por lo tanto, 6.0 litros por segundo es igual a 0.006 metros cúbicos por segundo. Gracias a esta conversión se puede despejar v1 de la ecuación de continuidad:

$$v1 = \frac{(A1 * A2)}{A1}$$

$$v1 = \frac{(0.01823 * 0.006)}{0.01823}$$

$$v1 \approx 0.006m/s$$

Esto nos da la velocidad del flujo de líquido en la entrada de la manguera. Finalmente, es posible determinar si la presión de la bomba será suficiente para llevar el líquido a través de la manguera calculando la pérdida de presión debido a la fricción en la manguera. Para ello, se utiliza la ecuación de pérdida de presión de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P = \frac{(f * L * \rho * v1^2)}{(2 * D)}$$

Donde ΔP es la pérdida de presión, f es el factor de fricción de la manguera, L es la longitud de la manguera, ρ es la densidad del líquido y D es el diámetro de la manguera. El factor de fricción (f) depende del tipo de manguera y las condiciones del flujo. Para una manguera de 152.4 mm de diámetro, se asume un valor típico de 0.02. La densidad del líquido (ρ) dependerá del tipo de líquido que se esté utilizando. Sustituyendo los valores en la ecuación, obtenemos:

$$\Delta P = \frac{(0.02 * 12 * 1000 * 0.006^2)}{(2 * 0.1524)}$$

$$\Delta P = 0.031Pa$$

De esta manera la pérdida de presión debido a la fricción en la manguera es de aproximadamente 0.031 Pa. Dado que la presión de la bomba es mucho mayor que esto (900,000 Pa), podemos concluir que la bomba es capaz de llevar líquido a presión a través de la manguera de 12 metros de longitud y 152.4 mm de diámetro.

La configuración de las dos baterías en paralelo conectadas a la electrobomba da al sistema un uso continuo de hasta 2.5 horas, las cuales, si se comparan con la autonomía de la fumigadora de espalda de 20L, la cual funciona por gasolina, dan una autonomía de 50 minutos (Guaqueta & Baquero, 2018), lo cual es limitante para los operarios teniendo en cuenta las extensas jornadas de polinización.

7.2 FASE 2: CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

A. Cotización y adquisición de la lista de materiales para la construcción del prototipo

En el anexo 1 tabla 2, se encuentra el listado de precios de cada uno de los componentes mecánicos, eléctricos y materiales para la construcción de los diferentes sistemas del prototipo.

B. Adquisición del ANA

La compra del ácido naftalenacético se realizó a través de la página de Cenipalma y se agregó a la lista de materiales en la tabla 2 del anexo 1. Una vez realizado el pedido de 1Kg del polinizador artificial en una concentración de 98%, fue entregado en la ciudad de Yopal a los 6 días. Gracias a las instrucciones y recomendaciones enviadas en un documento por Cenipalma, se preparó la solución líquida para poder almacenarla en los contenedores del prototipo y posteriormente su utilización en las palmas del híbrido para su polinización.



Figura 64. Brochure de Ácido Naftalenacético al 98% de Cenipalma.

C. Ensamblaje del prototipo

Sistema de carga y transporte

Para la construcción del sistema de carga y transporte, como se puede observar en la figura 65, lo primero que se ensambló fue el chasis del sistema, uniéndose los ángulos y tubos de aluminio mediante soldadura. Posteriormente se realizó la estructura que unirá el eje que da movimiento al brazo telescópico. Adicionalmente se soldó un triángulo en cada esquina con el fin de ubicar la base de las ruedas mediante soldadura de estas al chasis del carro transportador. Por otro lado, se soldó una malla de hierro para crear la base del carro y se crearon dos soportes, ubicados en la parte frontal y posterior, para asegurar al carro los contenedores del líquido. Finalmente se añadieron las ruedas del prototipo las cuales están ancladas a los ejes. Este proceso lo llevó a cabo un profesional en soldadura para la fijación de los distintos tubos estructurales.



Figura 65. Construcción sistema transportador del prototipo. A: Base tubular del sistema. B: Chasis tubular terminado y acople de las ruedas. C: Soporte de contenedor líquido. D: Soldadura de la malla al chasis.

Sistema de eje

El eje del brazo telescópico se construyó basado en el sistema de anclaje de los andamios mediante dos tubos de diferentes diámetros con la finalidad de que pudieran tener un giro de 360° . Este eje se encuentra ubicado en el centro del carro transportador, posición que asegura una buena estabilidad a la hora de extender el brazo telescópico en su totalidad, ver figura 66. Este eje también tiene la capacidad de bloquear el giro gracias a un pin tipo pasador o prisionero, y ajustar la altura gracias a la rosca de fuerza par con paso cuadrado; la cual permite disminuir la altura o aumentarla del punto de apoyo como una palanca clásica adaptando el sistema a la altura del operario. En el extremo superior del eje se encuentran dos platinas con la misma distancia que el diámetro del primer módulo del brazo telescópico, el cual se asegurará por medio de un pasador y, de esta manera, posibilitando la inclinación del brazo hasta en un ángulo de 75° .



Figura 66. Construcción sistema de eje del brazo telescópico.

Sistema Brazo telescópico

El ensamblaje de cada uno de los módulos del brazo telescópico se realizó mediante las juntas, las cuales se acoplan al diámetro de cada uno de los extremos de los tubos. Se implementaron en total 3 juntas para unir los 4 módulos. Como se muestra en la figura 67A. Cada una de las juntas al girar, tiene la capacidad de bloquear el recorrido del tubo, asegurando el brazo en la extensión deseada. Al ensamblar cada uno de los módulos se extiende completamente el brazo telescópico y elevarlo manualmente con el fin de verificar el correcto funcionamiento del bloqueo de las juntas, tal como se puede observar en la imagen 67B.



Figura 67. Ensamble del brazo telescópico. A) Juntas de acople del brazo telescópico modular. B) Ensamblaje de módulos del brazo telescópico.

Sistema eléctrico

Siguiendo el diagrama eléctrico realizado en el diseño detallado, se realizan primero las conexiones de las baterías para tener una conexión en paralelo. Para ello se soldaron dos cables de cobre a los bornes de las baterías conectando positivo con positivo y negativo con negativo. Una vez se realizaron las conexiones, se ubicaron ambas baterías en una caja previamente diseñada e impresa en 3D con la finalidad de proteger estos componentes del entorno, tal como se muestra en la figura 68.



Figura 68. Ensamblaje y soldadura de las baterías con la caja de protección.

Por otra parte, se realizó la impresión en 3D de un soporte para el pulsador como se detalla en la figura 69A. Se realizaron las conexiones mediante soldadura con un cable de cobre al pulsador y al switch como se demuestra en la figura 69C. Este soporte posteriormente se fijó en el carro transportador.

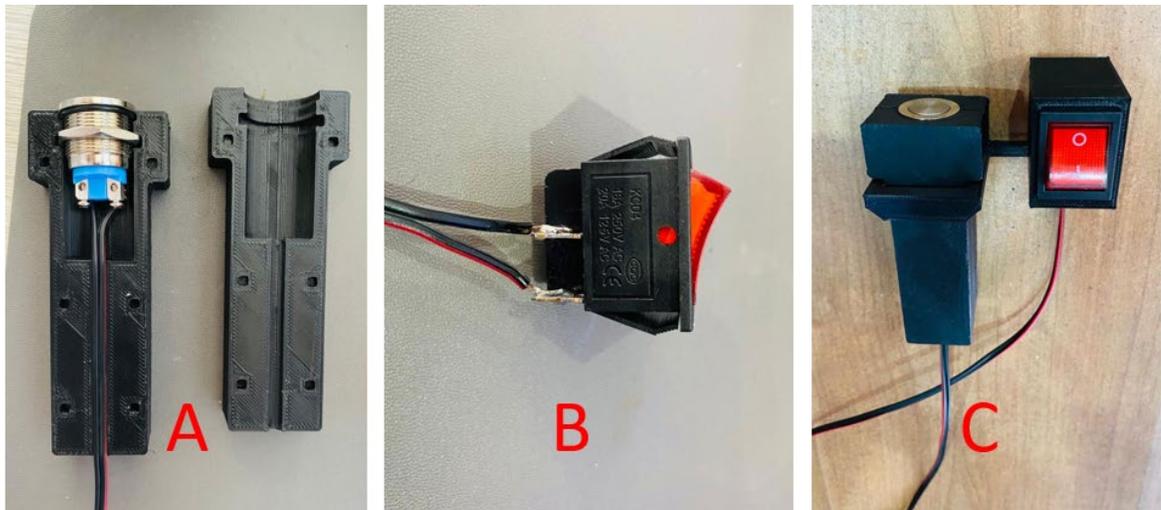


Figura 69. Ensamblaje y soldadura de componentes electrónicos. A: Pulsador. B: Soldadura switch C. Ensamblaje de componentes electrónicos con los soportes

D. Evaluación preliminar del funcionamiento de los componentes del sistema

La evaluación preliminar consistió en verificar el correcto funcionamiento de todos los componentes del sistema. Para ello, los componentes mecánicos fueron puestos a prueba para comprobar su funcionalidad. Por otra parte, las ruedas del carro transportador se probaron realizando un recorrido corto, lo que también permitió la comprobación del funcionamiento del eje de dirección. Por otra parte, tanto el pivote como el brazo telescópico se probaron realizando la manipulación de dichos componentes, en el caso del brazo telescópico, extendiendo y retrayendo cada uno de sus módulos como se puede apreciar en la figura 70A y en caso del pivote del brazo telescópico, manipulando el mismo para verificar su correcto funcionamiento, figura 70B.

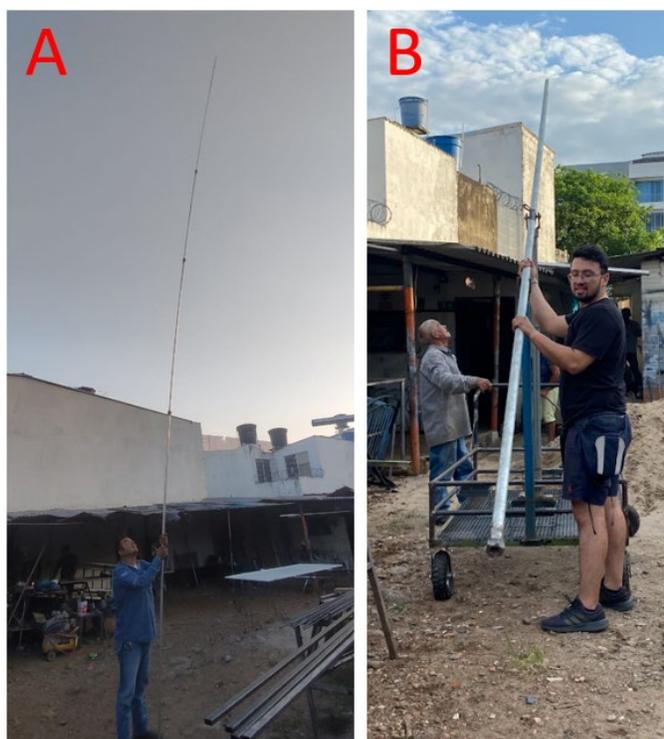


Figura 70. Pruebas preliminares componentes mecánicos A) Funcionamiento módulos del brazo telescópico. B) Funcionamiento eje del brazo telescópico.

El desarrollo tecnológico y la fabricación de elementos para el apoyo de procesos de cultivo son una parte fundamental a la hora de mejorar las labores de campo actuales. La tecnificación en campo conlleva un mayor nivel de control de variables a tener en cuenta, dentro de los sistemas tecnológicos más avanzados actualmente, se tomaron en consideración los equipos mecanizados halados por tractor. Estos desarrollos generan un trabajo automático con menor esfuerzo, pero a costos de adquisición, operación y mantenimiento elevados, así como impactos en el medio ambiente (Ruíz Álvarez et al., 2022). Por esto hacer un prototipo de tracción mecánica con aprovechamiento de energías renovables y asequible a todos los palmicultores es una nueva forma de generar adaptaciones tecnológicas en entornos complejos con la finalidad de resolver las problemáticas históricamente recurrentes en esta importante industria.

Finalmente, los componentes eléctricos se probaron uno a uno. Para el switch y el pulsador se hizo uso de un multímetro para medir la continuidad accionando dichos componentes. En cuanto a las baterías, se midió el voltaje de salida tal como se muestra en la figura 71.

Finalmente se conectó la fuente a la electrobomba y se comprobó que en su entrada succionara líquido y en su salida expulsara el mismo líquido a presión.



Figura 71. Prueba voltaje de salida de baterías conectadas en paralelo.

7.3 FASE 3: EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO

A. Capacidad de ascender y descender y aspersion de ANA.

- Pruebas Control

Para las pruebas control de la capacidad de ascenso y descenso del prototipo fue necesario el uso de una cinta plomada de medición, la cual se instaló en el extremo del brazo telescópico y fijada con bridas plásticas, ver figura 72. Eso se hizo con el fin de poder medir las alturas preestablecidas en las pruebas con exactitud. Para ello se desenrolla la cinta de medición hasta la longitud deseada. Una vez se establece dicha longitud, se levanta el brazo telescópico hasta que el peso de plomo de la cinta de medición se encuentre perpendicular al piso, lo cual indica que la altura del brazo telescópico coincide con la longitud de la cinta de medición.



