



Departamento de Ingeniería Rural. Área de Ingeniería Agroforestal
Programa de Doctorado
BIOCIENCIAS Y CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
(MECANIZACIÓN Y RECOLECCIÓN DEL OLIVAR)

“DESARROLLO DE COSECHADORAS DE OLIVAR TRADICIONAL BASADAS EN SACUDIDORES DE COPA”

‘Development of harvesters for traditional orchards based on canopy shakers’



MEMORIA TESIS DOCTORAL

para optar al título de Doctor con Mención Internacional por la Universidad de Córdoba
por el **Ingeniero Industrial**

RAFAEL RUBÉN SOLA GUIRADO

Directores:

Dr. Ing. Agrónomo Gregorio L. Blanco Roldán

Dr. Ing. Agrónomo Jesús A. Gil Ribes

Córdoba, Abril de 2016

TITULO: *Desarrollo de cosechadoras de olivar tradicional basadas en sacudidores de copa*

AUTOR: *Rafael Rubén Sola Guirado*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2016
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es



Departamento de Ingeniería Rural.
Área de Mecanización.

**“DESARROLLO DE COSECHADORAS DE OLIVAR TRADICIONAL
BASADAS EN SACUDIDORES DE COPA”**

TESIS DOCTORAL

para aspirar al grado de Doctor con Mención Internacional por la Universidad de Córdoba presentada por el Ingeniero Industrial D. *Rafael Rubén Sola Guirado*

El doctorando:

Fdo.: Rafael Rubén Sola Guirado

Vº Bº Los Directores

Fdo.: Prof. Dr. Gregorio L. Blanco Roldán

Fdo.: Prof. Dr. Jesús A. Gil Ribes

Córdoba, Abril de 2016

Índice de contenidos

<i>Índice de contenidos</i>	<i>1</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>1</i>
<i>Índice de Tablas</i>	<i>1</i>
<i>Índice de Abreviaturas</i>	<i>1</i>
<i>Índice de Ecuaciones</i>	<i>1</i>
<i>I. INFORME RAZONADO DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS</i>	<i>- 1 -</i>
I.I Revistas incluidas en el Journal Citation Index:.....	<i>- 2 -</i>
I.II Revistas no incluidas en el Science Citation Index.....	<i>- 3 -</i>
I.III Aportaciones en Congresos Internacionales:	<i>- 4 -</i>
I.IV Aportaciones en Congresos Nacionales:	<i>- 5 -</i>
I.V Solicitudes de patentes.....	<i>- 6 -</i>
<i>II. MENCIÓN DE DOCTORADO INTERNACIONAL</i>	<i>- 8 -</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>- 9 -</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>11</i>
<i>SUMMARY</i>	<i>12</i>
<i>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN</i>	<i>13</i>
1. Presentación y marco de la tesis doctoral.....	<i>14</i>
2. Justificación	<i>14</i>
<i>CAPÍTULO II. ANTECEDENTES</i>	<i>17</i>
1. El olivar	<i>18</i>
1.1 Superficie, distribución y producción	<i>18</i>
1.2 Tipologías.....	<i>19</i>
1.2.1 Olivar tradicional.....	<i>20</i>
1.2.2 Olivar intensivo	<i>20</i>
1.2.3 Olivar superintensivo	<i>21</i>

2.	Costes en el olivar	22
2.1	Estructura de costes	22
2.2	Alternativas para la reducción de costes.	24
3.	Necesidad de mecanización de la recolección.....	25
3.1	Recolección de la aceituna directamente del árbol.	26
3.1.1	Derribo del fruto.....	26
3.1.2	Recepción del fruto derribado	27
3.1.3	Carga, limpieza y transporte del fruto	28
3.2	Recolección de la aceituna del suelo.....	28
3.3	Recolección integral.....	29
3.4	Sistemas sacudidores de copa	30
3.5	Patrón de la vibración o sacudida.....	35
3.6	Adaptación máquina-plantación plantación-máquina.....	38
3.6.1	Medidas de las plantaciones	38
3.6.2	Diseño de maquinaria específica.....	40
3.6.3	Necesidad del contacto del sistema de derribo con la copa del árbol.....	41
3.6.4	Adaptación del árbol a la máquina	41
	<i>CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</i>	<i>44</i>
	<i>CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....</i>	<i>47</i>
1.	PARÁMETROS DEL SISTEMA MÁQUINA-ARBOL	48
1.1	Árbol.....	49
1.1.1	Plantación.....	49
1.1.2	Fruto	49
1.2	Máquina.....	51
1.2.1	Dispositivo de derribo	52
1.2.2	Dispositivo de interceptación.....	52
1.2.3	Circuito hidráulico de potencia	52
1.3	Interacción máquina-árbol.....	54
1.3.1	Derribo de fruto.....	54

1.3.2	Daños al árbol.....	56
1.3.3	Patrón de vibración/sacudida.....	58
1.3.4	Operación de trabajo	60
2.	PLANTACIONES DE ENSAYOS	62
3.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	63
3.1	Evaluación de los sistemas de recolección para olivar tradicional. .	63
3.1.1	Ensayos	63
3.1.2	Parámetros evaluados.....	66
3.1.3	Procedimiento.....	66
3.2	Caracterización de las plantaciones y árboles de olivar tradicional. .	66
3.2.1	Ensayos	67
3.2.2	Parámetros evaluados.....	67
3.2.3	Procedimiento.....	71
3.3	Integración de un dispositivo de gestión de fruto derribado con un sacudidor de copa comercial y estudio de viabilidad de cosecha integral en olivar tradicional.	75
3.3.1	Maquinaria utilizada.....	76
3.3.2	Ensayos	79
3.3.3	Parámetros evaluados.....	79
3.3.4	Procedimiento.....	79
3.4	Desarrollo de sistemas de derribo sacudidores de copa específicos para el olivar tradicional.	86
3.4.1	Evolución y diseño de sistemas de derribo	86
3.4.2	Evaluación de prototipos de derribo modular y completo.....	87
3.4.3	Estudio de los elementos de sacudida del sistema de derribo.	92
3.5	Desarrollo de un sistema de automatización de la aproximación del sistema de sacudida y el copiado a la copa del árbol.....	96
3.5.1	Ensayos	97
3.5.2	Parámetros evaluados.....	98
3.5.3	Procedimiento.....	98
4.	ANÁLISIS DE DATOS	108

CAPÍTULO V. RESULTADOS	111
1.1 Evaluación de los sistemas de recolección para olivar tradicional.	112
1.1.1 Eficiencia de derribo	112
1.1.2 Daños.....	114
1.1.3 Vibración.....	115
1.2 Caracterización de las plantaciones y árboles de olivar tradicional.	119
1.2.1 Caracterización geométrica del árbol	119
1.2.2 Modelo predictivo de la capacidad productiva o rendimiento potencial.....	127
1.3 Integración de un dispositivo de gestión de fruto derribado con un sacudidor de copa comercial y estudio de viabilidad de cosecha integral en olivar tradicional.	135
1.3.1 Fase A. Estudio de la viabilidad del sistema sacudidor y su configuración.	135
1.3.2 Fase B. Determinación de un dispositivo acoplado al sacudidor de copa para la recepción del fruto derribado.	140
1.3.3 Fase C. Desarrollo de un dispositivo que realice todas las tareas necesarias, para que unido al sistema sacudidor de copa, realice la recolección integral del olivar tradicional.....	145
1.4 Desarrollo de sistemas de derribo sacudidores de copa específicos para el olivar tradicional.....	152
1.4.1 Evolución y diseño de sistemas de derribo	152
1.4.2 Evaluación de prototipos de derribo modular y completo.....	169
1.4.3 Estudio de los elementos de sacudida del sistema de derribo.	183
1.5 Desarrollo de un sistema de automatización de la aproximación del sistema de sacudida y el copiado a la copa del árbol.....	190
CAPITULO VI. PROTOTIPOS PRECOMERCIALES DE COSECHADORAS CON SACUDIDORES DE COPA	195
1. Introducción.....	196
2. Prototipos desarrollados	196
2.1 Prototipo A (UCO-Maqtec).....	196
2.2 Prototipo B (UCO-Moresil)	200
2.2.1 Chasis de la máquina.....	203

2.2.2	Sistema de traslación y dirección.	203
2.2.3	Sistema de nivelación.	205
2.2.4	Sistema de derribo y aproximación al árbol.	205
2.2.5	Sistema de adaptación al tronco.	209
2.2.6	Sistema de gestión de fruto derribado y limpieza.	209
2.2.7	Sistema de almacenamiento.	212
2.2.8	Sistema oleohidráulico.	212
3.	Evaluación del prototipo.	217
4.	Medidas propuestas para la mejora en el desarrollo del prototipo	221
1.	Chasis	222
2.	Sistema de nivelación	222
3.	Sistema de traslación y dirección	222
4.	Sistema de derribo y aproximación	222
5.	Sistema de adaptación al tronco	222
6.	Sistema de gestión de fruto derribado y limpieza	222
7.	Sistema de almacenamiento	222
8.	Sistema oleohidráulico	222
9.	Sistema de control y mando	222
	<i>CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES</i>	223
	<i>CONCLUSIONS</i>	229
	<i>CAPÍTULO VIII.- BIBLIOGRAFÍA</i>	232
	<i>BIOGRAPHICAL SKETCH</i>	244

Índice de Figuras

Figura 1. Países productores de aceite de oliva. Datos medidos de 2002-2007).....	18
Figura 2. Tipologías de olivar.....	20
Figura 3. Distribución de los distintos tipos de olivar en España	21
Figura 4. Proceso habitual de recolección olivar con operaciones discontinuas.....	26
Figura 5. Diferentes sistemas de derribo de aceituna.	27
Figura 6. Vibradores de troncos con paraguas inverido	29
Figura 7. Cosechadoras cabalgantes en diversos cultivos adaptados a las máquinas. .	31
Figura 8. Patentes de mecanismos para la sacudida de copa.....	32
Figura 9. Sacudidores y cosechadoras laterales experimentales en diversos cultivos con árboles adaptados a las máquinas	33
Figura 10. Sacudidor de copa lateral Oxbo 3210	35
Figura 11. Señal de aceleración temporal generada por un sacudidor de copa.	37
Figura 12. Medida de un árbol tradicional usando un jalón	39
Figura 13. Teoría de “total design” propuesta por Pugh	40
Figura 14. Vista de olivo tradicional con formación recomendada para la recolección mecanizada con sacudidores de copa en una trayectoria circular	43
Figura 15. Vistas de olivo tradicional sin formación para la de recolección con sacudidor de copa en una trayectoria circular.	43
Figura 16. Dinamómetro adaptado para medidas de Fuerza de Retención del Fruto....	49
Figura 17. Balanza de precisión	50
Figura 18. Separación de frutos según su índice de madurez tras la toma de muestras de un árbol.....	51
Figura 19. Entorno gráfico del software CAD usado para el diseño los componentes y prototipos.....	51
Figura 20. Sensor de martillo de impacto y distintas puntas de golpeo	52
Figura 21. Sensores de caudal y presión en el sistema hidráulico de un prototipo sacudidor de copa	53
Figura 22. Equipo utilizado para el análisis y registro de las señales de los sensores de caudal y presión.....	53
Figura 23. Separación de fruto derribado y daños tras un ensayo de recolección de un árbol.....	54

Figura 24. Apure selectivo de olivo tras de un ensayo de recolección con un sistema estudiado.....	54
Figura 25. Procedimiento de pesado del fruto derribado por los sistemas de recolección estudiados	56
Figura 26. Identificación de daños clasificados según gravedad en grupos de ramas...	57
Figura 27. Acelerómetros (izquierda) y equipo analizador de señales dinámicas (derecha) utilizados para la caracterización de la vibración.....	59
Figura 28. Ubicación de tres acelerómetros en una rama de oliva tradicional para medida de la transmisión de aceleración	59
Figura 29. Trayectorias efectuadas en campo con los prototipos con árboles en disposición en tresbolillo.	60
Figura 30. Equipo autónomo de acceso remoto, en el que se aprecian los conectores para la antena GPS (derecha) y para la antena GSM (izquierda)	61
Figura 31. Plantaciones de olivar usadas en el desarrollo de la tesis.	62
Figura 32. Sistemas de recolección utilizados para el ensayo.	65
Figura 33. Representación de los principales descriptores del perfil aéreo de un árbol en el ensayo de caracterización geométrica mediante análisis de partículas	70
Figura 34. Representación del método manual de la medida de copa con jalón en olivar	72
Figura 35. Fotografía lateral con fondo blanco plástico en olivar tradicional y posicionamiento de jalón en posición central del árbol.....	73
Figura 36. Elevación de UAS en olivar para la obtención de fotografías aéreas antes de la puesta en modo automático.	74
Figura 37. Metodología de procesado de imágenes obtenidas.	75
Figura 38. Mediciones dimensionales y geométricas de la máquina Oxbo 3210 para su modelado geométrico	76
Figura 39. Mediciones de los grados de movimiento y cinemática de la máquina Oxbo 3210.....	77
Figura 40. Movimientos de la máquina Oxbo 3210.	78
Figura 41. A: Sistema de interceptación diseñado para la determinación de la distribución del fruto derribado por el sacudidor Oxbo 3210.	81
Figura 42. Sistema de interceptación experimental con sectores para la localización del fruto derribado por el sacudidor de copa Oxbo 3210.....	82

Figura 43. Prototipo para las operaciones de recepción, gestión, limpieza, carga y descarga acoplado al sistema de derribo Oxb0 3210.	83
Figura 44. Prototipo para las operaciones de recepción, gestión, limpieza, carga y descarga acoplado al sistema de derribo Oxb0 3210.....	84
Figura 45. Dispositivo para las operaciones de recepción, gestión, limpieza, carga y descarga en proceso de fabricación	85
Figura 46. . Diseño del circuito hidráulico del prototipo planteado para las operaciones de recepción, gestión, limpieza, carga y descarga acoplado al sistema de derribo Oxb0 3210.	85
Figura 47. Esquema básico de matriz QFD.....	86
Figura 48. Evolución de los prototipos de sacudida de copa estudiados en el apartado 3.4.1.2	87
Figura 49. Zona de actuación en la copa del árbol del prototipo SAMOLIV	89
Figura 50. Esquema de la distribución de las zonas de estudio en la superficie de interceptación de los frutos derribados por SACOLIV	91
Figura 51. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Ensayo de registro de aceleraciones en diferentes partes del mecanismo, con martillo de impacto colocado en la estructura fija de su chasis.	93
Figura 52. Mecanismo de simulación de vareo desarrollado para el ensayo de la herramienta de golpeo	94
Figura 53. Mecanismo de impacto desarrollado para el estudio de la herramienta de golpeo.	95
Figura 54. Varas usadas en el ensayo de estudio de la herramienta de golpeo	96
Figura 55. Prototipo SAMOLIV con sistema de automatización experimental de aproximación al árbol	98
Figura 56. Esquema de posición del módulo de derribo de SAMOLIV	99
Figura 57. Lógica de control de inicio del algoritmo de copiado automático de copa	101
Figura 58. Lógica de control del algoritmo del modo manual para el algoritmo del ensayo de automatización de la aproximación a copa del sistema de derribo.....	102
Figura 59. Lógica de control del algoritmo del modo de copiado automático de copa por presión para el algoritmo del ensayo de automatización de la aproximación a copa del sistema de derribo	103

Figura 60. Lógica de control del modo automático distancia para el algoritmo del ensayo de automatización de la aproximación a copa del sistema de derribo.....	104
Figura 61. Visualización de las pantallas desarrolladas para el ensayo de automatización a la aproximación según dos modos de presión y distancia.....	105
Figura 62. Visualización pantallas en modo automático de presión y ultrasonidos y selección de umbrales de trabajo	106
Figura 63. Ensayo de ajuste de los parámetros del modo ultrasonidos y presión	108
Figura 64. Eficiencia de derribo según los sistemas de recolección utilizados en el ensayo con olivar tradicional.....	113
Figura 65. Daños producidos por los diferentes sistemas de recolección usados en olivar tradicional.....	114
Figura 66. Ejemplos de señales de aceleración temporal en ramas generados por cada sistema de recolección.	115
Figura 67. Distribución del tiempo acumulado en función de intervalos de aceleración eficaz según diferentes sistemas de recolección.....	117
Figura 68. Modelo digital del terreno obtenido con técnicas fotogramétricas con vuelo UAS	120
Figura 69. Ortofotografía en la finca Fuente la Rosa en olivar tradicional (izquierda) e imagen segmentada y escalada (derecha)	121
Figura 70. Vistas de plantaciones de olivar tradicional obtenidas por técnicas de fotogrametría aérea	122
Figura 71. Imagen segmentada y procesado de imagen mediante la técnica de análisis de partículas y generación de elipses y círculos	123
Figura 72. Ejemplos de dos perfiles segmentados de dos árboles tradicionales con una malla de sectorización de 0.5x0.5m.....	125
Figura 73. Representación de una posibilidad de modulación de sistemas de derribo a la copa del árbol.....	127
Figura 74. Relación entre la producción medida en año en carga, o su rendimiento potencial, y el volumen de copa medido manualmente en función de su riego y tipo de plantación.	130
Figura 75. Modelo lineal entre el área aérea del contorno de árbol y el volumen de copa medido para diferentes categorías de plantaciones.....	132

Figura 76. Modelo de predicción y medida del rendimiento potencial de diferentes categorías de plantaciones de olivar.	133
Figura 77. Mapa de variabilidad espacial del rendimiento potencial de producción en función de su área aérea en una plantación de olivar tradicional de secano.	134
Figura 78. Daños leves producidos por las varas del sacudidor de copa en las ramas jóvenes de un olivar tradicional.....	137
Figura 79. Aceleración en los diferentes puntos de la rama estudiados según las regulaciones ensayadas en el sacudidor de copa.	138
Figura 80. . Detalle del fruto retenido por los sectores diseñados en el prototipo construido para el ensayo.	141
Figura 81. Esquema distribución en porcentaje del fruto derribado en los distintos sectores creados en el prototipo en los ensayos en el porcentaje del total de aceituna derribado por el sacudidor en los sectores.....	142
Figura 82. Detalle de las dimensiones estudiadas de la superficie desarrollada en fase B.	144
Figura 83. Detalle de la geometría estudiada de la superficie desarrollada en fase B	144
Figura 84. Detalle de la geometría de árbol requerida para el prototipo según resultados obtenidos en fase B.....	145
Figura 85. Dispositivo diseñado para la recepción y gestión de fruto derribado por el sacudidor de copa Oxbo 3210.	146
Figura 86. Detalle del giro del prototipo diseñado	147
Figura 87. Detalle de la descarga de la tolva en pala mecánica tras un ciclo de trabajo de recolección del prototipo fabricado	148
Figura 88. Detalle del sistema de limpieza de daños al árbol durante la recolección de un olivo en el ensayo planteado.....	148
Figura 89. Detalle del sistema de contacto del prototipo con el tronco del olivo durante su recolección	149
Figura 90. Detalle de la rodadura ocasionada por el prototipo fabricado tras la recolección de un olivo.....	149
Figura 91. Detalle del sistema de interceptación de fruto tras un árbol recolectado del prototipo desarrollado para la recolección integral con el sacudidor Oxbo 3210	150
Figura 92. Detalle del puesto de conducción en el tractor con el sacudidor Oxbo 3210.	150

Figura 93. Representación de la trayectoria seguida por el prototipo diseñado en la recolección de los ensayos planteados a través de un dispositivo de georreferenciación.	151
Figura 94. Matriz QFD para el diseño de un sacudidor de copa para olivar tradicional.	153
Figura 95. Prototipo SAOLIV 1. Vista en sección por un plano vertical que pasa por su centro de rotación y vista de la placa corredera.....	156
Figura 96. Prototipo SAOLIV 1 en distintas configuraciones de ensayo trabajando en olivar.....	157
Figura 97. Visualización de las vibraciones y ruido entre la señal generada lugar cercano al tambor por el sacudidor Oxbo 3210 y el SAOLIV 1 en un ensayo de aumento de la frecuencia de sacudida en el tiempo.....	158
Figura 98. Influencia de la modificación de material de varas, frecuencia y freno en tambor sobre la aceleración eficaz y el tiempo acumulado por encima de 150 m/s ² ..	158
Figura 99. Señales de aceleración temporal registradas en ramas por diferentes configuraciones utilizadas con el prototipo SAOLIV 1 con la misma escala en comparación con Oxbo 310.....	160
Figura 100. Prototipo SAOLIV 2. Representación del mecanismo contemplando la separación excesiva de los tambores de vasas.....	162
Figura 101. Prototipo SAOLIV 2.1. Representación del mecanismo. Corte con plano vertical por su centro de rotación. Corte con plano horizontal por su centro el plano de arrastre del motor.....	163
Figura 102. Prototipo SAOLIV 2.1 suspendido en el tripuntal de un tractor.....	163
Figura 103. Prototipo SAOLIV 2.1 montado sobre un chasis experimental y arrastrado por un tractor	164
Figura 104. Prototipo SAOLIV 2.1. Representación del mecanismo con mostrando en la parte trasera la transmisión de movimiento entre módulos desfasados 180°según las posiciones de la excéntricas que empujan sus bielas en su movimiento	165
Figura 105. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Esquema de aceleración teórica obtenida en el tambor con el modelo biela-manivela en función de las diferentes longitudes de biela	167

Figura 106. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Representación y Mecanismo con dos módulos movidos por bielas largas, conectados con 180° de desfase en el cigüeñal y montado sobre un chasis de ensayos a través tres puntos en cruz aislados por silent-blocks.	168
Figura 107. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Señal de aceleración temporal registrada en las ramas exteriores.....	169
Figura 108. Prototipo SAMOLIV. Representación del mecanismo de derribo SAMOLIV y elementos del sistema.....	170
Figura 109. Prototipo SAMOLIV con varas de fibra de vidrio.....	171
Figura 110. Prototipo SAMOLIV 0. Evaluación de daños y eficiencia de derribo en función de la frecuencia de sacudida y material de varas.....	172
Figura 111. Prototipo SACOLIV. Representación del mecanismo y sus partes:	175
Figura 112. Prototipo SACOLIV recolectando de un olivo tradicional.	177
Figura 113. Prototipo SACOLIV. Evaluación de la eficiencia de derribo exterior e índice de daños con los diferentes configuraciones ensayadas.	178
Figura 114. Prototipo SACOLIV. Señal temporal de aceleración eficaz (valores absolutos) en ramas	183
Figura 115. Prototipo SAOLIV 2.1.1 Fuerza de impacto de las varas del en función de la frecuencia y sistema de frenado usado.	184
Figura 116. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Simulación del impacto de vara con martillo de impacto en diferentes instantes de tiempo con freno en el tambor.....	185
Figura 117. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Simulación del impacto de vara con martillo de impacto en diferentes instantes de tiempo giro libre en el tambor.	185
Figura 118. Prototipo SAOLIV 2.1.1 Fuerza de impacto de las varas del en función de la frecuencia y número de varas usados.	185
Figura 119. Vara de fibra de carbono maciza rota en el ensayo de simulación de vareo.	187
Figura 120. Ángulo de los diferentes rebotes efectuados por las varas con dispositivo de péndulo de impacto.....	188
Figura 121. Comparativa general de eficiencia de derribo y daños ponderados para los ensayos de copiado automático realizados	190
Figura 122. Distintas penetraciones del prototipo SAMOLIV en la copa del árbol.	191
Figura 123. Prototipo SAMOLIV. Evaluación de diferentes modos de copiado automático de copa y de referencia.	193

Figura 124. Prototipos precomerciales de cosechadoras basadas en sacudidores de copa para olivar tradicional desarrollados en el convenio Mecaolivar en colaboración con Moresil y Maqtec.....	196
Figura 125. Prototipo A Mecaolivar desarrollado en colaboración con la empresa Maqtec y sus principales sistemas	197
Figura 126. Representación del prototipo B Mecaolivar y sus principales sistemas ..	200
Figura 127. Representación de las vistas principales del prototipo B Mecaolivar.....	202
Figura 128. Representación del chasis del prototipo B Mecaolivar	203
Figura 129. Representación del sistema de dirección y traslación montado sobre el chasis y sistema de nivelación del prototipo B Mecaolivar.....	204
Figura 130. Trayectoria de recolección alrededor de un árbol del prototipo B Mecaolivar.	204
Figura 131. Sistema de nivelación montado sobre el chasis del prototipo B Mecaolivar	205
Figura 132. Representación del sistema de derribo y sus 4 módulos independientes del prototipo B Mecaolivar.....	206
Figura 133. Representación un módulo de derribo del prototipo B Mecaolivar mediante un despiece y una sección por un plano vertical que pasa por el centro del eje.....	207
Figura 134. Detalle del sistema de derribo de un módulo del prototipo B Mecaolivar	208
Figura 135. Detalle del sistema de aproximación del módulo de derribo del prototipo B Mecaolivar.....	208
Figura 136. Detalle del sistema de adaptación al tronco del prototipo B Mecaolivar.	209
Figura 137. Representación del sistema de gestión, limpieza y almacenamiento de fruto alojados sobre el chasis del prototipo B Mecaolivar.	210
Figura 138. Detalle del sistema de interceptación, parte bajo árbol del prototipo B Mecaolivar	210
Figura 139. Detalle del sistema de limpieza de fruto derribado del prototipo B Mecaolivar	211
Figura 140. Representación del sistema de bandas transportadoras bajo árbol junto con las escamas de adaptación a tronco y los sensores de copiado de suelo en el prototipo B Mecaolivar	211
Figura 141. Detalle del sistema almacenamiento y pesado del prototipo B Mecaolivar	212

Figura 142. Detalle de la central hidráulica del prototipo B Mecaolivar	213
Figura 143. Esquema de la instalación oleohidráulica del prototipo B MecaolivarSistema de control y mando	214
Figura 144. Sistema de potencia hidráulica y control (del prototipo B Mecaolivar....	215
Figura 145. Sistema de mando del prototipo B Mecaolivar	216
Figura 146. Transporte en góndola del prototipo B Mecaolivar	216
Figura 147. Prototipo B Mecaolivar de cosechadora para olivar tradicional	217
Figura 148. Recolección en círculo del prototipo Mecaolivar en olivar tradicional ...	218
Figura 149. Prototipos sacudidores de copa con sistemas de aproximación, desarrollados para la recolección de naranja y aceituna de mesa.	227
Figura 150. Equipo con sistema de vibración y sacudida simultánea.	228