Figura 72. Cinta plomada de medición para pruebas control.

Una vez instalada la cinta plomada de medición en el brazo telescópico, se realizó la prueba de altura de 3 metros. Para ello no fue necesario extender los módulos del brazo, por lo que con la longitud del primer módulo se logró alcanzar la altura deseada como se muestra en la figura 73A. En cuanto a la prueba control de los 6 metros de altura, fue necesaria la extensión del segundo módulo del brazo aproximadamente 50 centímetros, como es posible ver en la figura 73B, se alcanzó la altura de los 6 metros indicada en la cinta métrica plomada. Por otra parte, para la prueba control de los 9 metros de altura ilustrada en la figura 73C, fue necesaria la completa extensión del módulo 2 del brazo y aproximadamente 50 centímetros del módulo 3, lo anterior corresponde al momento flector presentada al momento de realizar la inclinación del sistema para poder llegar a la altura establecida. Finalmente, en la figura 73D se muestra como la completa extensión de los módulos del brazo telescópico y una gran inclinación del mismo gracias al eje se logró alcanzar la altura máxima de 12 metros.

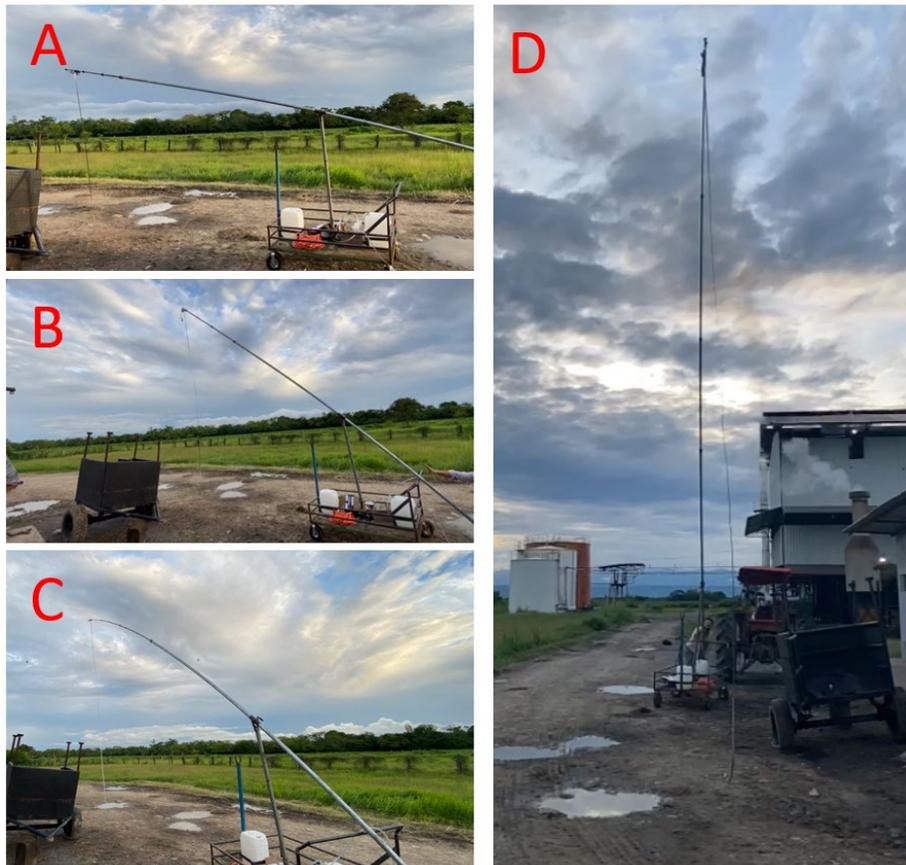


Figura 73. Prueba control de elevación del prototipo telescópico lineal con cinta plomada de medición. A) 3 metros de altura. B) 6 metros de altura. C) 9 metros de altura. D) 12 metros de altura.

- Prueba de aspersión

La prueba de aspersión del prototipo de telescópico se realizó en un lugar controlado con el fin de tener una mejor visualización del área de cobertura. Para ello realizó una cuadrícula en dos pliegos de cartulina blanca cuya área total es de 1.4m² como se muestra en la figura 74.

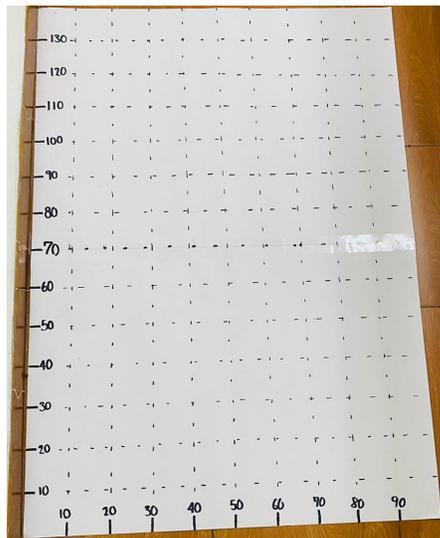


Figura 74. Cuadrícula para pruebas de aspersión

Primero se realizó la prueba con la bomba de diafragma del prototipo, extendiendo la totalidad de la manguera 12 metros y asegurando la boquilla al piso. Se realizó una tinción del líquido a asperjar y se activó el mecanismo de aspersión. El resultado de la cobertura de aspersión fue visible gracias a la tinción del líquido como se ilustra en la figura 75, calculando de esta manera fácilmente el área de cobertura para su posterior comparación.

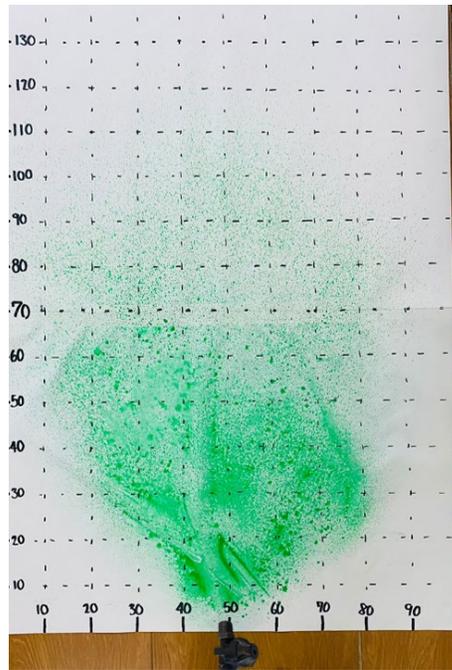


Figura 75. Resultado de cobertura de aspersión de bomba de diafragma del prototipo.

En el mismo lugar controlado y bajo los mismos parámetros se realizó la prueba de cobertura de aspersión de la fumigadora de espala de polinización, herramienta usada para el método actual de polinización, como se muestra en la figura 76. En esta ocasión se realizó la tinción del líquido de color azul para poder ser diferenciado de los resultados de la prueba anterior.

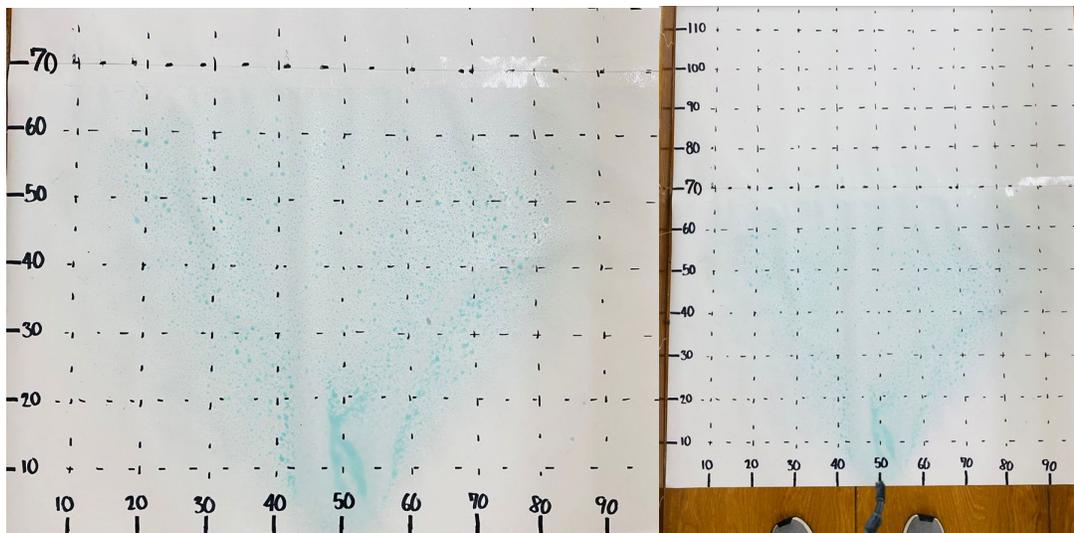


Figura 76. Resultado de cobertura de aspersión de bomba de diafragma del prototipo.

B. Tiempos de ascenso, descenso y aspersión de ANA en un ejemplar de OxG.

- Pruebas en campo

Una vez se transportó el prototipo al Palmar el Quitebe y se obtuvieron los correspondientes permisos para intervenir en los ejemplares del híbrido OxG, se realizó el acompañamiento a los operarios encargados de realizar la polinización asistida de los ejemplares en su etapa de antesis. Como se explicó anteriormente, la polinización de este híbrido con ANA líquido se realiza en 3 ciclos; en antesis, 7 días después y finalmente 14 días después. Esta primera etapa se realizó en el lote “1 de viveros - proyecto 6”, donde se encontraron ejemplares con alturas de 2 a 5 metros. En esa jornada se tomaron datos con respecto al tiempo de polinización de 60 inflorescencias en total, el cual comprende la suma del tiempo de aspersión de cada inflorescencia presente en la palma, el tiempo de ascenso y tiempo de descenso de la herramienta usada para polinizar, así como también el tiempo que tarda el operario para desplazarse entre palmas.

Como resultado se obtuvo un tiempo promedio de aspersión de 2 segundos por inflorescencia. El número de inflorescencias por palma varía para cada ejemplar, por lo que el tiempo efectivo de polinización, cuyo promedio fue de 8.63 segundos, obtuvo una desviación estándar de 1.5. En cuanto a el tiempo de polinización total efectivo (tiempo de polinización + tiempo de movilización) se obtuvo un total de 311.7 segundos o 5.18 minutos para las 60 inflorescencias con un promedio de 14.17 segundos por palma. Los datos detallados de los tiempos tomados en la jornada se pueden visualizar más ampliamente en la tabla 3 del anexo 1.

Por otra parte, la segunda jornada de polinización se realizó con el prototipo telescópico. Gracias a la marcación realizada a las palmas en la jornada anterior, se evaluaron los tiempos efectivos de polinización en los mismos ejemplares, lo resultó en mayor exactitud a la hora de comparar los tiempos de ambos métodos. Como se menciona en la metodología, el método de polinización del prototipo se realiza por cuadrilla. En esta ocasión el tiempo promedio de aspersión fue de 3.55 segundos. En cuanto al tiempo efectivo de polinización se obtuvo un promedio de 41.3 segundos por cuadrilla, es decir por cada 4 ejemplares. Finalmente, el tiempo total de polinización efectivo para las 60 inflorescencias fue de 287.1 segundos o 4.78

minutos. Este proceso de polinización con el prototipo telescópico en palmas del híbrido OxG se puede observar en la figura 77.

Los anteriores tiempos de polinización tanto de método tradicional de polinización como con el prototipo reflejan la efectividad de realizar la polinización con ácido naftalenacético en presentación líquida. La polinización asistida en el mismo híbrido OxG con ácido naftalenacético en presentación sólida presenta un tiempo efectivo total de 10 segundos en ejemplares de hasta 2.5 metros de altura con una inflorescencia presente en la corona, 22 segundos con dos inflorescencias y 35 segundos con 3 inflorescencias (Camperos et al., 2020). De esta manera el método tradicional resulta ser un 13.7% más rápido y el método por cuadrillas del prototipo un 64.5% más rápido en polinización por inflorescencias. Esta diferencia radica en el sistema de aspersión del método tradicional por ácido en polvo, debido a que es más lento el espolvoreo de dicha sustancia por el mecanismo de la bomba insufladora.



Figura 77. Pruebas en campo de capacidad de polinizar palmas del híbrido OxG mediante aspersión de ANA líquido

Por último, se realizó la prueba del prototipo en ejemplares caracterizados en B y C, es decir en ejemplares cuya altura está en un rango de 6 a 12 metros. Para ello fue necesario transportar el prototipo a el lote “7 del P4”, lugar donde se encuentran los híbridos OxG con dichas características. Se realizó la polinización de 4 de los ejemplares, mismos autorizados por el supervisor del palmar. Se pudo comprobar la capacidad del brazo telescópico para ascender hasta los 12 metros, como se muestra en la figura 78, y realizar la aspersión del líquido polinizador en las inflorescencias del híbrido de manera sobresaliente. En el link del anexo 3 se puede observar la polinización realizada en estos híbridos.