Índice de Tablas

Tabla 1. Datos de costes en las distintas tipologías de olivar.....	23
Tabla 2. Costes (€/ha) de distintas operaciones en olivar.....	25
Tabla 3. Principales parámetros que definen el sistema máquina-árbol.....	48
Tabla 4. Referencia usada para ponderar el índice de madurez del fruto en laboratorio	50
Tabla 5. Características de las plantaciones de ensayos.....	63
Tabla 6. Características de la plantación de olivar tradicional en los ensayos de evaluación de los sistemas de recolección actuales para olivar tradicional.	64
Tabla 7. Características de las plantaciones ensayadas.	79
Tabla 8. Configuraciones planteadas para los ensayos en la fase A	80
Tabla 9. Parámetros del fruto y árboles empleados para el ensayo.	88
Tabla 10 Parámetros de los árboles ensayados.....	89
Tabla 11. Factores estudiados en el ensayo del prototipo SACOLIV y diferentes configuraciones de los mismos.....	90
Tabla 12. Parámetros de árbol y fruto en la finca La Mata.	97
Tabla 13. Parámetros de la vibración medidos en ramas fructíferas olivar tradicional según los diferentes sistemas de recolección.	116
Tabla 14. Parámetros geométricos de la copa de olivos tradicionales mediante el método tradicional con jalón y fotogrametría lateral y aérea.	122
Tabla 15. Valores dimensionales y geométricos con asemejanza a círculos y elipses de los perfiles aéreos de los olivos tradicionales.	123
Tabla 16. Volúmenes de copa calculados según la aproximación a una elipsoide, con las medidas obtenidas de los diferentes métodos usados.	124
Tabla 17. Parámetros medios de la copa del árbol en función de la altura con respecto al suelo.....	125
Tabla 18. Parámetros de las plantaciones en función del sistema de plantación.....	128
Tabla 19. Parámetros de las plantaciones usadas para los modelos de predicción y validación.	132
Tabla 20. Resultados de eficiencia de derribo para diferentes regulaciones del sacudidor de copa trabajando alrededor de la copa del árbol en olivar tradicional.	135
Tabla 21. Daños producidos para diferentes regulaciones del sacudidor de copa trabajando alrededor de la copa del árbol.....	137

Tabla 22. Valores medios de transmisión de aceleración diferentes puntos de ramas según la regulación de la máquina empleada	139
Tabla 23. Eficiencias obtenidas en los ensayos con el prototipo en el sacudidor de copa y dispositivo de recepción en la fase B.....	142
Tabla 24. Representación de diseños propuestos para el sistema de derribo	155
Tabla 25. Parámetros de la vibración registrados durante los ensayos realizados con el prototipo SAOLIV 1 en diferentes configuraciones para los dos tratamientos con poblaciones pareadas.	159
Tabla 26. Prototipo SAMOLIV Evaluación de daños y eficiencia de derribo en función del material de varas.	173
Tabla 27. Prototipo SAMOLIV Evaluación de daños y eficiencia de derribo en función de la velocidad de avance.	173
Tabla 28. Prototipo SAMOLIV. Análisis de señales de aceleración registrados en ramas para el material de varas acero.	174
Tabla 29. Prototipo SAMOLIV. Análisis de señales de aceleración registrados en ramas para el material de varas fibra de vidrio.	174
Tabla 30. Prototipo SACOLIV. Análisis de señales de aceleración registrados en ramas para diferentes configuraciones.	181
Tabla 31. Prototipo SAOLIV 2.1.1.	183
Tabla 32. Prototipo A Mecaolivar. Principales sistemas y componentes.....	198
Tabla 33. Propuesta de mejoras para el prototipo B Mecaolivar.....	222

Índice de Abreviaturas

a	Aceleración (efectiva o RMS)
FRF	Fuerza Retención Fruto
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
CNC	Control Numérico Computerizado
CAN (BUS)	Controller Area Network (Puerto)
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Position System
HSLA	High-Strength Low-Alloy
OTM	Olivar Tradicional Mecanizable
OTNM	Olivar Tradicional No Mecanizable
OI	Olivar Intensivo
OS	Olivar Superintensivo
RMS	Root Mean Square
T	Período
t	tiempo
UAS	Unmanned Aerial System

Índice de Ecuaciones

Ec. 1. Eficiencia de derribo	56
Ec. 2. Eficiencia de derribo exterior	56
Ec. 3. Eficiencia de interceptación	56
Ec. 4. Eficiencia de cosecha	56
Ec. 5. Eficiencia de cosecha exterior	56
Ec. 6. Evaluación de daños	57
Ec. 7. Daños.....	57
Ec. 8. Aceleración eficaz	58
Ec. 9. Transferencia de vibración	58
Ec. 10. Capacidad de trabajo	61
Ec. 11. Área del perfil del árbol.....	68
Ec.12. Volumen de copadel árbol.....	68
Ec.13. Desviación del contorno real con ajuste circular.....	69
Ec. 14. Desviación del contorno real con ajuste elíptico.....	69
Ec. 15. Desviación del contorno real con ajuste Feret.....	69
Ec. 16. Circularidad.....	70
Ec.17. Modelo de rendimiento potencial general	129
Ec. 18. Modelo de rendimiento potencial general para plantaciones en secano	130
Ec. 19. Modelo de rendimiento potencial para plantaciones en riego.....	130
Ec. 20. Modelo de rendimiento potencial de plantación	130
Ec. 21. Modelo de volumen de copa de árbol	133
Ec. 22. Tiempo de realización de un ciclo de recolección	152
Ec. 23. Desplazamiento de pistón en mecanismo biela-manivela.....	166
Ec. 24. Aceleración de pistón en mecanismo biela-manivela	166



Departamento de Ingeniería Rural.

I. INFORME RAZONADO DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

“DESARROLLO DE COSECHADORAS DE OLIVAR TRADICIONAL BASADAS EN SACUDIDORES DE COPA”

por el doctorando: **RAFAEL RUBÉN SOLA GUIRADO**”

GREGORIO L. BLANCO ROLDÁN y. JESUS A. GIL RIBES, profesores doctores del Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Córdoba, **informan que** el trabajo titulado **DESARROLLO DE COSECHADORAS DE OLIVAR TRADICIONAL BASADAS EN SACUDIDORES DE COPA**, realizado por D. Rafael Rubén Sola Guirado, se ha llevado a cabo bajo nuestra dirección durante los años 2010 a 2016; y reúne la condiciones de calidad científica exigibles para su presentación y defensa presentado como Tesis Doctoral para optar al título de **Doctor con Mención Internacional** por la Universidad de Córdoba.

El trabajo de **Rafael Rubén Sola Guirado** se ha visto complementado con una **estancias de investigación** en el Departamento de la Universidad de Reggio Calabria (Italia) bajo la supervisión del Dr. Bruno Bernadi desde el 26/07/2015 hasta el 30/10/2015 (3 meses).

La presente tesis es el fruto de varios **proyectos de investigación** desarrollados en el seno del Grupo de investigación AGR-126: Mecanización y Tecnología Rural y en los que D. Rafael Rubén Sola Guirado ha formado parte:

- 1.-“Nuevas tecnologías en la recolección mecanizada del olivar tradicional”. Proyecto financiado por la agencia IDEA en colaboración con la empresa NOLI S.A. 2009-2010.
- 2.- “Sistemas Avanzados de Recolección Integral del Olivar Tradicional”. Proyecto Agentes del Conocimiento Universidad de Córdoba y Citoliva. Oct.2011-Nov.2012.
- 3.- “Innovaciones tecnológicas en el desarrollo de un sistema de recolección integral por sacudidores de copa para un olivar tradicional sostenible y aplicable a olivar intensivo”. Contrato OTRI entre la Universidad de Córdoba y la Organización Interprofesional del Aceite de Oliva Español (IAOE). Diciembre 2012 a diciembre de 2013.

4.- Convenio de compra pública pre-comercial “MECAOLIVAR”, entre el Ministerio de Economía y Competitividad y la Universidad de Córdoba, y con fondos FEDER con la cofinanciación de la IAOE. Diciembre de 2013 a Diciembre de 2015.

5.- “Desarrollo de un sistema de manejo de la aceituna de mesa recolectada mecánicamente. Contratos OTRI y proyecto CEDETI entre la Interprofesional de la Aceituna de Mesa (INTERACEITUNA) y Universidad de Córdoba. Diciembre 2012 a Diciembre 2015.

Se presentan varias publicaciones que aportan conocimiento relativo a los objetivos y contenido desarrollado en esta tesis:

I.I Revistas incluidas en el Journal Citation Index:

1. - Traditional olive tree response to oil olive harvesting technologies. R. R. Sola-Guirado, S. Castro-García, G. L. Blanco-Roldán, F. Jiménez-Jiménez, F.J. Castillo-Ruiz, J.A. Gil-Ribes. Biosystems Engineering 118, 186-193. 2014. JCR 2012 con índice de impacto de 1,357; posición 11/57 (1º cuartil) en el área temática Agriculture, Multidisciplinary.
2. Vibration parameters assesemnt to developing continuous lateral canopy shaker harvesting for traditional olive trees R. R. Sola-Guirado, F. Jiménez-Jiménez, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, F.J. Castillo-Ruiz, J.A. Gil-Ribes. Spanish Journal of agricultural Research (aceptado para publicación en diciembre 2015).
3. Título: Olive Actual “on year” Yield modeling based on geometrical measurements of tree canopy. R.R. Sola-Guirado, F.J. Castillo-Ruiz¹, F. Jiménez-Jiménez¹, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, J.A. Gil-Ribes¹. Scientia Agricola (under review).

El autor cuenta con otra publicación relacionada indirectamente en revista internacional de impacto (JCR):

4. Analysis of fruit and oil quantity and quality distribution in high-density olive trees in order to improve the mechanical harvesting process. F.J. Castillo-Ruiz, F. Jiménez-Jiménez, G. L. Blanco-Roldán, R. R. Sola-Guirado, J. Agüera-Vega, S. Castro-García. Spanish Journal of Agricultural Research, 13 (2), 0209.

I.II Revistas no incluidas en el Science Citation Index

- 1.- Recolección mecanizada del olivar tradicional. Jesús Antonio Gil Ribes, Juan Agüera Vega, Gregorio Lorenzo Blanco Roldán, Sergio Castro García, R. R. Sola Guirado, F. Jiménez Jiménez, F. Castillo Ruiz. Agricultura: Revista agropecuaria, ISSN 0002-1334, N° 962, 2013, págs. 358-364
- 2.- La evolución de la fabricación de la maquinaria en el sector agrícola. R.R. Sola-Guirado, G.L. Blanco-Roldán. Revista Vida Rural, técnica. ISSN 1133-8938, N° 365, 2013, pags 36-42
- 3.- Innovación y transferencia de tecnología en la recolección mecanizada del olivar. J.A. Gil Ribes, G.L. Blanco Roldán, S. Castro García, F. Jiménez Jiménez, R.R. Sola Guirado, F.J. Castillo Ruiz. Interempresas. Grandes Cultivos, N° 2, 2015, pags 8-14.
- 4.- Nuevos desarrollos tecnológicos en la recolección mecanizada del olivar con destino almazara. J.A. Gil Ribes, G.L. Blanco Roldán, S. Castro García, F. Jiménez Jiménez, R.R. Sola Guirado, F.J. Castillo Ruiz. Vida Rural, . ISSN 1133-8938, N° 392, 2015, pags 54-60.
- 5.- Influencia de las características de las nuevas plantaciones de olivar en su recolección. F.J. Castillo Ruiz, J. Agüera Vega, G.L. Blanco Roldán, R.R. Sola Guirado, F. Jiménez Jiménez S. Castro García, J.A. Gil Ribes, Interempresas. Agricultura, N° 392, 2015, pags 54-60.
- 6.- El olivar desde otro punto de vista. R.R. Sola-Guirado. Mercacei. ISSN 1134-7104, N°. 84, 2015.
- 7.-Desarrollo de nuevos prototipos para la recolección mecanizada del olivar tradicional e intensivo. Gil-Ribes, J.A., Blanco-Roldán, G.L., Castro-García, S., Jiménez-Jiménez, F., Sola-Guirado, R.R., Castillo-Ruiz, F.J., Colmenero-Martínez, J.T. Agricultura Noviembre 2015, 18 - 21.
- 8.- El CPP Mecaolivar: Desarrollo de preprototipos no existentes en el mercado para la recolección mecanizada del olivar. Gil-Ribes, J.A., Blanco-Roldán, G.L., Castro-García, S., Jiménez-Jiménez, F., Sola-Guirado, R.R., Castillo-Ruiz, F.J., Colmenero-Martínez, J.T. Olimerca Diciembre 2015.

I.III Aportaciones en Congresos Internacionales:

- 1.- R.R. Rubén Sola-Guirado, J. A. Gil-Ribes, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, J. Agüera Vega, Francisco Jiménez-Jiménez, F.J. Castillo-Ruiz. 2013. Desarrollo de una cosechadora integral para olivar tradicional. VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. Madrid. España.
- 2.- Gregorio L. Blanco-Roldán, Francisco J. Castillo-Ruiz, R. Rubén Sola-Guirado, Francisco Jiménez-Jiménez, Sergio Castro-García, Juan Agüera-Vega and Jesús A. Gil-Ribes. 2014. Olive harvesting by canopy shaker. International Conference of Agricultural Engineering AgEng. Zurich.
- 3.- Francisco Jimenez-Jimenez, Gregorio L. Blanco-Roldan, Francisco J. Castillo-Ruiz, Sergio Castro-Garcia, Ruben Sola-Guirado, Jesus A. Gil-Ribes. 2015. Table Olives Mechanical Harvesting with Trunk Shakers: Orchard Adaption and Machine Improvements. Frutics. 9th Fruit, nut and vegetable production engineering symposium. Milán. Italia.
- 4.- R.R. Sola-Guirado, F.J. Castillo-Ruiz., S. Castro-García, F. Jiménez-Jiménez, G. L. Blanco-Roldán, J. A. Gil-Ribes, 2015. Influencia de la trayectoria y velocidad de un sacudidor de copa en la eficiencia de recolección de un olivar tradicional. VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. Orihuela-Algorfa. España.

Además de otros trabajos en congresos internacionales relacionados indirectamente con el tema de la tesis:

- 1.- G. Blanco-Roldán, Castro-García, F. Jiménez-Jiménez, F.J. Castillo-Ruiz, R.R. Sola-Guirado, J. A. Gil-Ribes. 2013. Recolección mecanizada del olivar de mesa con vibradores de troncos. VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. Madrid. España.
- 2.- F.J. Castillo-Ruiz., G. L. Blanco-Roldán, F. Jiménez-Jiménez, J.T. Colmenero-Martinez, S. Castro-García, R.R. Sola-Guirado, J. A. Gil-Ribes, 2015. Comportamiento de un vibrador de troncos orbital sobre un poste de acero empotrado en zapata de hormigón. VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. Orihuela-Algorfa. España.