Figura 78. Pruebas en campo de capacidad de polinizar palmas del híbrido OxG de categoría C.

C. Comparativa de alcance, tiempo y rango de aspersion entre método tradicional y prototipo telescópico lineal

- Alcance

Mediante las diferentes evaluaciones realizadas al prototipo telescópico en las pruebas tanto en campo como controladas fue posible establecer que en términos de alcance, el prototipo tiene la capacidad de realizar la polinización en ejemplares con altura de hasta 12 metros, capacidad que actualmente ningún método actual posee. Gracias a la información obtenida en la visita al palmar, se pudo confirmar lo encontrado en la bibliografía; en los palmares colombianos a las especies que requieren de una polinización artificial para ser productivas se realiza esta labor a las palmas cuya altura sea inferior a los 5 metros debido a la inexistencia de métodos que permitan alcanzar dicha altura para poder polinizar las inflorescencias. En algunos casos los palmicultores prefieren dejar que la polinización de estos ejemplares se realice naturalmente, aunque esto implique una menor productividad en términos de peso de racimo. Por lo que el presente prototipo supera dicha barrera de la polinización en alturas mayores a 5 metros.

- Tiempo

Las pruebas de campo realizadas en el lote “1 de viveros” en el palmar el Quitebe permiten la comparación en términos de tiempo del método actual de polinización y con el uso del prototipo telescópico. Los resultados arrojan que el tiempo total efectivo para polinizar 60 inflorescencias o 22 palmas es de 5.19 minutos mientras que el tiempo de polinización efectivo total del prototipo telescópico fue de 4.78 minutos, siendo aproximadamente un 8% más rápido, tal y como se observa en la figura 79. Este valor no tiene mayor impacto en la comparación de efectividad en términos de tiempo de polinización efectiva.

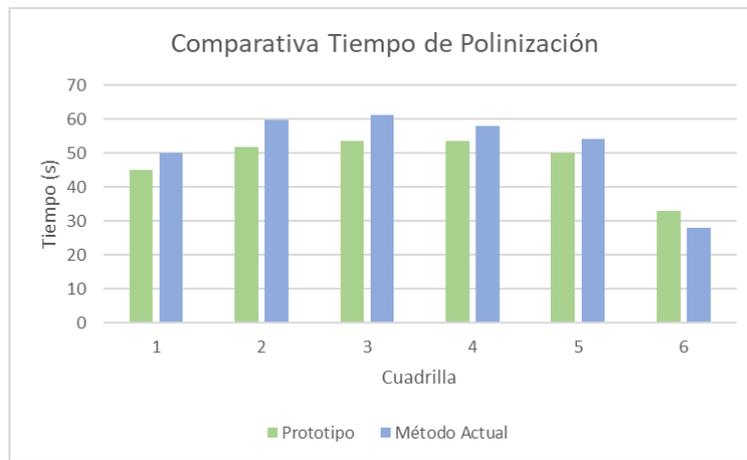


Figura 79. Comparativa de tiempo efectivo de polinización entre método tradicional y prototipo telescópico.

Por otra parte, las pruebas arrojaron que el tiempo que le tomó al operario en movilizarse por cada una de las 22 palmas con las herramientas actuales para realizar la polinización fue de 121.7 segundos o 2.02 minutos, mientras que el tiempo que le tomó al operario del prototipo para realizar el mismo recorrido fue de 39.5 segundos, es decir, un 67.5% más rápido. Lo anterior se atribuye al método de polinización por cuadrillas del prototipo, donde el prototipo se posiciona en la mitad de las 4 palmas circundantes y realiza la aspersión del ANA girando el brazo hasta 360° para alcanzar cada una de las inflorescencias de los ejemplares mientras que con el método actual se tiene que movilizar todo el equipo de polinización palma por palma.

Por último, se obtuvieron datos de ascenso del aspersor a las inflorescencias y descenso con el método actual de 3.2 segundos en promedio por palma, es decir, un total de 70.2 segundos por las 22 palmas. Por otra parte, mediante el uso del dispositivo telescópico los tiempos

registrados corresponden al tiempo en ascender el aspersor a las inflorescencias presentes en las cuatro palmas que conforman una cuadrilla y descender, los cuales fueron de 5.9 segundos por cuadrilla y un tiempo total de 34.9 segundos para las 5.5 cuadrillas de las 22 palmas. El anterior resultado confirma que el ascenso y descenso del aspersor a las inflorescencias de la palma del método de polinización por cuadrillas es un 50.2% más rápido en comparación con el método actual. Los datos anteriormente presentados se pueden analizar con mejor detalle en la tabla 4 del anexo 1.

- Aspersión

La prueba de cobertura de aspersión de la bomba de diafragma arrojó como resultado un área de cobertura calculada en 8413.73cm^2 o 0.84m^2 , mientras que la misma prueba de cobertura realizada en el sistema de aspersión de la fumigadora de espala de polinización, arrojó un área de cobertura de 2677.5cm^2 o 0.27m^2 . En comparación, como se puede apreciar en la figura 79, el sistema de aspersión del prototipo telescópico compuesto por la bomba de diafragma y el aspersor cónico tiene un 68% más área de cobertura que la fumigadora de espala de aspersión.

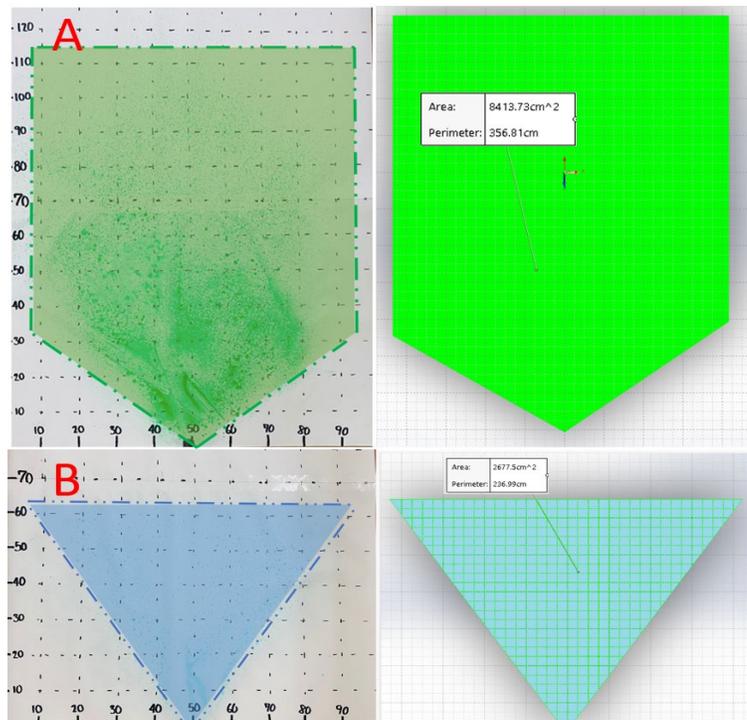


Figura 80. Pruebas de área de cobertura A) Sistema telescópico. B) Fumigadora de espala

Finalmente, en las mediciones realizadas de la longitud de los racimos mostradas en la tabla 3 en anexo 1, el racimo más grande presentó un largo de 37.5 y un ancho de 33.4 centímetros, es decir, un área aproximada de 1252.2cm^2 o 0.125m^2 . Por otra parte, el promedio de los 40 datos obtenidos es de 30.7 centímetros de largo y 27.7 centímetros de ancho. Con esta información se planteó que la presión de la bomba debe permitir que el aspersor cónico ubicado en la punta del brazo telescópico logre asperjar líquido en un área de cobertura mínima de 1252.2cm^2 o 0.12525m^2 para garantizar una correcta cobertura de las inflorescencias del racimo y garantizar la polinización del ejemplar, es por esto que dado al resultado de las pruebas de cobertura se puede asegurar que el sistema de aspersión del dispositivo telescópico cubre por completo los 0.12m^2 del racimo gracias a sus 0.84m^2 de cobertura. El sistema de aspersión del prototipo tiene un área de cobertura similar a los sistemas de riego tradicionales, donde se usa un aspersor sectorial que alcanza un área de aspersión de 0.70m^2 (Ramos M. & Báez D., 2013), por lo cual el sistema de aspersión implementado en el prototipo puede cubrir el área que cubren los aspersores tradicionales en los sistemas de riego.

D. Propuesta de mejora en el diseño del prototipo.

Gracias a las pruebas realizadas tanto en campo como en lugar controlado fue posible identificar posibles mejoras a implementar en el prototipo en una futura etapa, en la cual se pueda mejorar el funcionamiento del prototipo mediante la implementación de diferentes piezas más compatibles con el terreno y el operario. Dichas mejoras se diseñaron para cada uno de los sistemas del prototipo:

Tracción:

El prototipo se diseñó bajo la premisa de que un sistema telescópico lineal con tracción por empuje mejoraría la carga repetitiva que tenían que soportar los trabajadores al realizar su labor; en la NTC 5693-3 expuesta en el marco normativo se especifican las cargas máximas que deberían cargar según el sexo (Hasta 25 kg, si es hombre y hasta 12.5 kg mujer). El método tradicional de polinización no cumple con tal criterio, y como resultado del proyecto se logró reducir la carga en el operario un 100% pero aún se mantiene un esfuerzo por parte

del operario para dar tracción al prototipo. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone realizar una adaptación de sistema para movilizarse mediante tracción animal. Para ello primero se identificó la posibilidad de tracción mediante búfalos, donde se aclara que estos son los animales que comúnmente se utilizan para las diferentes labores de campo en los cultivos de palma, por su potencia de 0.75hp y por su resistencia para caminar largas distancias (Guerrero et al., 2019).

Teniendo claro lo anterior, se adaptaron propuestas de mejoras las cuales están detalladas y relacionadas con las imágenes enunciadas con literales de la siguiente manera:

En la figura 81A se puede observar que el nuevo sistema de tracción tubular se conforma de una estructura que se ajusta al lomo del búfalo, la misma termina con un pin para el acople con el eje de la dirección del carro (figura 81B), sobre el eje de dirección se encuentra un amortiguador que ayudará en el terreno rocoso el cual rotará en función del movimiento del búfalo (figura 81C) hasta 180°, dirigiendo de este modo el prototipo en su nueva versión en función del animal que hala. Esto frente al modelo en pruebas es un importante cambio, dado que la tracción en este se daba por empuje y la dirección la daba el operario ajustando unas llantas giratorias.

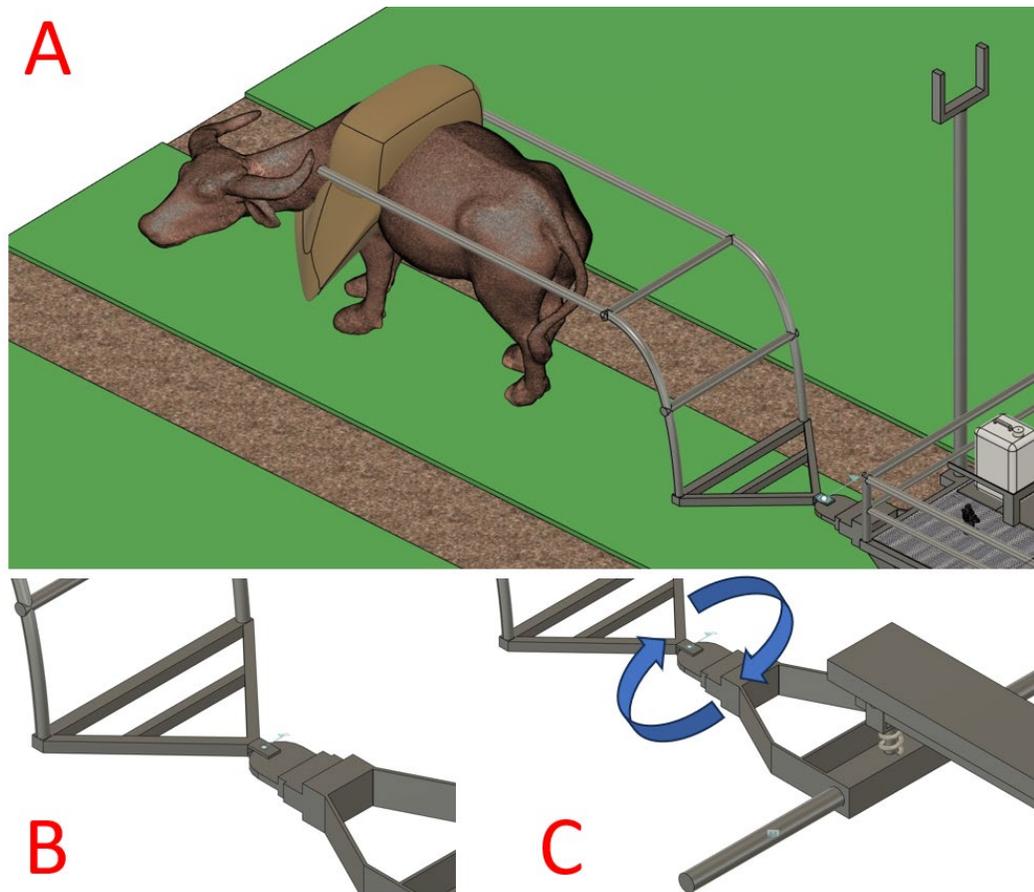


Figura 811. A) Sistema de acople a tracción animal. B) Acople con el eje de dirección. C) Eje de dirección del carro transportador

Ruedas

Como se mencionó anteriormente, en el carro transportador del prototipo la tracción se aplica desde la parte posterior donde se encuentran unas llantas giratorias de 10 pulgadas (Figura 82A), sin embargo, en época de invierno se logró identificar que el diámetro y labrado de la rueda no es el más adecuado, por ello como propuesta de mejora se presenta un tipo llantas de 22 pulgadas, con neumático de 30/280/12 como se observa en la figura 82B y 82C.

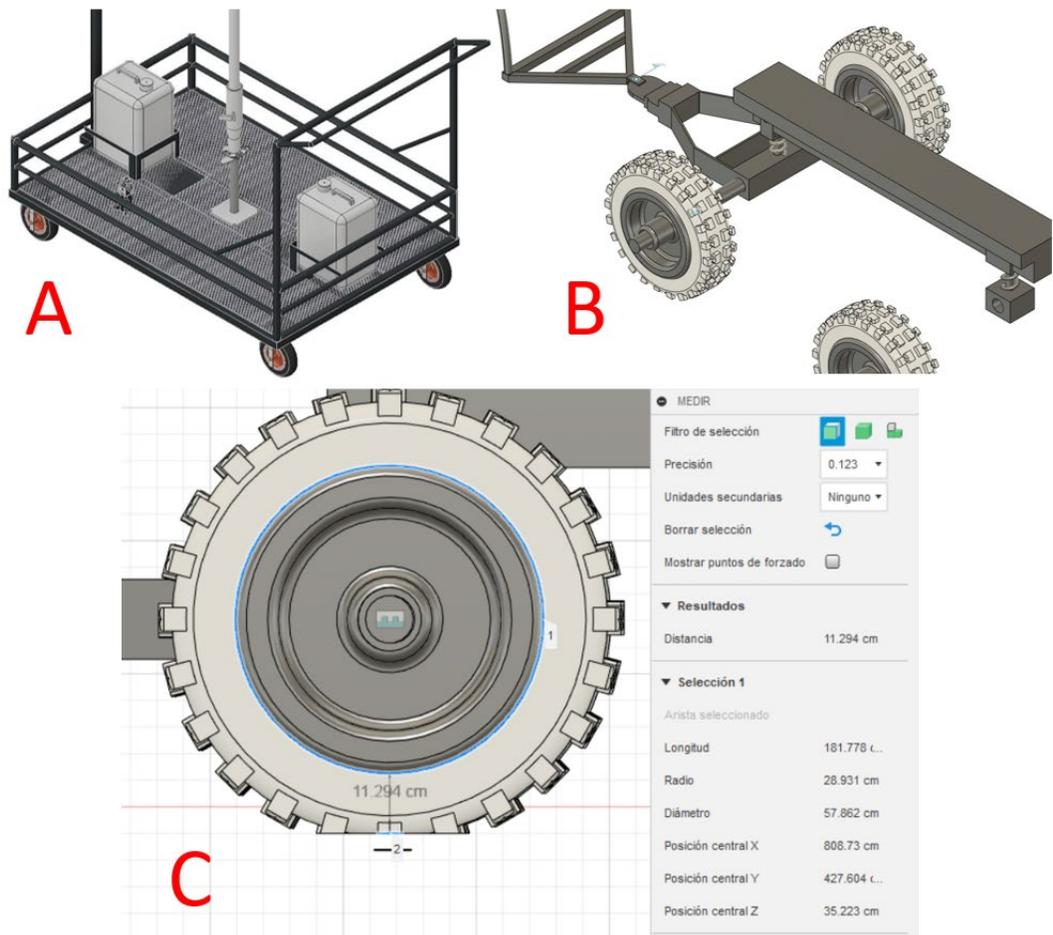


Figura 822. A) Ruedas prototipo base de 8'. B) Sistema de ruedas y eje giratorio. C) Ruedas de 22' de carro transportador

Suspensión

Para el sistema de llantas trasero, se optó por ruedas de la misma dimensión, pero con doble rin para tener mayor área de contacto y sujeción a la hora de moverse por terrenos barrocos, esto agregando el hecho que al pincharse cuenta con llantas capaces de soportar este evento de modo que el trabajador pueda llevarlo al taller o centro de acopio para revisión, evitando así quedarse en medio del cultivo con el prototipo inmóvil. Por otra parte, se propone un sistema de triple amortiguación de funcionamiento individualizado, ver figura 83, que genera la capacidad de ajustar el eje trasero a cualquier obstáculo posible que se presente aun cuando este sea irregular o solo en un lado. El amortiguador presenta una

capacidad de compresión de hasta 25 centímetros, lo suficiente para sortear los terrenos de las callejuelas del palmar.

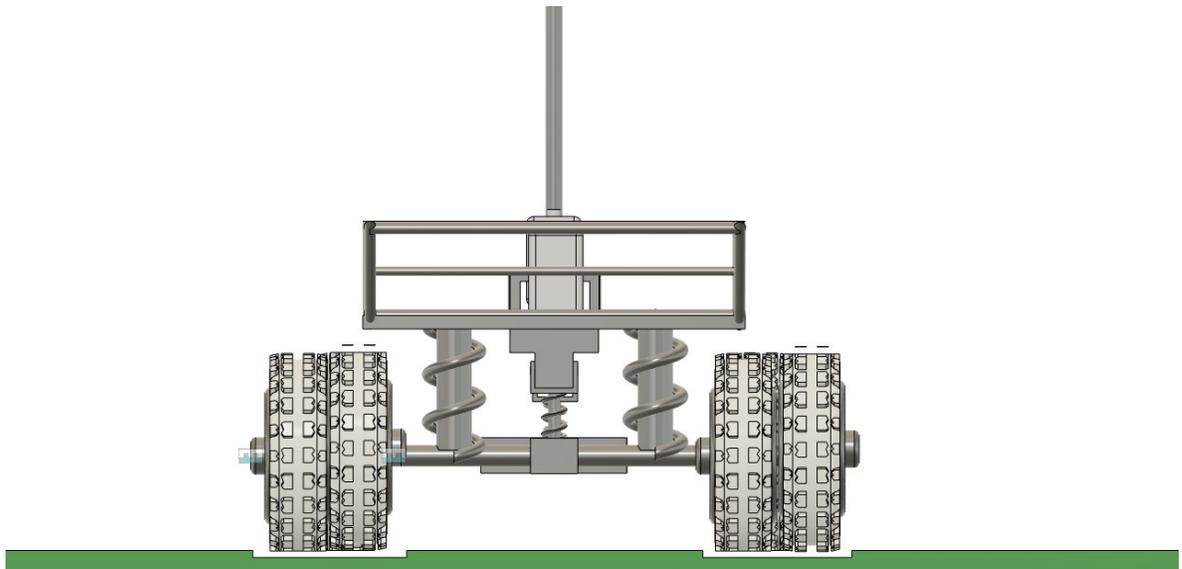


Figura 833. Sistema de triple suspensión de carro transportador

Manubrio

Debido a los cambios en la tracción, la altura de las llantas y la implementación de un sistema de amortiguación, el prototipo paso de medir 35 cm de alto (Figura 84A) hasta la baranda de protección como lo señala la flecha verde, a medir 158 cm (figura 84B), por esta razón se adaptó la baranda de empuje del prototipo para que fuera alcanzable para cualquier operario, como se observa en los círculos azules. De igual manera pese a que el sistema se propone que sea movilizado mediante tracción animal se mantiene el soporte de empuje en caso de la necesidad de mover el carro en cortas distancias, ya sea por atasco o por logística.

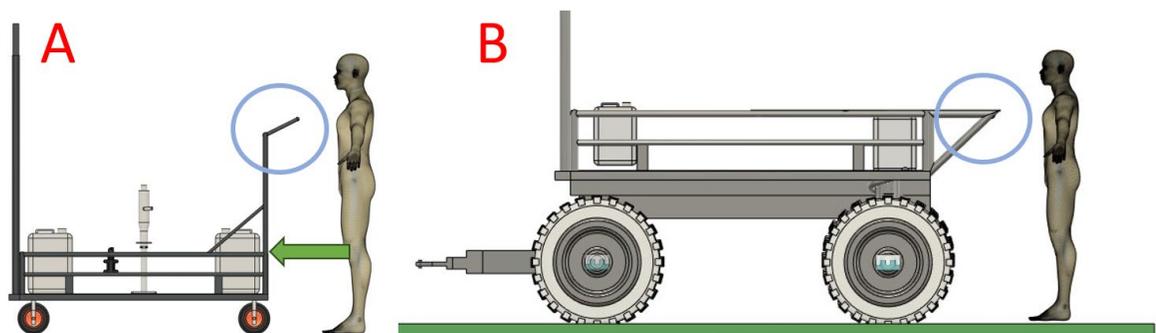


Figura 844. A) Manubrio prototipo base. B) Manubrio prototipo mejorado.

Eje de rotación o Pivote

La siguiente propuesta está dirigida al sistema de eje, el cual pese a contar con una soldadura por electrodo 7018 por el borde de la estructura, se plantea realizar tres refuerzos con el fin de garantizar durabilidad en el trabajo repetitivo o los posibles daños por fatiga. El primero, con el uso de 4 tornillos hexagonales con tuerca soldada en la punta como se señala con los círculos azules en la figura 85A, el segundo es la implementación de cuatro nervios con un patrón circular rodeando el eje roscado como se observa en el círculo rojo en la figura 85A. Por último, se propone un soporte a nivel superior del brazo móvil anclado a 3 partes del carro (Figura 85B), con la finalidad de evitar la fatiga del eje por deflexión y doblaje de alguna de las partes mencionadas.

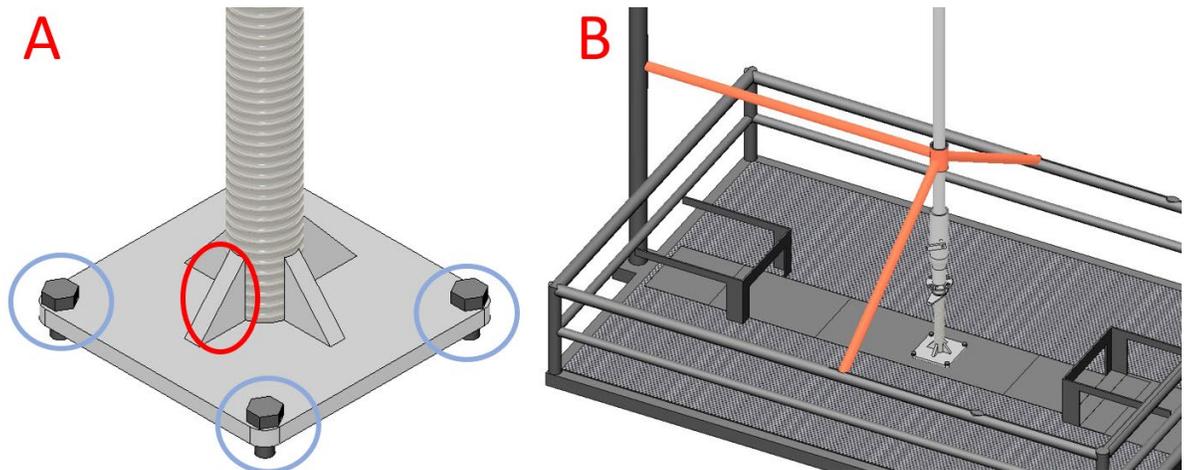


Figura 855. A) Refuerzo en la base del eje giratorio. B) Refuerzo medio del eje giratorio.

Sistema de Manipulación

Otra mejora propuesta, es el sistema de agarre al tubo telescópico, dado que un punto importante de la problemática es la salud del trabajador relacionado con las lesiones presentadas tras la realización de esfuerzos repetitivos con cargas medianas. Se realiza un análisis de momentos generados por el peso de cada sección y la distancia desde su centro de

masa, para identificar el torque a utilizar en el sistema de contrapeso como se observa en la figura 86.