I.IV Aportaciones en Congresos Nacionales:

- 1.- J.A. Gil Ribes, G.L. Blanco Roldán, S. Castro García, M. Pérez Ruiz, E. González Sánchez, F. Márquez García, J.L. Gamarra Diezma, A. Rodríguez Lizana, R. Muñoz Tejada, F. Jiménez Jiménez, J. Román Vázquez, R.R. Sola Guirado. 2011. Aplicaciones tecnológicas para el desarrollo de un olivar rentable y sostenible. III Jornadas nacionales del Grupo de olivicultura de la SECH. Sevilla.
- 2.- Jesús A. Gil-Ribes, Gregorio L. Blanco-Roldán, Sergio Castro-García, Rafael Muñoz-Tejada, Francisco Jiménez-Jiménez, Rafael Rubén Sola-Guirado, Brígida Jiménez-Herrera, Francisco García-Zamorano. 2011. Introducción de un sistema sacudidor de copa para la recolección mecanizada del olivar tradicional de almazara. Foro del olivar y el medio ambiente. XV Simposium Científico-Técnico de Expoliva. Jaén.
- 3.- R.R. Sola Guirado. 2013. Diseño y desarrollo de dispositivo basado en un sistema sacudidor de copa para la recolección integral del olivar tradicional y comparación con otros sistemas de recolección. II Congreso científico de investigadores en formación en agroalimentación de la eidA3 y II Congreso de investigadores en formación de la Universidad de Córdoba. Córdoba.
- 4.- F. Jiménez-Jiménez, S. Castro-García, G.L. Blanco Roldán, F.J. Castillo-Ruiz, R.R. Sola-Guirado, J. Agüera-Vega, J.A. Gil-Ribes. 2013. Análisis de la interacción de las varas del sacudidor de copa en el árbol para la recolección mecanizada de olivar de almazara. XVI Simposium Científico-Técnico de Expoliva. Jaén.
- 5.- J. A. Gil-Ribes, R. R. Sola-Guirado, Gregorio L. Blanco-Roldán, Sergio Castro-García, Francisco Jiménez-Jiménez, F.J. Castillo-Ruiz, Juan Agüera Vega. 2013. Análisis de los sistemas sacudidores de copa junto con otras alternativas en la recolección del olivar tradicional. XVI Simposium Científico-Técnico de EXPOLIVA. Jaén.
- 6.- R.R. Sola Guirado. 2014. Desarrollo de cosechadora integral de olivar tradicional con dispositivos sacudidores de copa. III Congreso científico de investigadores en formación en agroalimentación de la eidA3 y II Congreso de investigadores en formación de la Universidad de Córdoba. Córdoba.

7.- F.J. Castillo-Ruiz, G.L. Blanco Roldán, F. Jiménez-Jiménez, N. Serrano-Castillo, O. Arquero-Quilez, R.R. Sola-Guirado, S. Castro-García, J.A. Gil-Ribes. Aplicación y caracterización de diferentes podas en olivar tradicional para su adaptación a la recolección mecanizada. 2015. XVII Simposium Científico-Técnico de EXPOLIVA. Jaén.

8.- F.J. Castillo-Ruiz, G. L Blanco-Roldán, F. Jiménez-Jiménez,. R.R. Sola-Guirado, S. Castro-García., N. Serrano-Castillo, O. Arquero-Quilez, J.A. Gil-Ribes. 2014. Adaptación del olivar tradicional a los sacudidores de copa mediante la poda. IV jornadas nacionales del grupo de olivicultura de la SECH. 25-26 de septiembre, Baeza.

Además de otros trabajos en congresos nacionales relacionados indirectamente con el tema de la tesis:

1.- F. Jiménez-Jiménez, S. Castro-García, G.L. Blanco Roldán, F.J. Castillo-Ruiz, R.R. Sola-Guirado, J. Agüera-Vega, J.A. Gil-Ribes. 2013. Resultados en la adaptación de los vibradores de troncos para la recolección mecanizada del olivar de mesa: Campaña 2012. XVI Simposium Científico-Técnico de EXPOLIVA. Jaén.

I.V Solicitudes de patentes

1.- Máquina para recolección y gestión integral de frutos arbóreos y procedimiento de recolección. Interprofesional del aceite de oliva España y Universidad de Córdoba. Patente Num 201431949. R. R. Sola-Guirado, J.A. Gil-Ribes, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, F. Jiménez-Jiménez, F.J. Castillo-Ruiz. (en procedimiento de solicitud en OEPM).

2.- Cosechadora integral cabalgante y autopropulsada basada en vibración de tronco y sacudida de copa simultánea. Universidad de Córdoba. Patente Num 201531168 R. R. Sola-Guirado, J.A. Gil-Ribes, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, F. Jiménez-Jiménez, F.J. Castillo-Ruiz, S. Torres-García. (en procedimiento de solicitud en OEPM).

3.- Sistema y método de cosecha lateral de árboles frutales mediante vareo mecánico modular. Universidad de Córdoba-Moresil. Patente Num 201531334. R. R. Sola-Guirado, J.A. Gil-Ribes, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, F. Moreno-Martínez, J. Moreno-Martínez (en procedimiento de solicitud en OEPM).

Además de otras solicitudes de patentes indirectamente con el tema de la tesis:

- 1.- Mecanismo para recolección de frutos mediante brazos articulados desplegados. Patente Num 201531303. R. R. Sola-Guirado, J.A. Gil-Ribes, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, F. Jiménez-Jiménez, J.T. Colmenero Martínez, A. Mora-Velarde (en procedimiento de solicitud en OEPM).
- 2.- Banco de pruebas parametrizable para vibradores de troncos. Patente Num 201531304. R. R. Sola-Guirado, J.A. Gil-Ribes, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, F. Jiménez-Jiménez, J.T. Colmenero Martínez, A. Mora-Velarde (en procedimiento de solicitud en OEPM).
- 3.- Pinza vibradora de troncos regulable. Patente Num 201431302. R. R. Sola-Guirado, J.A. Gil-Ribes, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, F. Cuadros-Boiza, C. Cabrero-Carrasco, F.J. Castillo-Ruiz. (en procedimiento de solicitud en OEPM).
- 4.- Material de agarre para vibradores de troncos para la disminución del descortezado del árbol. Patente Num 201431823. R. R. Sola-Guirado, J.A. Gil-Ribes, G. L. Blanco-Roldán, S. Castro-García, F. Jiménez-Jiménez, F.J. Castillo-Ruiz. (en procedimiento de solicitud en OEPM).

Los resultados de las distintas publicaciones han sido evaluados en los procesos de revisión editorial lo que demuestra que han pasado un control exhaustivo y riguroso. Además la redacción muestra una coherencia razonable siguiendo los capítulos un orden cronológico, coherente y adecuado a la consecución de los objetivos perseguidos en la tesis. Hay que destacar la novedad de este trabajo en el campo de la recolección mecanizada del olivar tradicional, suponiendo la primera máquina cosechadora que pretende dar alternativa al problema de la plantación abordada de una manera única. Los resultados de la investigación aplicada son claramente tangibles mostrando a su vez la viabilidad de la solución desarrollada en un producto comercial con interés social.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, ____ de Abril de 2016

Firma de los directores

Fdo.: Prof. Dr. Gregorio L. Blanco Roldán

Fdo.: Prof. Dr. Jesús A. Gil Ribes

II. MENCIÓN DE DOCTORADO INTERNACIONAL

Esta tesis reúne los requisitos establecidos en el artículo 35 de Normativa de Doctorado de la Universidad de Córdoba para la obtención del Título de Doctor con Mención Internacional:

1. Estancia internacional predoctoral de 3 meses (27/07/2015-30/10/2015) en el “Dipartimento di Agraria” de la “Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria (Reggio Calabria, Italia) bajo la supervisión del Dr. Bruno Bernadi.

2. Informe previo de doctores externos con experiencia acreditada pertenecientes a alguna institución de educación superior o instituto de investigación distinto de España:
 - Assistant professor Dra Daniela Farinelli. Department of Agricultural, Food and Enviromental, Science. University of Perugia, Italia.

 - Assistant professor Dr. Turker Saracoglu. Department of Agricultural Machinery Systems. Adnan Menderes University, Turkey.

3. Miembro de tribunal evaluador de la tesis de un doctor perteneciente a alguna institución de educación superior o centro de investigación no español
 - Assistant Professor Dr. Sergio Tombesi. Department of Sciences of Sustainable Plant Productions. University of Piacenza, Italy.

4. La Tesis se ha redactado en español e inglés y será presentada en dos idiomas: castellano e inglés, tanto el resumen como las conclusiones de la misma.

El doctorando:

Fdo. Rafael Rubén Sola Guirado

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincera gratitud y reconocimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este Trabajo de Investigación:

A Jesús A. Gil Ribes y a Gregorio L. Blanco Roldán, Catedrático y Profesor Titular respectivamente, del Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Córdoba y codirectores de esta Tesis.

A Sergio Castro García y Juan Agüera Vega, Profesores del Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Córdoba, así como a todo el departamento y en concreto el Área de Mecanización.

A los entes colaboradores mediante diferentes medios, ya sea aportando recursos, instalaciones, desarrollos, personal, etc. como en el caso del Centro Tecnológico del Olivar y del Aceite (CITOLIVA), a la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía (IDEA), a la Organización Interaceituna, a Agrícola Noli S.A, a Moresil S.L y especialmente a la Interprofesional del aceite de oliva español (IAOE) que ha estado siempre presente apoyando y financiando, y al Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO).

A mis compañeros de trabajo miembros del grupo de investigación AGR-126 y en especial de laboratorio por sus entretenidos debates y consejos durante las largas jornadas de laboratorio y ensayos de campo.

A mi familia, por su apoyo incondicional en todo momento.

Por último, a todos aquellos que durante estos años han estado a mi lado, muchas gracias.

"...with engineering, I view this year's failure as next year's opportunity to try it again. Failures are not something to be avoided. You want to have them happen as quickly as you can so you can make progress rapidly."

“...con la ingeniería, he visto los fallos de este año como la oportunidad del siguiente para intentarlo otra vez. Los fallos no son algo a evitar. Quieres que ocurran tan pronto como sea posible para progresar rápidamente.”

Laura Schmitt (May 2000). "An interview with Gordon Moore" cofunder of Intel Corporation. *Ingenuity* 5 (2). Retrieved on 2006-11-06.

RESUMEN

El olivar español es el primer productor mundial de aceite (40%) y de aceituna de mesa (25%). La mayor parte del olivar no es rentable y es clave reducir sus costes. Dado que la recolección supone del orden del 50% de su valor, en ella se deben centrar los esfuerzos. No existe una solución única válida para la recolección de todos los tipos de olivar, aunque, en olivares modernos de media y de alta densidad existe un alto grado de mecanización. Sin embargo, el olivar tradicional, que representa casi el 70% del total, no dispone de una cosechadora. Su introducción supondría un cambio tecnológico y una innovación clave para este tipo de olivar. La presente memoria expone los resultados obtenidos en I+D+i con el objetivo principal de desarrollar la primera cosechadora para la recolección integral de olivar tradicional.

En una primera fase, se realizó un estudio de un sistema sacudidor de copa procedente de cítricos para su aplicación a olivar, determinando las características de la sacudida y del funcionamiento de la máquina en campo. Posteriormente, se completaron estos estudios, determinando la forma y zona de caída de los frutos. Por último, se desarrolló un sistema de recepción, logística, limpieza y almacenaje del fruto para incorporación de, alcanzándose resultados muy prometedores en la recolección integral del árbol.

En fases posteriores, se realizó una caracterización de árboles y plantaciones tradicionales para poder realizar un diseño específico de sistema de derribo adaptado a esta tipología. Tras un proceso de investigación sobre los principios de la sacudida de la copa y el desprendimiento de los frutos, se avanzó en el diseño y fabricación de nuevos sistemas de sacudida de copa, así como en el desarrollo de tecnología para el copiado automático del contorno del árbol. Los nuevos sistemas para derribar las aceitunas alcanzaron resultados prometedores para su aplicación al olivar tradicional, adaptándose a su morfología y a las características singulares de sus árboles.

Finalmente, fruto del trabajo realizado en la línea 1 del convenio Mecaolivar, toda la investigación desarrollada se materializó en la fabricación de un prototipo de cosechadora con sistema sacudidor de copa para el olivar tradicional. Estas máquinas demuestran la viabilidad de la cosecha integral de los olivos tradicionales.

Palabras clave: Aceite, olivar tradicional, recolección, sacudidor de copa, cosechadora.

SUMMARY

Spain is the biggest producer country of table and olive oil in the world. The most olive orchards are not profitable and it is necessary to reduce their costs. Harvesting is able to reach 50% of the total of cost of production and is a key factor to study. There are not a single solution for harvesting all the kind of orchard of olive, despite the high grade of mechanization in high density orchards. However, in the typology of traditional orchards, which is spread in 70% of the total of Spanish surface, is not available any mechanical integral harvesting system. The introduction of a harvester may represent a technological and innovative change as a key factor for this typology. This work exposes the results obtained in the R&D&I, whose main objective is to develop the first harvester for traditional olive orchards.

In a first stage, a commercial canopy shaker for citrus was employed to olive harvesting to determine the main parameters of the removal system and his field work. Before, it was studied the location of detached fruits. Finally, a system for collecting, cleaning and storing detached fruits was developed and incorporated to the commercial canopy shaker, reaching very promising results in integral harvesting.

In next stages, traditional orchards and trees were characterized to design an adapted removal system. Different removal devices were developed in a researching way for the study of canopy shaking. Also, it was developed an automatic system to keep in contact the removal device with the crown tree. The canopy shakers devices had very promising results for traditional trees adapting to the heterogeneous morphologies of crowns.