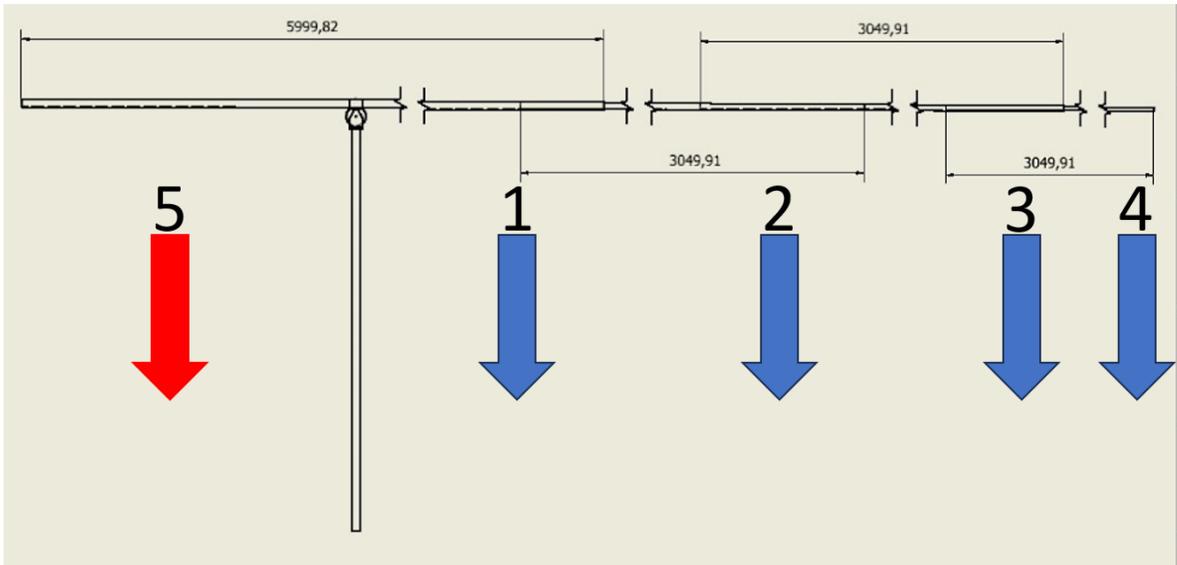


Figura 866. Plano brazo telescópico, identificando los centros de masa de cada sección para cálculo de torque

Para ello, se identifica la distancia antes de después del eje de apoyo:

$$15m - 3m = 12m$$

Pesos de secciones:

$$\text{Tubo 1} - \frac{1}{4} (6m) = 16 \text{ kg} = 78.48 \text{ N}$$

$$\text{Tubo 1 (3m)} = 6 \text{ kg} = 58.86 \text{ N}$$

$$\text{Tubo 3/4 (3m)} = 5 \text{ kg} = 49.05 \text{ N}$$

$$\text{Tubo 1/2 (3m)} = 2 \text{ kg} = 19.62 \text{ N}$$

En este caso, la distancia desde el punto de apoyo hasta el extremo más largo del tubo es de 12 metros. Consecuente con esto la fuerza aplicada para contrarrestar este torque tiene que ser la misma, pero en dirección contraria. De esta manera se procede a calcular los diferentes torques o momentos generados por cada una de las secciones del brazo telescópico en su extensión total después de su punto de anclaje:

$$\tau = Fxd \text{ (positivo a favor de las manecillas del reloj)}$$

$$\tau = 78.48N * 1.5m + 58.86N * 4.5m + 49.05N * 7.5m + 19.62N * 10.5m$$

$$\tau = 1427.26 \text{ Nm}$$

Ahora se procede a despejar la conocer el torque antes del eje de rotación o pivote:

$$\tau = 98.1 N \times 3 m$$

$$\tau = 235.44 Nm$$

Para el caso de la sección con la que el operario manipula el sistema telescópico, el torque es de 235.44Nm, con una diferencia de 1191.82 Nm, por ello se propone como mejora la adaptación de una manija para la movilidad con ambas manos del tubo telescópico, y un sistema de pesas graduable con ajuste de rosca para hacer un torque contrario al peso del tubo telescópico en máxima extensión, esto garantiza un sistema de palancas estable.

$$Disco 20kg = 98.1 N = \tau = 98.1 N \times 3 m = 588.6 * 2 = 1177.2$$

Basado en los cálculos anteriores, el sistema de brazo estaría en equilibrio con 20 kg en el sistema de contrapeso (Figura 87); esto se puede lograr con varias combinaciones de discos de hierro fundido como los que se encuentran en los centros de entrenamiento físico. Con este sistema se puede garantizar que el operario, aun cuando el brazo telescópico esté en su máxima extensión, bastará de un leve impulso para mover el brazo de una forma cómoda entre las diferentes palmas.

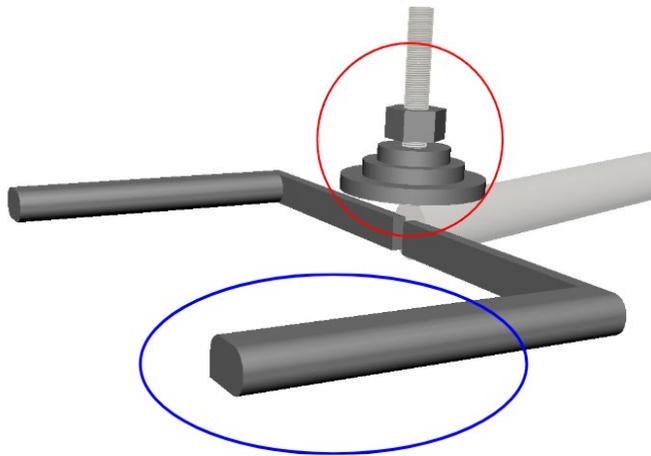


Figura 877. Sistema de contrapeso brazo telescópico Azul) Manija. Rojo) Pesas.

Sistema electrónico

La electrobomba implementada para el sistema de aspersión del prototipo cuenta con las siguientes especificaciones:

- Voltaje de Entrada: 12V (9-14.4V)

- Corriente: 7.5A
- Potencia Nominal: 72W
- Caudal: 6.0L/min
- Presión: 0.90MPa

Teniendo en cuenta que la longitud máxima del brazo telescópico en extensión es de 12 metros con ángulo máximo de 60°, se procede a calcular la pérdida de presión en la manguera de ½' que compone el mecanismo. Para ello se calcula la velocidad de flujo líquido en la manguera, donde la ecuación de continuidad es:

$$A1 * v1 = A2 * v2$$

Donde A1 y A2 son las áreas de las secciones transversales de la manguera en los puntos inicial y final, respectivamente, y v1 y v2 son las velocidades del flujo de líquido en esos puntos. Dado el diámetro de la manguera (154.2mm) se realiza el cálculo del área utilizando la fórmula del área de un círculo: $A = \pi * r^2$, donde r es el radio. Dicha área corresponde a 76.2mm² o 0.0762m². De esta manera, el área de la sección transversal de la manguera (A1 y A2) será entonces:

$$A1 = A2 = \pi * (0.0762)^2 = 0.01823m^2$$

Dado que el caudal (flujo) de líquido es de 6.0 litros por segundo, se necesita convertirlo a metros cúbicos por segundo, ya que el sistema SI utiliza metros cúbicos. Debido a que 1 litro es igual a 0.001 metros cúbicos, por lo tanto, 6.0 litros por segundo es igual a 0.006 metros cúbicos por segundo. Gracias a esta conversión se puede despejar v1 de la ecuación de continuidad:

$$v1 = \frac{(A1 * A2)}{A1}$$

$$v1 = \frac{(0.01823 * 0.006)}{0.1823}$$

$$v1 = 0.006m/a$$

Esto nos da la velocidad del flujo de líquido en la entrada de la manguera. Finalmente, es posible determinar si la presión de la bomba será suficiente para llevar el líquido a través de la manguera calculando la pérdida de presión debido a la fricción en la manguera. Para ello, se utiliza la ecuación de pérdida de presión de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P = \frac{(f * L * \rho * v^2)}{(2 * D)}$$

Donde ΔP es la pérdida de presión, f es el factor de fricción de la manguera, L es la longitud de la manguera, ρ es la densidad del líquido y D es el diámetro de la manguera. El factor de fricción (f) depende del tipo de manguera y las condiciones del flujo. Para una manguera de 152.4 mm de diámetro, se asume un valor típico de 0.02. La densidad del líquido (ρ) dependerá del tipo de líquido que se esté utilizando. Sustituyendo los valores en la ecuación, obtenemos:

$$\Delta P = \frac{(0.02 * 23 * 1000 * 0.006^2)}{(2 * 0.1524)}$$

$$\Delta P = 0.031 Pa$$

De esta manera la pérdida de presión debido a la fricción en la manguera es de aproximadamente 0.031 Pa. Dado que la presión de la bomba es mucho mayor que esto (900,000 Pa), podemos concluir que la bomba es capaz de llevar líquido a presión a través de la manguera de 12 metros de longitud y 152.4 mm de diámetro.

Por otro lado, partiendo de la necesitada de asperjar los recomendados 150cc de Ácido naftalenacético en suspensión líquida en cada una de las inflorescencias de los ejemplares del híbrido OxG, se implementó un nuevo sistema de aspersión, el cual su diseño inicia desde la electrobomba de 12V y su caudal de 6 Litros por minutos. A partir de esta información se empieza calculando el tiempo requerido para poder asperjar exactamente los 150 cc de líquido por cada inflorescencia de la siguiente manera:

$$Tiempo = \frac{Volumen}{Caudal}$$

Dado que la bomba tiene un caudal de 6 litros por minuto, es necesario convertirlo a litros por segundo dividiendo por 60 (el número de segundos en un minuto):

$$\begin{aligned} \text{Caudal de la bomba} &= 6 \text{ litros/minuto} = 6/60 \text{ litros/segundo} \\ &= 0.1 \text{ litros/segundo} \end{aligned}$$

Después es necesario convertir el volumen del contenedor a litros, ya que el caudal de la bomba está en litros por minuto. 150cc es equivalente a 0.150 litros. Sustituyendo los valores en la fórmula:

$$\text{Tiempo} = \frac{0.150 \text{ litros}}{0.1 \text{ litros por segundo}}$$

$$\text{Tiempo} = 1.5 \text{ segundos}$$

Entendiendo los requisitos de aspersión, se realiza el diseño del circuito a implementar, donde el operario al apretar un pulsador activará el sistema electrónico que se encargará de activar la electrobomba por los 1.5 segundos requeridos para asperjar el ácido naftalenacético en las inflorescencias de un racimo. Primero, se selecciona el componente encargado de realizar la función de temporizador y se realiza su configuración.

NE555

El NE555 es un circuito integrado que se utiliza ampliamente en electrónica. Es un temporizador o generador de señales que puede operar en diferentes modos, como monoestable (one-shot), astable (oscilador) y biestable (flip-flop). El NE555 consta de una serie de componentes internos, incluyendo comparadores, amplificadores operacionales, resistencias y capacitores. Estos componentes permiten configurar el NE555 para realizar diferentes funciones, dependiendo de cómo se conectan sus pines y de los valores de los componentes externos utilizados.

Para la aplicación de temporizador que se implementará en el circuito, se configuró en modo monoestable (one-shot), el NE555 se utiliza para generar un pulso de duración fija cuando se activa. Este modo se utiliza, por ejemplo, para temporizar eventos o para generar pulsos de control.