Finally, as a consequence of the Mecaolivar project, the whole research of this work was materialized in the design and manufacturing of a continuous harvester with a canopy shaker for traditional olive orchards. These machines demonstrate the viability of mechanical integral harvesting of traditional olive trees.

Keywords: Olive oil, traditional olive orchard, harvesting, canopy shaker, harvester

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

1. Presentación y marco de la tesis doctoral.

El presente trabajo de investigación se ha desarrollado dentro del grupo de investigación AGR-126 que dirige el Profesor J. A. Gil Ribes, en el seno de varios proyectos durante el período de 2010/16 dentro de la línea de investigación de “Recolección mecanizada del olivar”.

La investigación desarrollada partió del proyecto titulado “Nuevas tecnologías en la recolección mecanizada del olivar tradicional” en la campaña 2009/10 con el estudio de maquinaria de otros cultivos aplicable a olivar tradicional. A partir de entonces se comenzó el proyecto “Sistemas avanzados de recolección integral del olivar tradicional” con el objetivo de diseñar y fabricar de un prototipo de sistema de recepción, limpieza, carga y descarga de fruto que, acoplado al anterior sistema, demostrara la viabilidad de la recolección integral del olivar tradicional y demandar al sector la financiación necesaria para su desarrollo. El proyecto concluyó con una demostración en la finca “La Mata” en Lucena en febrero de 2012. Posteriormente, se realizó una continuación del proyecto para el desarrollo e investigación de un prototipo específico para olivar. En Noviembre de 2013 comenzó el convenio de Compra Pública Precomercial Mecaolivar, en el que en una de sus líneas se licitó el desarrollo de cosechadoras integrales para olivar tradicional basada en sacudidores de copa y en la que se colaboró con varias empresas, y donde se pone de manifiesto todo el conocimiento generado en esta tesis materializado en prototipos precomerciales.

2. Justificación

En los últimos años, el diseño de nuevas plantaciones en diversos cultivos como el almendro, naranjo, pistacho y olivar se ha extendido rápidamente frente a los modelos tradicionales preexistentes. El principal motivo de esta tendencia junto con el abandono del modelo tradicional, ha sido las ventajas que representan para la mecanización de diversas tareas que en las plantaciones tradicionales se dificultan enormemente al estar formadas por árboles viejos de gran envergadura y heterogéneos, en muchos casos en suelos poco fértiles (Pérgola *et al.*, 2013) y con amplios espacios entre ellos (Ramos & Santos, 2010). Sin embargo, estas plantaciones tradicionales están aún muy extendidas y tienen una función social, medioambiental y productiva muy importante.

Este es el caso de gran parte de las plantaciones de olivar de la cuenca mediterránea donde se agrupa el 97% de la producción mundial. En concreto, en España con el 40 %

de la producción mundial de aceite de oliva (AICA, 2014) existen 2 605 000 ha de plantaciones de olivar (ESYRCE, 2015) donde más de 70 % son tradicionales.

La viabilidad del olivar no depende solo de su rentabilidad, sino de las adaptaciones de las plantaciones a cambios tecnológicos, medioambientales, económicos, de mercado y políticos (Gómez-Limón & Riesgo, 2010). Existen factores que afectan a los costes de la plantación como el riego, la densidad de árboles por hectárea, el número de troncos por árbol, inclinación del terreno, etc. (Wiesman, 2009), pero, además, inciden otros factores socio-económicos (Beltrán-Esteve, 2013) como la falta de un precio fijo, tener un mercado origen que no puede consumir toda la producción, la deficiente gestión en el proceso de producción, los cambios generacionales en las explotaciones, la atomización de la mayor parte de la superficie plantada, la aparición de nuevas plantaciones más rentables y el impacto de políticas agrarias.

Los costes en las plantaciones tradicionales son muy altos en comparación con las plantaciones emergentes de alta densidad. El olivar tradicional está en crisis dado que los costes de producción son mayores que los del producto final si no se tienen en cuenta las ayudas económicas. Para mejorar la rentabilidad de este tipo de plantaciones tradicionales, es necesario reducir costes en diversas labores y en concreto en la recolección que representa más 40% de los costes de producción (Barranco, Fernández-Escobar & Rallo, 2010).

La gran variedad en los diferentes tipos de olivar que existen, ya sea por el tipo de plantación como por la formación de los árboles, deriva en la inexistencia de soluciones generalizadas para la mecanización de la recolección pues depende de varias características como la superficie a recoger, producción, formación de los árboles, topografía, coste de recolección y el precio pagado por el fruto. De este modo se puede afirmar que no existe solución válida para todo tipo de olivar. (Gil-Ribes, Blanco-Roldán & castro-García, 2009).

En los últimos cuarenta años se ha producido una evolución constante e importante de las técnicas para el derribo del fruto sobre todo basadas en la vibración y más recientemente en sistemas sacudidores de copa y cosechadoras de olivar intensivo. Sin embargo, la recolección del olivar está muy condicionada al empleo de mano de obra para la recogida, limpieza, carga y descarga del fruto derribado que limita los rendimientos de la operación global de recolección y aumentan los costes. Por otro lado,

no existe posibilidad de adaptar los árboles tradicionales para ser recolectados mecánicamente con los medios de recolección actuales.

La necesidad de reducir costes de producción, aumentar la capacidad de trabajo y la calidad del aceite producido, conlleva a que las tendencias recolección avancen hacia la mecanización integral que incluye la gestión del fruto derribado (Ferguson, 2006).

En este camino, una cosechadora integral de aceituna sería la solución más eficiente que hiciese todas o la mayor parte de las operaciones, basada en el derribo y recogida del fruto simultáneo llegando a una recolección integral. Sin embargo, esto solo es posible en plantaciones de un solo pie, donde la plantación haya sido diseñado para estas funciones como los olivares de alta densidad. En cambio, en los olivares tradicionales de varios pies, que son los más habituales, hay que separar el derribo de la recogida puesto que no existen máquinas adaptadas para realizar ambas tareas y no existe ninguna solución para la recolección integral. En este sentido, los sistemas sacudidores de copa laterales han mostrado la posibilidad de derribar y interceptar simultáneamente el fruto en otros cultivos como cítricos (Savary, Ehsani, Schueller & Rajaraman, 2010) o en olivar de aceituna de mesa (Castro-García *et al.*, 2009). El potencial de esta tecnología podría aportar una solución al problema recolección integral continua del olivar tradicional.

Es de vital importancia el desarrollo de una cosechadora para reducir costes y dar una alternativa para la viabilidad de las plantaciones tradicionales. Es clave introducir este cambio tecnológico, aunque, no se puede olvidar que en muchas zonas el modelo de mecanización integral no puede ser aplicado por las altas pendientes, el tamaño de las explotaciones y su fisiología o las tradiciones (Vieri & Sarri, 2010).

Para avanzar en esta línea, es necesario un largo proceso de desarrollo tal y como ha sido llevado con otro tipo de maquinaria como en los vibradores de troncos que llevan perfeccionándose durante décadas. Además, es necesario conocer la tecnología existente en el ámbito del derribo y estudiar las posibles alternativas. Una vez, realizado este estudio, se debe hacer un estudio de la viabilidad de un nuevo sistema que se adapte a estas especificaciones y conocer su funcionamiento. Para ello, hay que conocer las características del olivar tradicional y sus árboles para poder diseñar una máquina específica. La conjunción de este conocimiento científico-técnico podrá ser integrado teniendo en cuenta el binomio máquina-árbol para posibilitar la creación de cosechadoras para la recolección integral del olivar tradicional y aplicables al intensivo.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta el marco en el que se ha desarrollado la tesis dentro de la mecanización del olivar. Se expone una revisión del uso de sacudidores de copa y sus características particulares como alternativa para el desarrollo de una cosechadora, teniendo en cuenta la máquina y su interacción con el árbol.

1. El olivar

1.1 *Superficie, distribución y producción*

Según el Consejo Oleícola Internacional (COI, 2012) la superficie mundial dedicada al olivar se ha incrementado un 0,98% en los últimos años, hasta situarse en 10,27 millones de hectáreas, de las que en torno a 2,5 millones corresponden a España, donde el aumento fue del 0,87%. La producción total de aceitunas asciende a más de 18 millones de toneladas anuales, de las cuales el 90% se destinan a la producción de aceite y el 10% restante a la producción de aceituna de mesa. En Figura 1 se puede observar el reparto relativo de producción mundial.

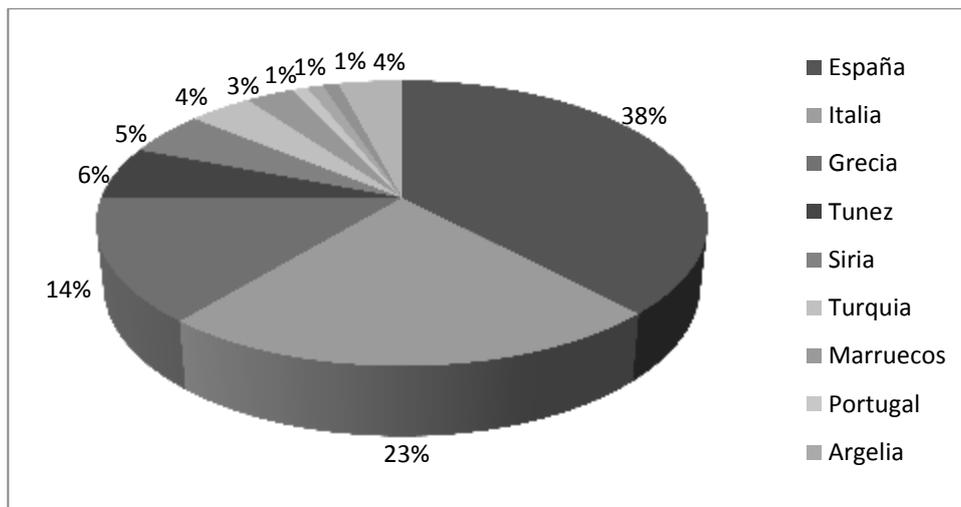


Figura 1. Países productores de aceite de oliva. Datos medidos de 2002-2007 (Fuente: COI 2012)

En cuanto a la distribución a nivel nacional, el olivar ocupa el 5% de la superficie total de España y sólo es superada en extensión por los cereales. Supone el 14% de la superficie cultivable del país con en torno al 51% de la superficie dedicada a los cultivos leñosos (MAGRAMA, 2015).

Desde el punto de vista histórico, la evolución de la superficie de olivar en producción entre 1985 y 1993 se mantuvo prácticamente estable en 2 060 000 ha. A partir de 1994 el olivar empieza a incrementarse en unas 25 000 ha anuales como media,

de esta superficie 22 000 ha son de olivar de almazara y 3 000 de olivar de mesa. El olivar total ha seguido incrementándose en los años 2007 y 2008 en unas 35.000 ha anuales. Actualmente, España cuenta con 2 605 000 hectáreas de olivar, de las que el 3,1% se dedican a la aceituna de mesa, 94,9% se dedican a aceite y el 2% tienen doble aptitud (ESYRCE 2015).

Existe una distribución claramente prioritaria en el sur del país, siendo Andalucía las comunidades autónomas donde se agrupa la mayor superficie de olivar (62%) seguida por Castilla-La Mancha (14%) y Extremadura (11%). Además, hay que destacar que desde el punto de vista de la concentración de la producción, el 38% del total se cubre en las provincias de Jaén (562 000 ha) y Córdoba (341 000 ha). El 80% de la producción nacional es andaluza, mostrando esto su enorme importancia económica social en esta comunidad.

En Andalucía se da un alto grado de parcelación del olivar. El 30% de la superficie está dividida en parcelas inferiores a 5 ha, y más del 60% de la superficie posee menos de 20 ha. Este factor incide directamente en la dificultad para mecanizar el cultivo, la amortización de la maquinaria, la necesidad de buscar ingresos complementarios a la actividad agrícola y, por consiguiente, la falta de profesionalidad del sector. En este sentido, sólo el 60% de los titulares de explotaciones agrícolas tienen a la agricultura como única actividad, y del 40% restante, sólo en el 5% la agricultura es su principal actividad, siendo en el 35% restante su actividad secundaria (Serrano; Romacho & Arquero, 2012).

1.2 Tipologías

Aunque el espectro de sistemas de cultivo en el olivar español es muy variado en diseño y plantaciones se puede realizar una clasificación de la tipología de olivar (Figura 2) desde el punto de vista de la mecanización hablando de varias tipologías según la densidad de plantación y número de troncos o pies (Rallo *et al.*, 2013).