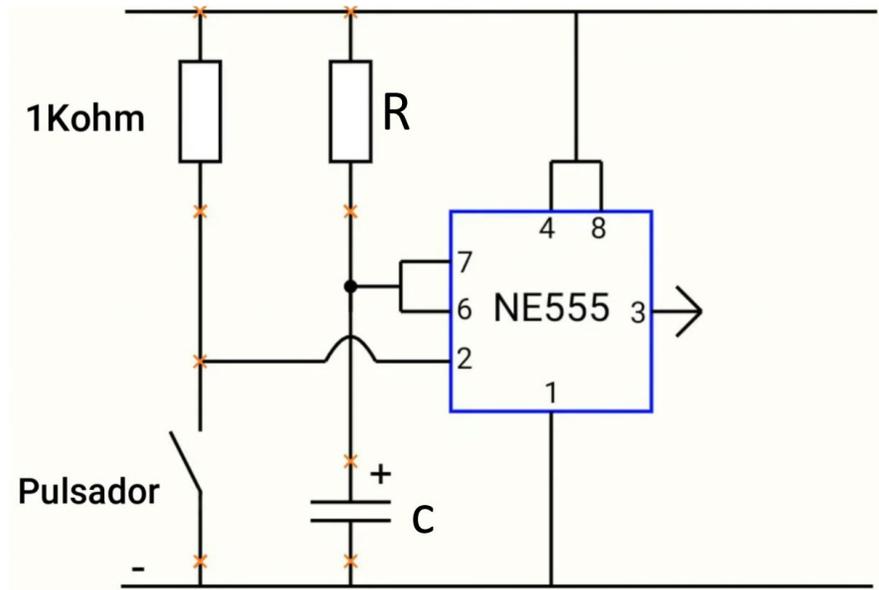


Figura 887. Diagrama circuito de NE555 en configuración monoestable

Una vez se tiene clara la configuración que se va a implementar, se calculan los valores de la resistencia R y el condensador C mediante la fórmula para que el tiempo del pulso fijo generado sea de 1.5 segundos:

$$T = 1.1 * R * C$$

$$1.5 = 1.1 * R * 0.000047F$$

$$1.5 = 1.1 * R * 0.000047F$$

$$1.5 = 1.1 * 29013.53\Omega * 0.000047F$$

Usando valores comerciales tanto de resistencias como de capacitor se tiene que:

$$1.5 = 1.1 * 29k\Omega * 47\mu F$$

Teniendo en cuenta los anteriores valores calculados, la configuración del controlador y los requerimientos a cumplir con el sistema electrónicos se realizó el diseño final del sistema electrónico:

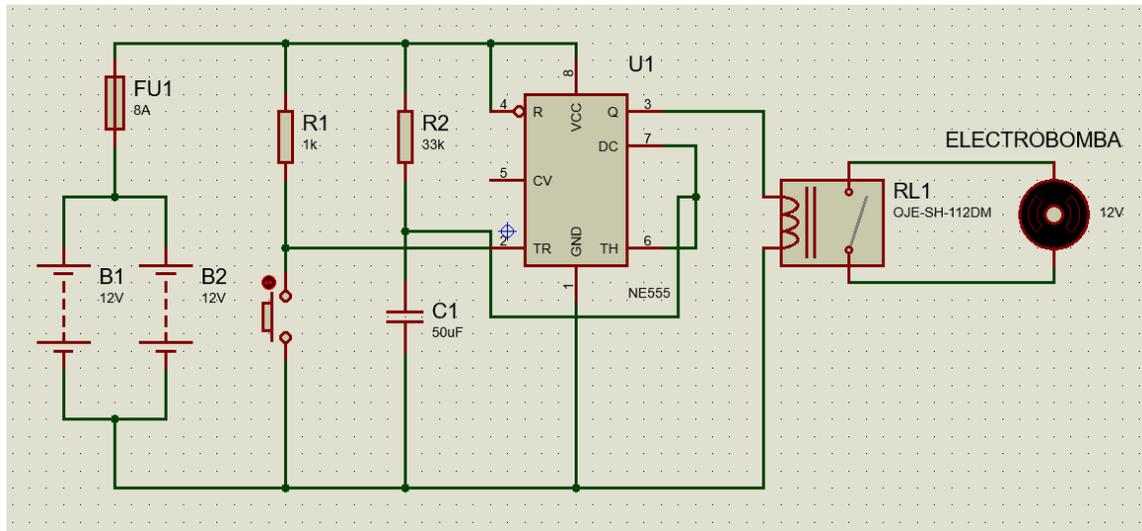


Figura 897. Diagrama circuito del sistema electrónico de prototipo mejorado

En este se utilizan dos baterías con autonomía de hasta 2.5 horas de uso continuo conectadas en paralelo, seguido de un fusible de 8A de protección. La configuración monoestable del NE555 activa un relé que, al general el pulso de 1.5 segundos, permitirá el paso de corriente eléctrica por dicho tiempo. De esta manera el operario se encargará de ubicar la punta del brazo telescópico lo más cerca posible de las inflorescencias y activará el sistema electrónico por medio de un pulsador y observará la aspersión el ácido naftalenacético por 1.5 segundos por cada inflorescencia, es decir, 150cc del líquido.

Por último se presenta una vista general en 3D de lo que sería la nueva versión del prototipo telescópico lineal con tracción animal en pruebas de campo (Figura 88).

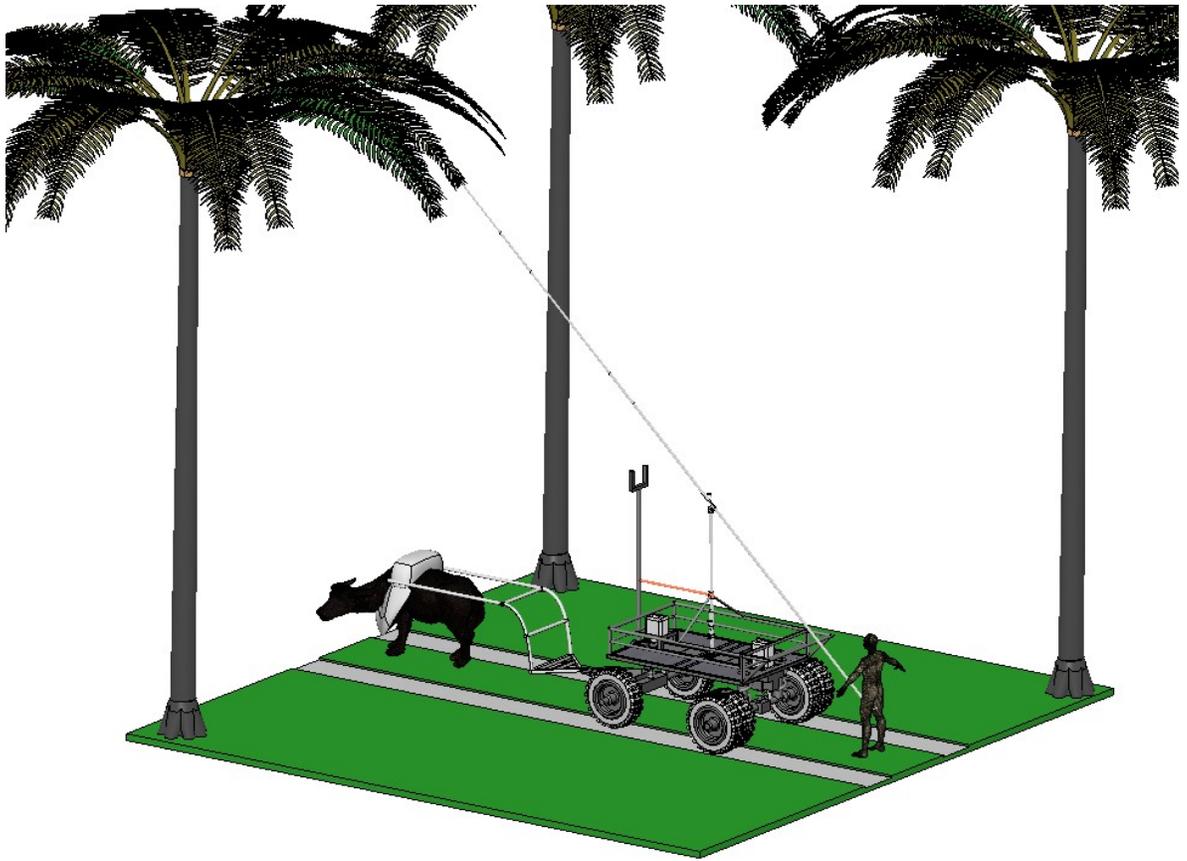


Figura 908. Diseño final de prototipo mejorado

VII. CONCLUSIONES

En el desarrollo del prototipo telescópico fue imprescindible la visita al palmar para conocer el terreno donde se implementó el prototipo, realizar el acompañamiento en la labor de polinización en los híbridos OxG con el método actual para conocer sus limitaciones, ventajas y desventajas con el fin de poder asistir de dicha labor de una manera más eficiente. Por otra parte, fue posible conocer la morfología y características del híbrido, permitiendo categorizar los ejemplares en función de su altura. Finalmente se reconocieron los posibles obstáculos presentes en la palma que dificultan la labor de la polinización en las inflorescencias.

Gracias al diseño asistido por computadora (CAD), fue posible simular las cargas presentes en el brazo telescópico y elegir el material más adecuado para la polinización asistida. También se logró plantear un método eficiente de polinización gracias a la distribución espacial modelada en el CAD, donde el prototipo se ubica en la mitad de una cuadrilla (4 palmas distribuidas de forma cuadrada), levantando el brazo telescópico hasta la altura de las inflorescencias y girando el mismo 360° para la aspersion de los 4 ejemplares. Dichos diseños ayudaron a la distribución de peso de los diferentes componentes para lograr un buen equilibrio en el prototipo y el menor punto de gravedad.

En las pruebas del prototipo en campo y su posterior comparación con el método actual de polinización se pudo concluir que el prototipo telescópico es un 51% más eficiente en términos de tiempo que el método actual, evaluando el tiempo total efectivo de polinización, es decir, el tiempo de aspersion, tiempo de movilización entre palmas y tiempo de ascenso y descenso del aspersor hasta cada una de las inflorescencias presentes en cada ejemplar. Una de las variables con mayor diferencia entre ambos métodos fue el tiempo de movilización entre palmas debido a que en el método actual el operario se desplaza linealmente por cada una de las palmas, mientras que en el mismo recorrido lineal con el dispositivo telescópico se polinizan 4 palmas, siendo entonces un 67.5% más efectivo.

Después de llevar a cabo las pruebas del prototipo para polinizar la palma de aceite en las categorías B y C, se ha podido concluir con éxito que es posible realizar la polinización en grandes alturas sin poner en riesgo la salud o integridad de los operarios. Aunque no existen formas de comparar la eficiencia en términos de tiempo con otras categorías debido a la falta de opciones de polinización, este avance ofrece la posibilidad de crear nuevos empleos y realizar ensayos para establecer protocolos eficientes de polinización que puedan generar mayores réditos. En resumen, esta nueva herramienta puede tener un gran impacto en la industria de la palma de aceite y abrir nuevas oportunidades para mejorar la productividad y eficiencia en la polinización de estas categorías.

Por otra parte, aunque no se realizó una evaluación ergonómica, fue posible apreciar cualitativamente las diferencias en ambos métodos para realizar la polinización en palmas, por una parte, el método actual requiere mayor esfuerzo físico al cargar las herramientas y el contenedor de ANA líquido, sumando hasta 30Kg de carga mientras que el prototipo tiene la capacidad de almacenar el doble de contenedores de ANA, las herramientas y sistema de aspersión sin implicar ninguna carga al operario. Para la manipulación del carro transportador es posible traccionar manualmente o se puede acoplar a un sistema de tracción motora. Por otra parte, el esfuerzo para levantar la vara de aluminio y alcanzar las inflorescencias en el método actual implica una gran cantidad de fuerza para realizar el torque que permite la elevación del dispositivo mientras que con el prototipo esta labor se facilita gracias al diseño de eje que junto con el brazo telescópico funciona como una balanza mecánica en la que el torque necesario para realizar su elevación es mucho menor en comparación con el anterior método.

En cuanto al área de aspersión se logra identificar que el área mínima necesaria para cubrir los racimos con inflorescencias es de 0.125m^2 , por lo que gracias a las pruebas de aspersión del prototipo se evidenció un área de cobertura de 0.84m^2 , confirmando la buena capacidad de cobertura del sistema telescópico, que al ser comparada con el método actual cuya área fue de 0.27m^2 , representa un 68% más área de cobertura para polinizar las inflorescencias del híbrido.

Finalmente, el desarrollo del prototipo telescópico lineal para solucionar la problemática identificada fue un gran logro que permitió aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera de bioingeniería. Esta problemática incluía factores de salud como alteraciones músculo esqueléticas por esfuerzos repetitivos y mala postura, así como de seguridad alimentaria debido al escaso llenado de frutos y la formación de racimos partenocárpicos. Además, el prototipo también incorporó la utilización de sistemas que aprovechan energías renovables, como las baterías que se recargan con paneles solares y alimentan la bomba.

VIII. RECOMENDACIONES

Es importante destacar que durante las pruebas de campo realizadas se presentaron condiciones climáticas adversas debido a la temporada de invierno, lo que resultó en inundaciones en gran parte de la plantación debido a las intensas lluvias en la zona, así como la presencia de arroceras. A pesar de estos desafíos, se lograron identificar varias áreas de mejora, considerando el impacto en el bienestar del trabajador y la calidad del trabajo en sí. Cabe mencionar que la implementación de estas mejoras requerirá un presupuesto mayor para la elaboración del producto, así como la consideración de otros factores socioeconómicos.

- Es importante señalar que en el prototipo se utilizaron llantas de 10 in, lo que generó ciertas dificultades al transitar en terrenos con mucho barro. Se ha identificado que el uso de llantas con un diámetro mayor permitiría mejorar la comodidad en el andar, y consecuentemente al aumentar la altura del carro se podría reducir la vibración al circular por terrenos irregulares. Asimismo, el uso de llantas con un rin mayor permitiría una mayor tracción y estabilidad al ser jalado con algún vehículo o animal. Por lo tanto, se sugiere considerar el uso de llantas con un tamaño superior.
- Se ha incorporado en el diseño un soporte delantero en forma de "U" para permitir el reposo del tubo telescópico cuando se extiende o se moviliza. Sin embargo, se ha identificado que sería beneficioso contar con un sistema de ajuste de altura, que permita bloquear el soporte en diferentes posiciones mediante un pin, y así adaptarlo a las necesidades específicas del trabajador. De esta manera, se podrá graduar la altura del soporte para que el brazo descansa en diferentes ángulos, según lo requiera el usuario. La implementación de esta mejora contribuirá a mejorar la ergonomía del operador, reduciendo la fatiga muscular y mejorando la eficiencia en el trabajo.
- Se ha identificado que otro aspecto que requiere mejora es el material utilizado en la construcción de los tubos telescópicos. Si bien el uso de tubos IMC de acero galvanizado proporciona ductilidad y resistencia a la flexión, llega un punto donde la deflexión es inevitable, lo que limita la altura máxima del sistema. Aunque en teoría el sistema podría alcanzar una altura de 15 metros, la deflexión puede reducir la altura

útil en hasta 3 metros. Por lo tanto, se propone estudiar otros materiales o formas para reducir este problema, o diseñar sistemas que incorporen guayas para contrarrestar la deflexión de los tubos sin afectar su funcionalidad. La implementación de esta mejora permitiría lograr mayores alturas de trabajo sin comprometer la estabilidad y seguridad del sistema, mejorando así la eficiencia en el trabajo.