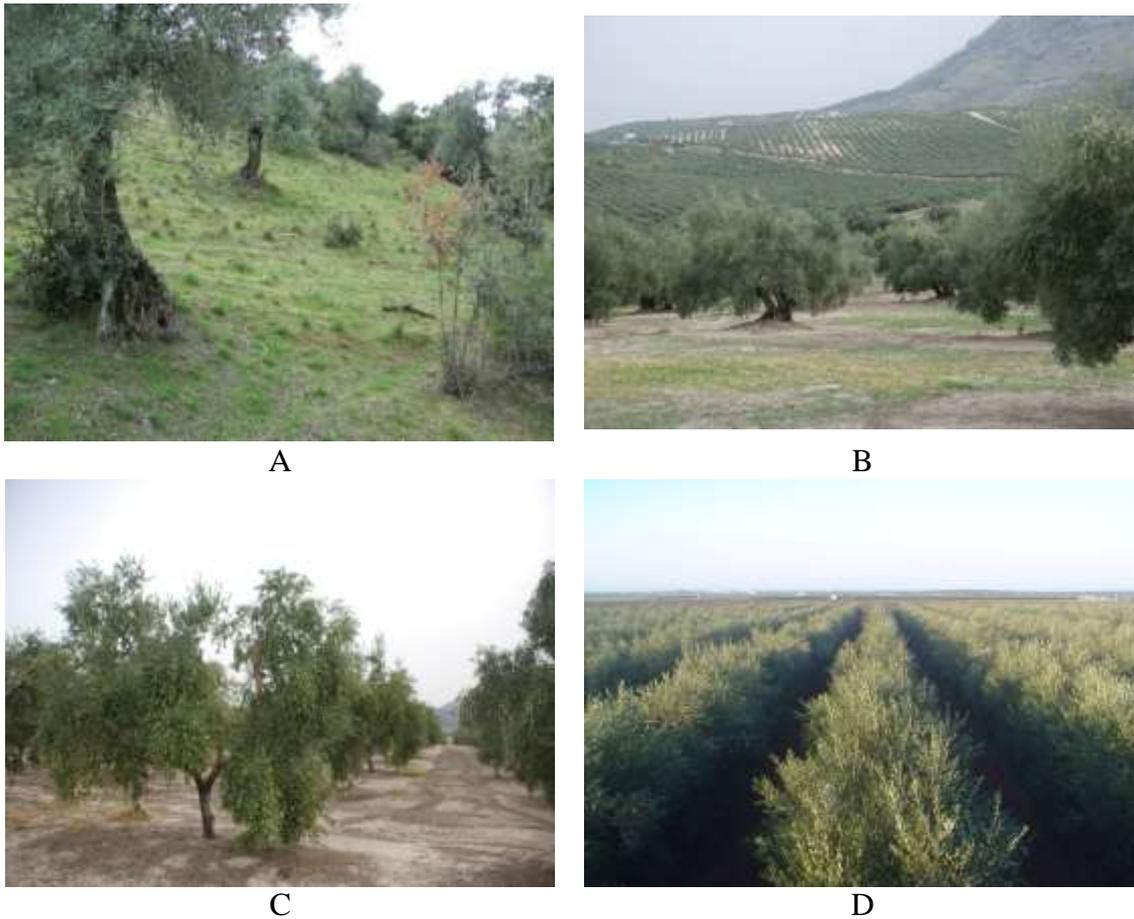


Figura 2. Tipologías de olivar. A: Olivar tradicional no mecanizable, B: Olivar tradicional mecanizable, C: Olivar intensivo, D: Olivar superintensivo

1.2.1 *Olivar tradicional*

Los árboles se disponen en marcos amplios con densidades entre 70 y 120 árboles ha^{-1} pudiendo llegar a 300 árboles ha^{-1} y normalmente con 2, 3 o 4 pies por árbol. Son comunes los marcos a 9x9 m, 12x12 m, y a tresbolillo entre 12 y 14 m. Normalmente se encuentra en régimen de secano, aunque en los últimos años se han introducido regadío en muchas plantaciones incrementándose las producciones significativamente. Los rendimientos medios oscilan entre los 2 000 y los 4 000 kg ha^{-1} en secano, pudiendo doblarse en regadío. Este a su vez puede ser dividido en dos grupos en olivar tradicional mecanizable en pendientes menores del 20% y olivar tradicional no mecanizable en pendientes superiores al 20%.

1.2.2 *Olivar intensivo*

Los árboles se disponen en marcos rectangulares a un solo pie, con la copa en vaso adaptados a la recolección en vibradores de troncos, en la mayor parte de los casos. Pueden tener densidades entre 200 y 400 árboles ha^{-1} en regadío, y 150 y 250

árboles ha⁻¹ en secano aunque se encuentran comúnmente en condiciones de regadío. Pueden obtener rendimientos entre 8 000 y 15 000 kg ha⁻¹. Vida útil probada superior a 40 años. Los marcos de plantación varían, aunque se suele dejar un ancho de calle de entre 6 y 8 m. para facilitar la mecanización. La distancia entre olivos dentro de una fila varía, siendo distancias comunes entre 4 y 7 m.

1.2.3 *Olivar superintensivo*

Los árboles están dispuestos linealmente en seto a un solo pie. Su densidad de plantación suele estar entre 450 y 800 árboles ha⁻¹ en un seto amplio, aunque puede alcanzar hasta 1 500 árboles ha⁻¹ en un seto más estrecho. Están adaptados para su recolección integral mediante cosechadoras. No se dispone de calles anchas de más allá de 4 m y entre árboles de 1,5 m. Tienen una vida útil probada hasta 15 años con rendimientos en máxima producción de 15 000 a 20 000 kg ha⁻¹.

El tipo de plantación más habitual en la superficie mundial, y especialmente en España, es el olivar tradicional, aunque debido a la tendencia a la mecanización y aumentos de rentabilidad existe tendencia al aumento de las plantaciones de alta densidad que todavía está limitada debido a su dificultad de manejo, insumos, vida útil y alta inversión (Bernardi, Giametta & Sciarrone, 2008). Sin embargo, estas últimas presentan el atractivo de permitir una recolección mecanizada integral y, por tanto, una reducción de costes, sirviendo de ejemplo para la introducción de nuevas tecnologías al resto de tipologías de olivar (Figura 3).

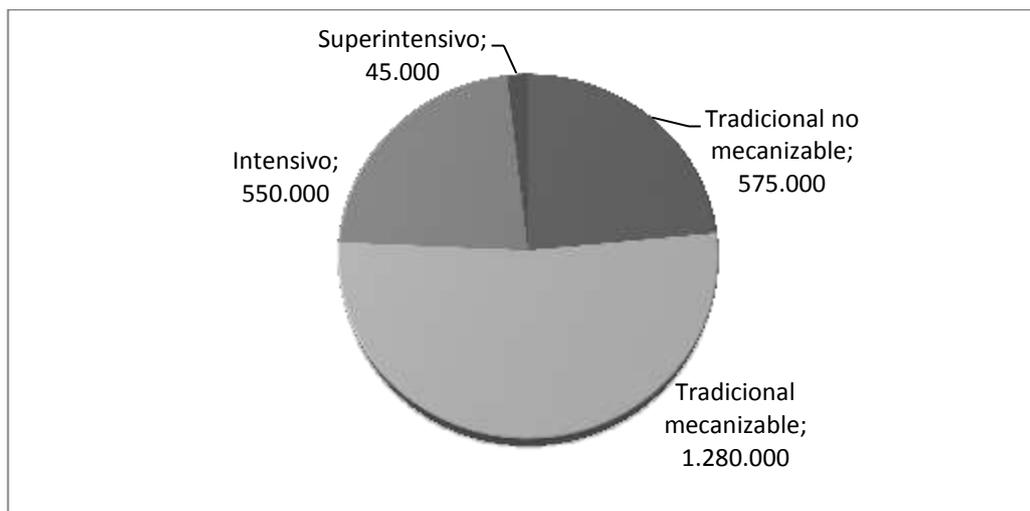


Figura 3. Distribución de los distintos tipos de olivar en España (Fuente: ESYRCE 2013).

2. Costes en el olivar

2.1 *Estructura de costes*

Actualmente, el olivar pasa por una época de baja rentabilidad económica debido a los precios que el mercado impone y que no se corresponden a los beneficios que se obtienen del cultivo en todas los tipos de plantaciones. Esta situación lleva a que algunas plantaciones con tipología de olivar tradicional no puedan subsistir sin ayudas económicas (Duarte, Jones & Fleskens, 2008), por lo que a corto plazo puedan desaparecer, y que en cambio, otras plantaciones mecanizadas se encuentren dentro de estos umbrales de beneficio.

Tomando de referencia un estudio sobre “El olivar Andaluz” (CAP, 2005) se puede sacar conclusiones sobre la influencia de las principales variables que pueden afectar a los costes del cultivo.

- Densidad de plantación: La densidad media de las explotaciones olivareras andaluzas se sitúa en torno a 132 árboles ha⁻¹. Esta tradición en el modo de plantación conlleva a que exista un menor rendimiento de cosecha por hectárea de cultivo por lo que la rentabilidad económica es menor.
- Estructura de la plantación: En el total de explotaciones del olivar andaluz las explotaciones con más de 1 pie son aún mayoritarias, representando el 73,7% las explotaciones y el 78% de la superficie. Esto supone que las tareas de recolección sean más pesadas y caras y que baje la rentabilidad final.
- Rendimiento productivo: En Andalucía, los intervalos de rendimientos productivos y su porcentaje de superficie en los que se sitúan las explotaciones olivares son: menos de 2 000 kg ha⁻¹, 34,2%; de 2 000 a 4 000 kg ha⁻¹, 29,2%; de 4 000 a 6 000 kg ha⁻¹, 19,6%. La mayoría de la explotaciones y su superficie del cultivo tienen los rendimientos de producción por hectárea más bajos lo que supone que a su vez sean los menos rentables.
- Mano de obra: La cantidad de labor de trabajo empleada depende de muchas variables, pudiendo generar un empleo de entre 10 y 30 jornales ha⁻¹ lo que manifiesta la importancia de este cultivo como generador de empleo, en todo caso condicionada a la mayor o menor producción de la campaña. Sin embargo, el uso de la mano de obra, provoca el incremento de los costes de recolección repercutiendo negativamente en la rentabilidad del cultivo. Además la

realización de las tareas de recolección suele ser una tarea dura que puede conllevar a problemas de salud y riesgos laborales en el uso de la maquinaria.

- Pendientes de la plantación: En el olivar de sierra el rendimiento de la maquinaria y de las personas es menor. Aproximadamente el 50% de las explotaciones se localiza en pendientes superiores al 15% lo que hacen que muchas soluciones a la recolección mecanizada no sean viables y que sean peligrosas por el vuelco de maquinaria.

Además, existen otros muchos factores que afectan directamente a la rentabilidad de las plantaciones como su nivel de irrigación, la variedad cultivada, etc. Para profundizar en la comprensión de los costes, y concretamente de la escasa rentabilidad del olivar tradicional, cabe hacer referencia a un desglose de costes por tipología de cultivo y operaciones en el cultivo. Esta división es necesaria llevarla a cabo puesto que cada sistema de cultivo tiene unos costes determinados y unos rendimientos productivos que varían según las características comentadas. De esta manera para representar una idea de la rentabilidad real de cada sistema de cultivo sería necesario hacer una comparación con lo que cuesta producir 1kg de aceite y 1kg de aceituna, y así poder situar cada sistema en su lugar respecto al precio del producto en el mercado. A esto hay que sumarle de un umbral del precio del aceite que teóricamente debería ser el precio del mismo en origen (almazara) para que el agricultor obtenga un beneficio del 20%. Estos costes se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tabla 1. Datos de costes en las distintas tipologías de olivar (Fuente: AEMO, 2012)

Tipología	Coste total (€ ha ⁻¹)	Producción (kg ha ⁻¹)	Coste aceituna (€ kg ⁻¹)	Coste aceite (€ kg ⁻¹)
Tradicional No Mecanizable	1 076,2	1 750	0,61	3,21
Tradicional Mecanizable secano	1 512,6	3 500	0,43	2,30
Tradicional Mecanizable regadío	2 261,9	6 000	0,38	2,02
Intensivo secano	1 598,7	5 000	0,32	1,73
Intensivo regadío	2 375,7	10 000	0,24	1,32
Superintensivo	2 468,8	10 000	0,25	1,37

Sin embargo, el precio promedio del aceite de oliva en el mismo año del estudio rondaba el 1,71€ kg⁻¹ (Poolred, 2012), aunque en la actualidad se encuentre a 2,16€ kg⁻¹ y 2,27 para el virgen extra (Poolred, 2015), teniendo en cuenta las altas fluctuaciones de

precio dependiendo diferentes variables. Esta es la razón para que los cultivos tradicionales, que como se ha mostrado son la mayor superficie existente, precisen de una subvención para poder ser viables económicamente (Graaff & Eppink, 1999), es decir, para cubrir los costes planteados de producción y producir un pequeño beneficio.

En resumen, los costes del cultivo del olivo, y de la obtención de un kilogramo de aceite, son en general altos si se comparan con los precios que marca el producto en origen, especialmente cuando se trata de los sistemas tradicionales tanto mecanizables como no mecanizables.

Existen diferencias significativas en los costes de producción entre los distintos sistemas de cultivo, resultando las tipologías de intensivo y superintensivo las más ajustadas debido a su mecanización. En cualquier caso, cabe destacar que en estas tipologías no se están considerando, los costes de amortización de la plantación y la vida útil de las plantaciones que deberán ser retraídos, en cada caso, de los márgenes resultantes (Bernardi, Giametta & Sciarrone, 2008).

2.2 Alternativas para la reducción de costes.

Ante las circunstancias planteadas sólo caben tres soluciones: el aumento del precio del aceite vía promoción y aumento de la demanda, la reducción de los costes optimizando la mecanización o el cambio del sistema de cultivo mediante una reconversión racional a olivares más intensivos y mecanizables.

El tema de la promoción e incremento de precio es un campo en el cuál poco se puede hacer desde la técnica pues influyen factores político-económicos ajenos y que está siendo abordado por las interprofesionales del sector.

El tema de la reconversión del olivar, es un tema bastante complejo visto la situación tan delicada que vive el sector, y los costes tan altos que plantea la realización de esta tarea. El caso de los olivares tradicionales que vegetan en alta pendiente (no mecanizables) es el más preocupante puesto que no es viable el cambio de sistema de cultivo, ni aumentar la mecanización para reducir costes. En general, se encuentran varias limitaciones: la primera es de carácter orográfico; aunque se está intentado adaptar la maquinaria para que sea capaz de trabajar en condiciones de pendiente superior; la segunda es de tamaño: la media de las explotaciones andaluzas es de apenas 4 ha, de manera que sólo una política de concentración parcelaria o de gestión mancomunada de explotaciones colindantes hasta alcanzar un tamaño idóneo harían

posible su reconversión; la tercera de dedicación al sector: en Andalucía el 80% de los olivicultores tienen una actividad principal diferente a la agrícola; la cuarta es la limitación la relativa a la disposición de agua; y por último, el de los costes de la transformación: que supone un desembolso importante y, a la vez, un volumen de negocio (Sánchez, 2012).

Por otra parte, para conocer la reducción de costes mediante la mecanización es necesario saber su distribución de los mismos en función de la tipología (Tabla 2). La recolección es la operación más importante, acercándose al 40%, y la reducción de sus costes mediante la máxima mecanización resulta clave en la búsqueda de la rentabilidad.

Tabla 2. Costes (€ ha⁻¹) de distintas operaciones en olivar (Fuente: AEMO, 2012)

Tipología	Poda	Suelo	Tratamientos	Fertilización	Riego	Recolección
Trad. No Mecanizable	193,5	279,7	165,14	70,3	0,0	367
Trad. Mecanizable	257,7	403,3	179,32	77,6	434,0	595
Intensivo	262,4	394,6	216,38	110,3	472,0	615
Superintensivo	460,6	236,7	281,83	122,7	511,0	810

3. Necesidad de mecanización de la recolección

La mecanización desempeña un papel estratégico, especialmente para reducir los costes de producción ya que permite reducir el tiempo y el esfuerzo que dedican los operarios a la ejecución de las operaciones de cultivo. Es preciso conocer las ventajas que ofrece la mecanización de la recolección y cuáles son los requisitos para que las máquinas puedan rendir adecuadamente, cumpliendo con los objetivos de obtención de un producto de calidad, garantía de seguridad en el trabajo, reducción de la mano de obra y disminución de costes (COI, 2007).

Por otro lado, cada vez se aprecia más la calidad y la seguridad alimentaria por lo que se han de obtener producciones de la máxima calidad con los costes lo más reducidos posibles, lo que sólo es posible con su mecanización integral y especialmente la de la recolección, que supone por si sola la mayor parte de los costes del cultivo (Gil-Ribes, Blanco-Roldán & Castro-García, 2010).

Para la obtención de aceites de calidad hay que separar la aceituna del vuelo de la caída en el suelo, por lo que se hace una distinción entre el derribo del fruto y su interceptación. Es importante clasificar las operaciones utilizadas en la recolección del olivar. Para ello, es necesario diferenciar cuando se realiza la recogida de las aceitunas caídas al suelo, ya sea de forma natural o derribada por máquinas, y cuando se realiza sobre frutos derribados sobre mallas (Gil-Ribes, López-Giménez, Blanco-Roldán & Castro-García, 2008).

3.1 *Recolección de la aceituna directamente del árbol.*

Esta es la operación fundamental para la mecanización del olivar y la que, actualmente, más mano de obra requiere. Se descompone en varias tareas (Figura 4): derribo del fruto, recepción del fruto derribado, carga, limpieza y transporte. La mecanización de las tareas se realiza de forma independiente o agrupada, en función del tipo de plantación.



Figura 4. Proceso habitual de recolección olivar con operaciones discontinuas: Derribo sobre lonas, manejo de lonas, logística en campo, almacenamiento intermedio y transporte a almazara.

3.1.1 *Derribo del fruto*

Los sistemas tradicionales de recolección de aceituna han sido el ordeño y el vareo. El método tradicional del ordeño utiliza principalmente la tracción. Con el vareo se transmiten fuerzas de tracción y de flexión (Blanco-Roldán, Gil-Ribes, Agüera, & Castro-García, 2005). Sin embargo, el sistema de vibración de troncos es el que ha resultado más eficaz para el derribo de los frutos, con el apoyo de equipos manuales auxiliares en estas tareas. Por último, están proliferando otra modalidad de máquinas basadas sistema de sacudida mecánica en la copa. Por tanto, los sistemas de derribo de

fruto mecanizados se pueden clasificar según su patrón de vibración y según su punto de aplicación en el árbol (Figura 5).

Vibradores: Generan un movimiento de baja amplitud y alta frecuencia. Se pueden clasificar en función de dos criterios: su punto de aplicación y las características de la vibración generada. Así, existen vibradores de troncos y de ramas, y vibradores unidireccionales, multidireccionales y orbitales.

Sacudidores: Generan un movimiento de baja frecuencia y alta amplitud. Se pueden clasificar en función de su ámbito de aplicación siendo los más extendidos los sacudidores de ramas de tipo unipersonal y los sacudidores de copa.



Figura 5. Diferentes sistemas de derribo de aceituna. A: Vareo manual, B: Vibrador de ramas, C: Vibrador de troncos, D: Sacudidor de ramas

3.1.2 *Recepción del fruto derribado*

El método tradicional consiste en la colocación de unas mallas o lonas debajo del árbol en la zona de goteo, cubriendo la superficie de suelo necesaria para evitar pérdidas de fruto. Las mallas se extienden y recogen a mano o con la ayuda de equipos específicos. Su contenido se deposita en dispositivos auxiliares como una pala cargadora acoplada a un tractor, en unas lonas más pequeñas que se manipulan con una

pluma también acoplada al tractor, o en dispositivos que arrollan las lonas por ruedas giratorias enfrentadas.

Existe la posibilidad de realizar una recolección integral con derribo y recepción simultánea en plantaciones adaptadas con maquinaria específica. Este punto será tratado a continuación más detalladamente.

3.1.3 *Carga, limpieza y transporte del fruto*

La última operación en campo de la recolección es la carga del fruto en el remolque para su transporte a la almazara. Esta operación no depende tanto del tipo de plantación sino del tipo de maquinaria que se ha utilizado para la recolección, siendo necesaria, sobre todo en la recolección de la aceituna del suelo, una limpieza previa de los frutos.

3.2 ***Recolección de la aceituna del suelo***

Si el porcentaje de fruto caído de forma natural es muy alto, se puede optar por derribar el que queda en el árbol directamente sobre el suelo y recoger toda la cosecha como aceituna de suelo. Aunque lo ideal es adelantar la recolección de tal manera que el porcentaje de fruto caído de forma natural sea muy bajo y no se coseche. En estos casos, se necesita una preparación previa del terreno manteniéndolo limpio.

Las operaciones para este método son: hilerado o agrupación de frutos, recogida, limpieza y carga de aceituna limpia y se hace con equipos compuestos o descompuestos (Blanco-Roldan, Gil-Ribes, Agüera-Vega & Castro-García, 2005). Todas estas máquinas tienen en común que son de poca altura para penetrar bajo la copa, siendo conveniente sacar la aceituna del ruedo con sopladoras para que puedan trabajar las recogedoras. Existen distintos equipos para las tareas comentadas que pueden estar compuestos o descompuestos. Las barredoras-hileradoras agrupan la aceituna dispersa en la zona de caída en una zona más pequeña para facilitar su recogida. Las barredoras-recogedoras realizan todas las tareas.

Aunque la recogida del suelo sigue estando muy difundida, este sistema debería sustituirse, realizando intervenciones a largo plazo que modifiquen la estructura y el tamaño de los árboles, para permitir recolectar directamente del árbol y a un coste económico. Además, esta práctica conlleva a la producción de un aceite de mala calidad que se destina al refinado.

3.3 *Recolección integral*

La recolección integral es el proceso en el que se integra el derribo de fruto con la interceptación y manejo simultáneo del mismo. En la actualidad, los sistemas de recolección integral mecanizada más destacados que existen para plantaciones adaptadas para tal fin son el paraguas invertido, las plataformas con planos inclinados (Figura 6).y los sistemas sacudidores de copa sobre cosechadoras cabalgantes (Figura 7)



Figura 6. Vibradores de troncos con paraguas invertido (A) y plataformas con planos inclinados (B)

El equipo habitualmente más usado es el paraguas invertido. Es un dispositivo que lleva un vibrador de troncos dotado de movimientos de apertura, cierre de la pinza y otros para su aproximación y adaptación al tronco para que pueda ser vibrado por este. En el paraguas invertido, los árboles deben estar formados pensando en este método para un rendimiento adecuado, esto es, árboles de un solo pie, cruz alta, podas favorecedoras de la transmisión de la vibración y que se evite el vareo complementario en la medida de lo posible pues es complicado de realizar.

Otro tipo de máquinas basadas en la vibración y recepción de frutos son las plataformas cosechadoras. Están compuestas de dos máquinas que circulan por calles paralelas y enfrentadas, dejando entre ellas la línea de los árboles. Una de ellas está provista de un vibrador dotado de movimientos de aproximación-alejamiento del árbol y apriete-cierre de pinza y situado bajo un plano inclinado. La otra tiene un plano inclinado colocado también longitudinalmente a las filas de los árboles y unas cintas transportadoras que dirigen el fruto interceptado por ambos planos inclinados a un sistema de limpieza y almacenamiento del fruto. El uso de plataformas con vibrador es válido para olivares intensivos de un solo pie. Estos sistemas incorporan descarga continua a remolque o a cajones paletizables de carga semiautomática para el manejo del fruto (Ferguson *et al.*, 2010).

Finalmente, existen en sacudidores de copa montados sobre cosechadoras cabalgantes para sistemas como superintensivo e intensivo que han sido adaptadas directamente de otros cultivos como el de la viña colocados en sistemas en espaldera. Estas máquinas son autopropulsadas con transmisión hidrostática y disponen de una estructura tipo pórtico bajo las que pasan los árboles diseñados para el ancho concreto de estas máquinas. Disponen de un sistema de elevación y compensación lateral que permiten adaptar de manera limitada la altura y ancho de la plantación mientras transita por las hileras de árboles. El derribo del fruto es ocasionado por sistemas con movimientos alternativos de golpeo que agitan las copas de los árboles por cada lado mientras pasan por encima. El fruto derribado es conducido por unas cintas laterales que gestionan dicho fruto. El principal inconveniente de estas máquinas es la necesidad de mantener las plantaciones totalmente adaptadas a la geometría de las máquinas. El rendimiento depende estrechamente de la producción (Ravetti & Robb, 2010).

3.4 *Sistemas sacudidores de copa*

Los sacudidores de copa son sistemas que producen una agitación o vareo en el follaje o parte exterior del árbol para producir el derribo del fruto. Están compuestos de elementos de golpeo o sacudida que accionadas mediante diferentes mecanismos transmiten un movimiento alternativo para mover la copa del árbol. El desprendimiento de fruto se suele producir bien mediante el golpe directo del fruto, o bien mediante la transmisión de aceleración a las ramas que los contienen. Para producir este desprendimiento es necesario que los elementos de golpeo generen un movimiento adecuado con una amplitud y frecuencia determinadas. Un patrón adecuado de sacudida puede permitir la interceptación simultánea del fruto derribado siendo una buena alternativa para la recolección integral.

En el estado de la técnica se pueden encontrar sistemas de sacudida de copa que simulan el vareo manual mediante diferentes modos. Encontramos mecanismos formados por excéntricas directas (Pertics, 1966), excéntricas balanceadas (Weygandt & Weygandt, 1966), sistemas biela-manivela oscilando en un plano horizontal (Peterson, 1989), o en un plano vertical (Recker, 1970), rodillos rotatorios (Palm, 2014), mecanismos de cuatro barras (Bruehl, 1976), etc. De entre estos sistemas, lo más extendidos comercialmente son los sistemas cabalgantes (Figura 7) que requieren copas reducidas, marcos de plantación adecuados, eliminar caballones, subir las ramas bajas y disponer de cabeceras de parcela adaptadas para los giros.

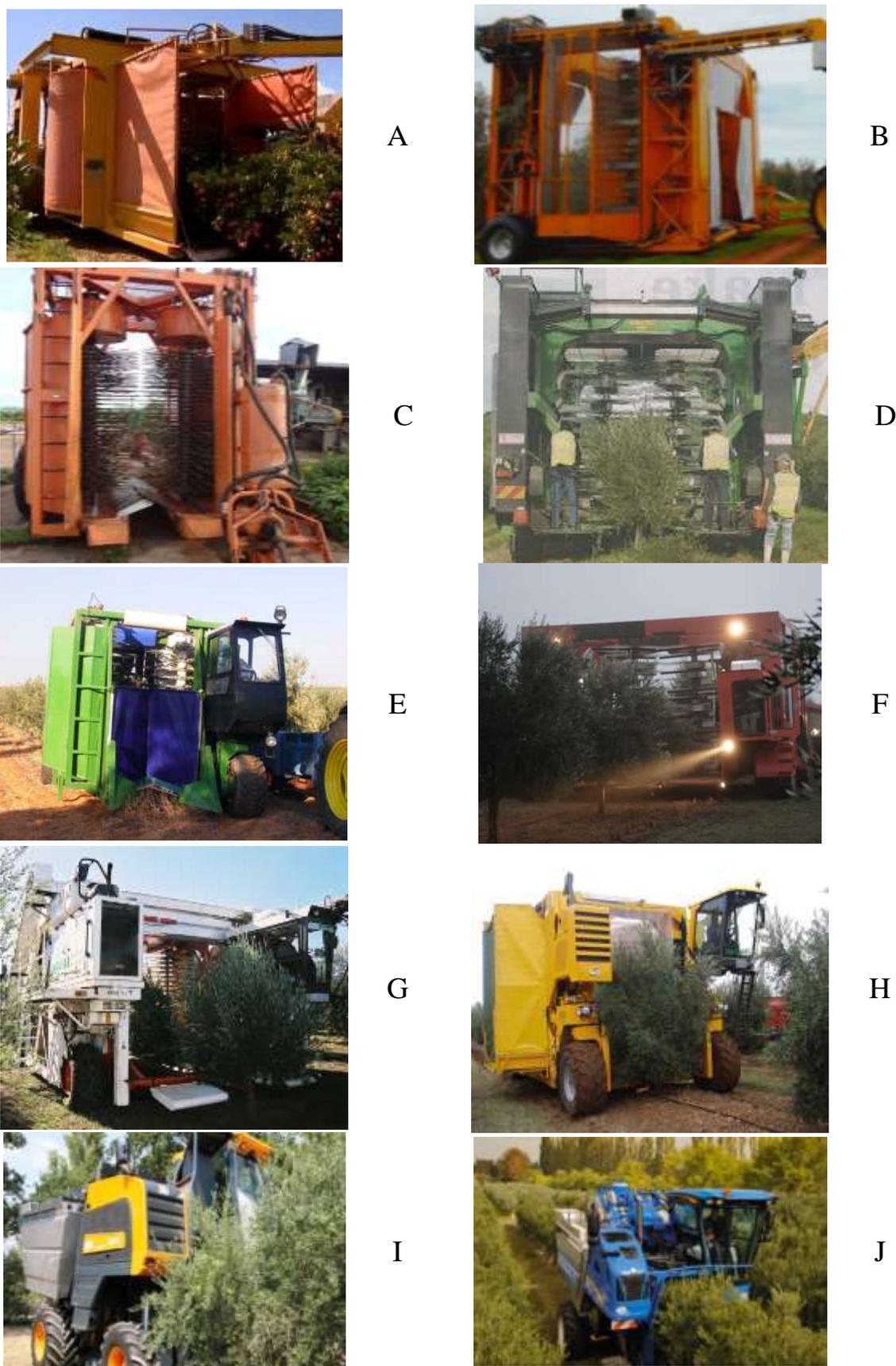


Figura 7. Cosechadoras cabalgantes en diversos cultivos adaptados a las máquinas. A: Nelson, B:Taylor, C:Jacto, D:Goliat, E:Frankland/J&S, G:Colossus, H:Gregoire, I:Pellenc, J:Braud