- Se ha identificado que el sistema pulsador cableado actual del prototipo puede presentar limitaciones en términos de su eficiencia y comodidad de uso, dado que puede llegar a enredarse con alguna parte del carro o generar dificultad para accionarlo mientras se tiene el tubo. Para mejorar esta situación, se sugiere implementar un pulsador a distancia que permita activar el sistema sin la necesidad de cables. Esto no solo reduciría el riesgo de enredos y daños en el cable, sino que también permitiría una mayor flexibilidad en la operación del equipo. Además, el uso de un pulsador a distancia permitiría que el prototipo pueda ser manipulado por una sola persona con mayor eficiencia. Por lo tanto, se recomienda explorar la posibilidad de incorporar un pulsador inalámbrico o a distancia en futuras versiones del prototipo.
- Se ha observado que el eje central de giro del prototipo consta de un tubo que encaja en una pieza con una parte tubular de mayor diámetro, y ambos se ensamblan en un eje roscado. Con el objetivo de mejorar la seguridad y estabilidad del prototipo, se recomienda diseñar un refuerzo con puntos de anclaje en cada lado del carrito. De esta manera, se evitará que el brazo telescópico se balancee bruscamente en terrenos desnivelados, lo que aumentará la seguridad del operario y permitirá una mayor precisión en el trabajo. Además, este refuerzo proporcionará un mayor soporte al operario, lo que le permitirá utilizar el sistema por más tiempo y aplicar mayor fuerza si así lo requiere a la hora de mover el brazo.
- Con el objetivo de mejorar la productividad del proceso de polinización, se sugiere realizar pruebas de eficiencia y rentabilidad. Es importante determinar la forma adecuada de recorrer las calles de cultivo durante la polinización y comparar los resultados obtenidos por dos operarios frente a uno solo. Esto permitirá determinar cuál es la forma más eficiente de realizar la tarea y aumentar la productividad del proceso. Además, al realizar estas pruebas se podrán identificar posibles errores o

fallos en el proceso que puedan estar afectando la calidad de la polinización y corregirlos para mejorar los resultados.

- En términos agronómicos, se sugiere realizar análisis de crecimiento y llenado de frutos en palma alta que dejó de ser polinizada después de los 3 metros y en palma que se sigue polinizando, con el fin de establecer rangos ideales de tiempo para la polinización. Es importante considerar que la hormona utilizada puede perder eficacia en algún momento y que el gasto en esta labor debe reflejarse en un aumento en el crecimiento de los frutos.
- Finalmente, se sugiere estudiar la compatibilidad del prototipo y su método de polinización con los animales presentes en los palmares, tales como bueyes, para que estos sean los encargados de otorgar la tracción al prototipo con el fin de eliminar el esfuerzo requerido para el operario de transportar el prototipo a lo largo del palmar para realizar la labor de la polinización.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, Elizabeth Ruiz, Edison Steve Daza, Kennyher Caballero Blanco, y Mauricio Mosquera-Montoya. (2020). “Análisis Económico de La Polinización Artificial En Cultivos híbrido OxG (*Elaeis Guineensis* x *Elaeis Oleifera*).”

Arsad, Hasniyati, Nur Ashikin Psyquay Abdullah, Nor Muhammad Mahadi, Choon Weng Lee, y Choong Heng Yen. (2014). “Field Evaluation of Basal Stem Rot Tolerance in Oil Palm (*Elaeis Guineensis*) Progenies.” *Journal of Oil Palm Research* 26 (4): 363–70.

Arunachalam, Vadivel. (2011). *Genomics of Cultivated Palms*. Elsevier.

Barba, Julián. (2019). “Oleíferas Ecuatorianas Alternativa de Manejo Agronómico Para Compensar Las Pérdidas Ocasionadas Por La Pudrición Del Cogollo En América Latina.” *Orellana, Ecuador*.

Bastidas Pérez, S. (2013). Vista de Híbrido OxG Corpoica Elmira de palma de aceite, Avances en el desarrollo de materiales genéticos resistentes a la PC. Publicaciones fedepalma. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10857/pdf_4

Bastidas Pérez, S., Tolosa Montaña, W., & Darith Montero, Y. (2020). Híbrido interespecífico O×G de palma de aceite Una alternativa de producción para zonas afectadas por pudrición del cogollo. Colección Transformación del Agro.

Bernal, N et al. (2001). “El Cultivo de La Palma de Aceite y Su Beneficio: Guía General Para El Nuevo Palmicultor.”

Billotte, Norbert. (2019). “Desarrollo de Herramientas Genómicas Para El Mejoramiento de Palma de Aceite. El Proyecto OPGP.” *Revista Palmas* 40 (Especial T): 121–29.

Cabot, PE, y M Llauradó. (2004). “Estudio de La Capacidad de Propagación Vegetativa de Diferentes Especies Con Potencial Ornamental Mediante Tratamientos Hormonales.” In *II Jornadas Ibéricas de Plantas Ornamentales: V Encuentro Nacional de Plantas Ornamentales Organizado Pela Associação Portuguesa de Horticultura, VI Reunión Del Grupo de Ornamentales de La Sociedad Española de Ciencias Hortícolas*, 251–56. Associação Portuguesa de Horticultura.

Camperos J., Pulido N., Munévar D., Torecilla E., Requena J., Arias H., & Mosquera M. (2020). “Estudio de tiempos y movimientos para la labor de polinización artificial con ANA en polvo en una plantación de la Zona Central”. Cenipalma

Chicaiza, Jonathan Alexander Casa, y Oscar Javier Villarroel Guerrero. (2016). “CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA TELESCÓPICO MANUAL CON ALCANCE DE

10 (m) PARA PORTAR UNA CÁMARA DE 30 (KG) UTILIZADA PARA FILMACIÓN.” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.

Fedepalma Federación Nacional de Palma de Aceite. (2021). “Minimum Wage in Colombia and the Oil Palm Sector SUPPORTED BY THE OIL PALM DEVELOPMENT FUND.” <https://doi.org/9789585492165>.

Daza, Edison, A Pardo, Norman Urrego, I Ayala, Rodrigo Ruiz, y Hernán M Romero. (2016). “Evaluación Del Uso de Hormonas Sobre La Formación de Frutos Partenocárpicos En El híbrido Interespecífico OxG.” *Poster XIII Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite, Bogotá, Colombia*.

Diaz, Evelyn Karina Tinoco, Fernanda Idilia Bravo Bravo, y Franklin Roberto Franklin Roberto Bueno Moyano. (2022). “El Uso de Datos y Sistemas Organizacionales En La Producción de Aceite Palma (*Elaeis Guineensis*) En Colombia, Ecuador y Perú: The Use of Data and Organizational Systems in the Production of African Palm Oil (*Elaeis Guineensis*) in Colombia, Ecuador, and Peru.” *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando* 3 (1).

España, Martha, Felipe Leguizamón, y Iván Ochoa. (2016). “Análisis Comparativo de La Polinización Asistida Vs.libre Polinización En Dos Edades de Siembra Del Híbrido Unipalma OxG.” *ElcidPalmero*.

Estupiñán, Gustavo Rosero, y Libardo Santacruz Arciniegas. (2014). “Efecto de La Polinización Asistida En La Conformación Del Racimo En Material híbrido OxG En La Plantación Guaicaramo SA.” *Revista Palmas* 35 (4): 11–19.

Fan, K.-C. (2004) ‘Design analysis and applications of a 3D laser ball bar for accuracy calibration of Multiaxis Machines’, *Journal of Manufacturing Systems*, 23(3), pp. 194–203. doi:10.1016/s0278-6125(05)00009-9.

Farfán, Mónica. (2021). “UDES Lidera Proyecto de Cocreación de Nuevo Dispositivo de Polinización de Palma de Aceite.” 2021. www.marte.mar.

Fawakherji, Mulham, Ciro Potena, Alberto Pretto, Domenico D Bloisi, y Daniele Nardi. (2021). “Multi-Spectral Image Synthesis for Crop/Weed Segmentation in Precision Farming.” *Robotics and Autonomous Systems* 146: 103861.

Fold, Niels, y Lindsay Whitfield. (2012). *Developing a Palm Oil Sector: The Experiences of Malaysia and Ghana Compared*. 2012: 08. DIIS Working Paper.

Fomento Palmero. (2019). “Mejores Prácticas Agroindustriales Del Cultivo de La Palma de Aceite En Colombia.”

Forero, H, C Diana, M Hormaza, A Paola, A Romero, M Hernán, M Ruíz, et al. (2010). “Fenología de La Palma de Aceite Africana (*Elaeis Guineensis* Jacq.) Y Del híbrido Interespecífico (*Elaeis Oleifera* [Kunt] Cortes x *Elaeis Guineensis* Jacq.)”

Franco, B, N Pedro, et al. n.d. “Tecnologías Para La Agroindustria de La Palma de Aceite. Guía Para Facilitadores. Calificación de Nivel Tecnológico de Las Plantaciones de Palma de Aceite.”

Galaz, Victor, Miguel A Centeno, Peter W Callahan, Amar Causevic, Thayer Patterson, Irina Brass, Seth Baum, et al. (2021). “Artificial Intelligence, Systemic Risks, and Sustainability.” *Technology in Society* 67: 101741.

García, Alejandra Milena, Didier Fernando Ibagué, Daniel Eduardo Munévar, Juan Sebastián Hernández, y Mauricio Mosquera-Montoya. (2020). “Polinización Artificial ¿ANA Líquido o ANA Sólido?” *Revista Palmas*.

García, A., B. Pérez, y C. Sánchez. (2016). “Producción de Aceite de Palma: Alta Eficiencia y Diversidad Genética.” *Revista Internacional de Biodiversidad y Conservación* 10 (2): 12–20.

García, Jesús, Mónica Cárdenas, y Edgar Eduardo Yáñez. (2010). “Generación y Uso de Biomasa En Plantas de Beneficio de Palma de Aceite En Colombia.” 2. *Revista Palmas*. Vol. 31.

García, M. (2018). “La Palma Aceitera: La Semilla Oleaginosa Más Productiva Del Mundo.” *Revista Internacional de Agricultura y Ganadería* 25 (1): 20–26.

García, Alejandra Gallego, Rodrigo Andrés Ávila, Stephany Guataquira, Iván Mauricio Ayala Díaz, y Hernán Mauricio Romero. (2020). “Desempeño de Clones de Palmas de Aceite (*Elaeis Guineensis* Jacq.) Sobrevivientes a La Pudrición Del Cogollo Establecidos En La Zona Suroccidental Palmera de Colombia.” *Cenipalma*.

García Alejandra M., Didier F Ibagué, Daniel E Munévar, Juan S Hernández, y Mauricio Mosquera. (2021). “Polinización Artificial: ¿ANA En Suspensión líquida o ANA En Mezcla sólida?” *Revista Palmas* 41 (4): 15–26.

González, Andrés Fernando, Isabel Cristina Jiménez, Manuel Rodríguez Susa, Silvia Restrepo, y Jorge Mario Gómez. (2008). “Biocombustibles de Segunda Generación y Biodiesel: Una Mirada a La Contribución de La Universidad de Los Andes.” *Revista de Ingeniería*, no. 28: 70–82.

Goren, R, y Martín J Bukovac. (1973). “Mechanism of Naphthaleneacetic Acid Conjugation: No Effect of Ethylene.” *Plant Physiology* 51 (5): 907–13.

Guaqueta C. & Baquero D. (2018). "FUMIGADORA DE ESPALDA CON CONTROL ELECTRÓNICO DE FLUJO". Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Colombia.

Guataquira, Stephany, Arley Fernando Caicedo, Norman Urrego, Edison Steve Daza, Iván Mauricio Ayala, Rodrigo Ruíz Romero, y Hernán Mauricio Romero. (2019). “Respuesta de

Diferentes Híbridos OxG a La Polinización Artificial (ANA-Líquido) En La Zona de Tumaco.” *Revista Palmas*.

Guerrero L., I., Napolitano, F., Mota R., D., & Orihuela, A. (2019). El búfalo de agua en las Américas: Enfoques prácticos y experimentales (2da ed.). Recuperado de <https://bmeditores.mx/entorno-pecuario/descargas/el-bufalo-de-agua-en-las-americas-2a-edicion/?ver>

Haran, Julien, Raphael Abanda, Laure Benoit, Claude Bakoumé, y Laurence Beaudoin. (2020). “Multilocus Phylogeography of the World Populations of *Elaeiodobius Kamerunicus* (Coleoptera, Curculionidae), Pollinator of the Palm *Elaeis Guineensis*.” *Bulletin of Entomological Research* 110 (October): 654–62. <https://doi.org/10.1017/S0007485320000218>.

Hartley, Charles William Stewart, Eduardo Maldonado, et al. (1983). “La Palma de Aceite.”

Hyo Jik Lee, Byung Suk Park, Jong Kwang Lee & Ki Ho Kim. (2012). "TELESCOPICTUBE SET FOR BRIDGE TRANSPORT SYSTEM" (US8231096B2). United States.

Ishizaka, A., and Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Syst. Appl.* 38:14336–45. doi: 10.1016/j.eswa.2011.04.143

Jiménez, J. (2002). “El Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, Metodología y Aplicaciones.” *Recta Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA* 1: 28–77.

Kaner, C., & Bach, J. (2018). Testing computer software. John Wiley & Sons.

Khalid, Zahra Bakhia, Razu Ahmed, Imrul Kaish, Md Ullah, et al. (2015). “Pole Climbing Robot for Connecting Distribution Lines.” PhD thesis, BRAC University.

Kumar, S. A., & Sivakumar, K. (2017). Telescoping linear actuators: A review. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(8), 3857-3869. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0743-2>

Kushairi, A, and Mohd Din Amiruddin. (2020). “Development of New Oil Palm Cultivars in Malaysia.” *Journal of Oil Palm Research* 32 (3): 420–26.

Li, H., & Jia, W. (2020). Design of a linear telescope with high-accuracy positioning capability. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(1), 222-232. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2954458>

Liu, J., Xue, Y., & Hu, Y. (2019). Theoretical analysis and simulation of the kinematics and dynamics of a novel telescopic linear actuator. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 47(1), 34-48. <https://doi.org/10.1080/15397734.2018.1465241>

Liu, Y, M Hajj, and Y Bao. (2022). "Review of Robot-Based Damage Assessment for Offshore Wind Turbines." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158: 112187.

Longo, Domenico, y Giovanni Muscato. (2008). "Adhesion Techniques for Climbing Robots: State of the Art and Experimental Considerations." *Advances in Mobile Robotics*, 6–28.

Majidi, M., & Vakilzadeh, A. (2021). Design and control of a linear telescope for autonomous inspection of above-ground storage tanks. *Sensors*, 21(8), 2718. <https://doi.org/10.3390/s21082718>

Martínez, J., y L. Gómez. (2016). "La Palma Aceitera, Una Alternativa Para La Producción de Biocombustibles." *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 7 (1): 47–57.

Marulanda, Nicolás Pérez, Presidente Ejecutivo, Fedepalma Alexandre, Patrick Cooman, Alcibiades Hinstroza Córdoba, Carlos Andrés, Rincón Molina, et al. (2021). *Manual de Procedimientos Operativos Estándar Para La Implementación de Mejores Prácticas de Sostenibilidad Manual de Procedimientos Operativos Estándar Para La Implementación de Mejores Prácticas de Sostenibilidad Con El Apoyo Del Fondo de Fomento Palmero Elaborado Por: Colaboradores Ximena Mahecha Anzola, Gerente Del Programa de Aceite de Palma Sostenible.* www.cenipalma.org.

Mata, Nelson José Montaña, y Jesús Rafael Méndez Natera. (2009). "Efecto Del ácido Indol-3-Acético y El Acido Naftalenacético Sobre El Largo y Ancho Del Fruto de Melón (Cucumis Melo l.) Cultivar Edisto 47." *Revista Científica UDO Agrícola* 9 (3): 530–38.

Mena R. (2009) "Diseño de modelo a escala de una grúa torre. Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid. España.

Mobrem, M., & Spier, C. (2012). Design and Performance of the Telescopic Tubular Mast.

Mohd Hatta, Siti Khairiyah, Rupert J Quinnell, Abd Ghani Idris, and Stephen G Compton. (2021). "Making the Most of Your Pollinators: An Epiphytic Fig Tree Encourages Its Pollinators to Roam Between Figs." *Ecology and Evolution* 11 (11): 6371–80.

Morales, Leidy C, L Martínez, Greicy A Sarria, Gabriel A Torres, Francia Varón, et al. (2009). "Experiencias En El Manejo Integrado de La Pudrición Del Cogollo (PC) de La Palma de Aceite, En La Zona Central Colombiana."

Mosquera, M., Díaz, D., & García, E. (2006). Estudio de referenciación competitiva en el proceso de cosecha en la Zona Oriental. *Palmas*, 27(2), 35-44. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1177>

Mosquera-Montoya, Mauricio, Elizabeth Ruiz Álvarez, Daniel Eduardo Munévar Martínez, Kelly Xiomara Sinisterra Ortiz, Daniel Felipe López Alfonso, Luz Adriana Franco Valbuena, Wendy Yurany Hoyos Rojas, et al. (2021). "Referenciación Competitiva Al Proceso de

Polinización Artificial En Cultivares híbridos Interespecíficos OxG: Coari x La mé.” *Boletines técnicos*, no. 40: 69–69.

Mosquera, M., Valderrama, M., Fontanilla-Díaz, C. A., & Arias, N. (2016). Costos de producción de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia en 2014. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/311533292_Costos_de_produccion_de_la_agroindustria_de_la_palma_de_aceite_en_Colombia_en_2014

Motta, Dumar F, Jesús A García, y Anselmo Ayala. (2000). “Efecto de La Poda En El Desempeño Fisiológico y Productivo de La Palma de Aceite En La Zona Norte Colombiana.” *Revista Palmas* 21 (especial): 41–46.

Ortiz, Reyna, and Stalin Mauricio. (2022). “Control Del Riesgo Ergonómico físico Por Movimiento Manual de Cargas Basado En La Norma ISO 11228-1 Para Los Operadores de Una Planta de Producción de Petróleo.” {B.S.} thesis.

Pino V., Edwin. (2019). “Los Drones Una Herramienta Para Una Agricultura Eficiente: Un Futuro de Alta Tecnología.” *Idesia (Arica)*. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019005000402>.

Ponguillo López, Joel Steven, y Olivia Dayanara Romero Lino. (2021). “La Enfermedad de Pudrición Del Cogollo PC y Su Efecto Económico En La Producción de Palma Africana Del Cantón Quininde, Provincia de Esmeraldas.” {B.S.} thesis, Facultad de Ciencias Económicas. Universidad de Guayaquil.

Quimbiamba Ulcuango, Carlos Oswaldo. (2019). “Evaluación de La Propagación de Rosa (Rosa SPP) Por Estacas Mediante El Uso de ácido Naftalenacético En El Cantón Pedro Moncayo-Pichincha.” {B.S.} thesis.

Ramos M. & Báez D. (2013). "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN EN UNA PARCELA DEMOSTRATIVA EN EL CANTÓN CEVALLOS". Facultad de mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Reiss-Woolever, Valentine Joy, Sarah Helen Luke, Jake Stone, Gorm Eirik Shackelford, y Edgar Clive Turner. (2021). “Systematic Mapping Shows the Need for Increased Socio-Ecological Research on Oil Palm.” *Environmental Research Letters* 16 (6): 063002.

Rodríguez, Ángela. Sánchez, Édison. Steve Daza, Rodrigo. Ruíz Romero, y Hernán Mauricio. Romero Angulo. (2017). *Polinización Asistida En Palma de Aceite : Tecnologías Para La Agroindustria de La Palma de Aceite*. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite - CENIPALMA.

Rojas, Pedro Alexander Pérez, Jens Mesa Dishington, Fabio Zuluaga Alvarez, Elzbieta Bochno Hernández, Yolanda Moreno Muñoz, Esteban Mantilla, Francisco Javier Toro Uribe, y Fredy Johan Espitia Ballesteros. (2016). *Mejores Prácticas Agroindustriales Del Cultivo de La Palma de Aceite En Colombia*. www.cenipalma.org.

- Romero, Hernán Mauricio. (2018). “Polinización Artificial de híbridos OxG Para La Obtención de Frutos Partenocárpicos y La Producción de Aceite (Elaeis Oleifera Cortés x Elaeis Guineensis Jacq.)” *Boletín El Palmicultor*, no. 558 agosto: 15–18.
- Romero, Rodrigo Ruiz, Edison Daza, Angela Calpa, y Hernán Mauricio Romero. (2020). “Mezcla de ácido Naftalenacético y Polen,? Se Puede Considerar Una Alternativa Para La Obtención de Frutos Normales Dentro de La Polinización Artificial En El híbrido Elaeis Oleifera x Elaeis Guineensis?” *Revista Palmas* 41 (2): 38–47.
- Ruíz Álvarez, E., Mosquera-Montoya, M., Munevar, D. E., Vargas, L. E., & Zape, J. C. V. (2022). Productividad laboral en plantaciones de palma de aceite en Colombia. Boletines tecnico. <https://doi.org/10.56866/9789588360966>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98.
- Sánchez Alba, Angela Paola. (2020). “Desarrollo de Pruebas y análisis Experimental de Un Motor PT6A-61A de La Fuerza aérea Colombiana a Condiciones de Bogotá, Realizadas En Banco de Ensayos Utilizando JET a-1 y Biodiesel.”
- Sánchez, J., L. Pérez, M. Suárez, R. Montiel, and R. Espina. (2021). “Caracterización Molecular de La Resistencia a La Pudrición Del Cogollo En Elaeis Oleifera x Elaeis Guineensis (OxG).” *Agronomía Tropical* 71 (1): 1–17.
- Shokrani, M., Zahng, A. M., & Fard, M. (2019). A novel self-locking mechanism for a telescoping linear actuator. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 47(4), 413-423. <https://doi.org/10.1080/15397734.2018.1515555>
- Silva, Alfredo Puyana. (2014). *El Sistema General de Riesgos Laborales En Colombia*. U. Externado de Colombia.
- Sivanandan, Karakkattu, and Sharath Kumar. (2019). “Design of Agricultural Type Coconut Climbing and Plucking Robot.” PhD thesis, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej.
- SolidWorks (2018) Análisis Estático lineal, Análisis estático lineal - Ayuda de SOLIDWORKS. Available at: https://help.solidworks.com/2018/spanish/solidworks/cworks/c_Linear_Static_Analysis.htm (Accessed: 10 May 2022).
- Tavakoli, M, and C Viegas. (2015). “Bio-Inspired Climbing Robots.” In *Biomimetic Technologies*, 301–20. Elsevier.
- Torres, Enrique. (2015). “Comportamiento Del Híbrido Interespecífico (OxG) En Palmeras Del Ecuador.”

Torres, Marcelo, Leonardo Rey, Fabio Gelves, and Libardo H Santacruz. (2004). “Evaluación Del Comportamiento de Los híbridos Interespecíficos *Elaeis Oleífera* x *Elaeis Guineensis*, En La Plantación de Guaicaramo SA.” *Revista Palmas* 25 (especial,): 350–57.

Ulu, C, Y El-Kahlout, I Hancioglu, O Canbak, EU Genc, and DM Bahar. (2013). “Design of an Inspection Robot for Search and Rescue Operations in Mines.” In *23rd International Mining Congress and Exhibition of Turkey*. Turkey: Chamber of Mining Engineers of Turkey, 1913–21.

Verheye, Willy. (2010). “Growth and Production of Oil Palm.” In *Land Use, Land Cover and Soil Sciences*. UNESCO-EOLSS Publishers.

Wambeck, Noel. (2005). *Sinopsis Del Proceso de La Palma de Aceite*. LEGIS.

Wang, Y. L., & Wang, S. Y. (2012). The linear telescope: A novel tool for surface roughness measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(7), 2016-2023. <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2191669>

Yépes Rincón, F., Chávez Gómez, J., & IFerriño Fierro, A. (1980). “ANÁLISIS ESPECTRAL DE MATERIALES Y GEOMETRÍA DE MUROS EXISTENTES PREVIO A LA APLICACIÓN DE CARGAS” (1.a ed.). https://www.researchgate.net/profile/Fabiola-Yopez/publication/323393170_Analisis_espectral_de_materiales_y_geometria_de_muros_existentes_previo_a_la_aplicacion_de_cargas/links/5a93ade2a6fdccceff05ab3e/Analisis-espectral-de-materiales-y-geometria-de-muros-existentes-previo-a-la-aplicacion-de-cargas.pdf

Zahng, A. M. (2018). *Linear Telescope Technology*. Springer.

Zamudio, Luis Enrique Castro. (2020). “Boletín Económico Trimestral.” *Boletín Económico*, 1–12.

Zárate, Alejandra Rueda, y Marlyn Ahumada Yanet. (2016). *Biodiésel de Palma Colombiano: De La Ficción Energética a La Realidad de Un Negocio*. www.cenipalma.org.