Por otro lado, la aplicación de la sacudida puede ser realizada en una parte del árbol mediante sacudidores laterales. Estos últimos, han sido diseñado y adaptados a diversos cultivos como cítricos (Savary, Ehsani Salyani, Hebel & Bora, 2010), viña (Pezzi & Caprara C, 2009), y en la actualidad se desarrolla para el olivar de mesa intensivo (Ferguson *et al.*, 2010). Estos sistemas permiten una recolección continua del árbol, aplicando la vibración en las ramas fructíferas y alcanzando una elevada eficiencia del derribo. Desde hace años, se pensó en una alternativa a la vibración de ramas o troncos como la sacudida de la copa del árbol, existiendo así números ingenios patentados (Figura 8).

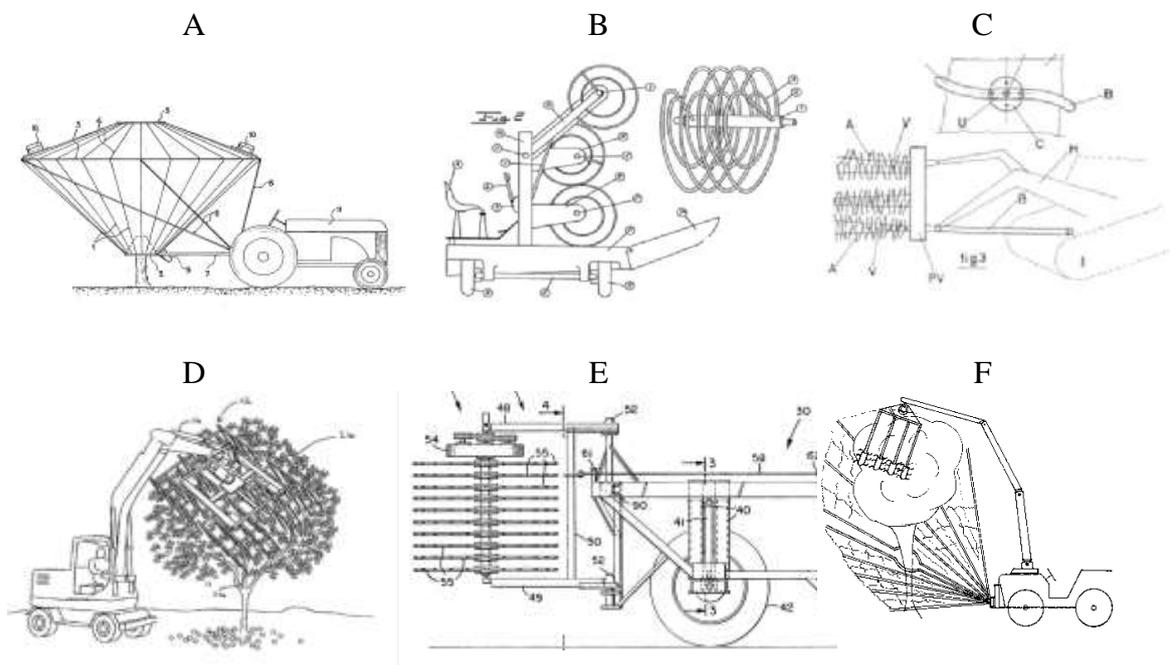


Figura 8. Patentes de mecanismos para la sacudida de copa. A: Alfaro(1965), B: Pedrosa (1967), C: Zuñiga (1971), D: Scott (1996), E: Hosking (2002), F: Boultradakis (2004)

Sin embargo, aunque existen diferentes sistemas de este tipo que pueden aplicar en una sola cara de la copa de los árboles (Scott , 1995; Scudder, 1982; Buist, 2002) y que pueden ser usados en diversos cultivos como cítricos (Brown, 2005), Jatropha (Hong, Rosa & Upadhyaya, 2012), frambuesa (Takeda & Peterson, 1999), y en los últimos años experimentalmente en aceituna (Castro-García, Rosa, Gliever, Ferguson & Glozer, 2009), todos ellos tienen un menor grado de desarrollo que los sistemas cabalgantes y su uso está menos extendido. Existen algunos sistemas sacudidores de copa laterales desarrollados para olivar (Figura 9) aunque están diseñados para plantaciones intensivas

o que a su vez están adaptadas para el sistema de recolección en concreto, no existiendo ninguna que esté implantada en plantaciones como olivar tradicional.



A



B



C



D

Figura 9. Sacudidores y cosechadoras laterales experimentales en diversos cultivos con árboles adaptados a las máquinas. A: Korvan, B:Spapperi, C:Olbaumrac, D:Vicort

Los sistemas sacudidores de copa laterales se basan en el mismo principio de funcionamiento que el vareo manual. Este tipo de sistemas de recolección suelen estar formados por uno o varios tambores, que pueden ser giratorios, compuestos por un conjunto de varas horizontales o inclinadas semirrígidas, normalmente dispuestas en forma radial, aunque existen diferentes ingenios o configuraciones. El derribo del fruto es realizado por la sacudida o golpeo de las ramas por las varas que suelen penetrar de forma parcial y perpendicular en la copa del árbol moviendo el conjunto mediante movimientos alternativos de baja frecuencia (3-6 Hz) y elevada amplitud (0,10-20 cm), suficientes para no romper ramas o no provocar daños importantes en los árboles. Suele existir una rotación, libre o controlada, del tambor alrededor de su propio eje que permite que el sistema avance introduciendo sucesivamente varas en la copa del olivo sin arrastrar o batir las ramas. Los impactos a las ramas que originan las varas en su

movimiento alternativo, provoca elevadas aceleraciones en el fruto capaces de causar su desprendimiento.

La zona de actuación de las varas es en las ramas exteriores del árbol, donde se concentra la producción de aceitunas, lo que hacen que estos sistemas sean muy eficaces para el derribo del fruto donde se realiza la sacudida de la rama y que puedan ser muy eficaces con una poda adaptada que favorezca la producción exterior del fruto y minimice la interna.

Los parámetros de la vibración o sacudida generada son determinantes para obtener un buen resultado. Aunque el objetivo del vareo no es impactar los frutos con las varas, los daños producidos en ramas y frutos son inevitables, aunque pueden reducirse con un correcto diseño del sistema.

También es determinante el movimiento que genere el sistema de excitación porque el fruto derribado puede ser lanzado lejos de la zona de actuación o concentrar el derribo con una trayectoria de desprendimiento se lo más vertical posible. Esto determinará su susceptibilidad a ser recolectado de una manera integral.

Finalmente, la actuación lateral y no cabalgante, permite realizar un proceso de recolección en copas de distinta geometría y de mayor diámetro al no necesitar pasar por encima de ellas. Sin embargo, para ello, el sistema de derribo debe ser capaz de llegar a profundizar lo más posible para conseguir una eficiencia alta y por otra parte tener un sistema de aproximación eficiente para poder corregir posibles irregularidades en la copa. Además, el sistema motriz en general, debe tener una maniobrabilidad muy alta para llegar a todas las zonas de la copa del árbol.

Con estas consideraciones se ha estudiado la aplicación de un sacudidor de copa lateral para cítricos, Oxbo 3210 (Figura 10) como una opción de recolección lateral del olivar tradicional y la posible interceptación simultánea del fruto derribado al mismo tiempo. Esta máquina dispone de 6 módulos de derribo unidos por un mástil que permite la aproximación. Cada módulo de derribo dispone de dos portavaras o tambores con 24 varas radiales que ejercen un movimiento lineal alternativo con una amplitud fija. Los módulos de derribo están conectados por un cigüeñal común que mueve todos ellos con un desfase de 120° entre ellos para conseguir un equilibrio dinámico. La configuración de frecuencia, amplitud y tipo de movimiento de su sistema de derribo, junto el diseño de los elementos de golpeo, produce un derribo de fruto muy apropiado

para su recolección. Sin embargo, el sistema no permite la interceptación del mismo, requiere de un tractor de 150 cv para su movimiento, tiene un peso excesivo sobre sus dos ruedas que supera las 12 toneladas lo que no lo hace apropiado para las plantaciones de olivar.

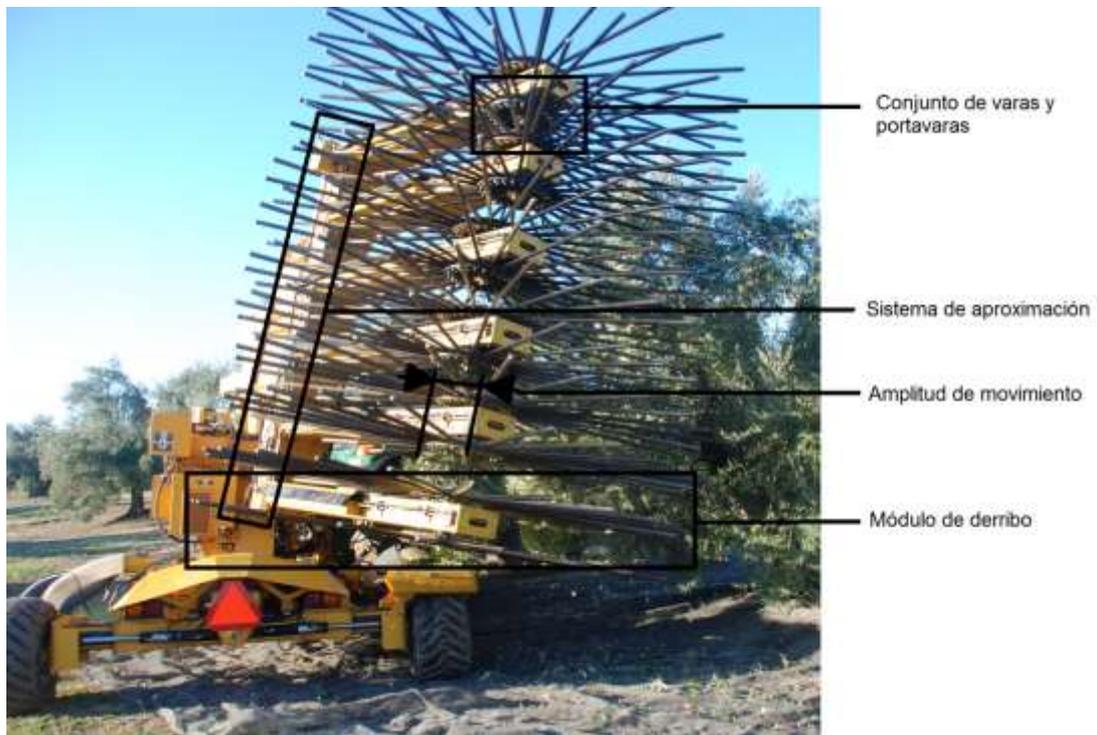


Figura 10. Sacudidor de copa lateral Oxbo 3210

De las conclusiones de este estudio, se observa la posibilidad de la creación de un sistema de recolección integral para el olivar tradicional, si se realiza un proceso de diseño y desarrollo adaptado al cultivo y con una adaptación de las plantaciones al sistema.

3.5 Patrón de la vibración o sacudida

La producción de aceitunas en el olivo se concentra en ramas de los últimos años, normalmente en la parte exterior del árbol. Estas ramas presentan un gran amortiguamiento para la transmisión de la vibración. La aplicación de los vibradores de troncos debe seguir la estructura del árbol para llevar aceleraciones efectivas al punto donde están situados los frutos para producir el desprendimiento de los frutos. Sin embargo, los sacudidores de copa aplican esa vibración directamente en las ramas fructíferas evitando recorrer un camino de transmisión a través del árbol. De esta manera, el patrón de vibración o sacudida de los sistemas sacudidores de copa y

vibradores de troncos es diferente presentando diferentes variables para su estudio (Gil-Ribes *et al.*, 2011). Los principales parámetros del patrón de sacudida (Figura 11) son:

- **Aceleración en ramas del olivo:** La aceleración efectiva en las ramas es el resultado de la transmisión de la vibración desde las varas del sacudidor que golpean diferentes zonas de la copa del árbol y suele ser la responsable del derribo del fruto, conjuntamente con otras variables. Esta aceleración tiene una componente vectorial en diferentes direcciones aunque suele ser analizada como la aceleración eficaz de las tres componentes principales que la compone (x, y, z).
- **Picos de aceleración o impactos:** La transmisión de la aceleración se efectúa a través de los impactos que ocasionan las varas o elementos de golpeo sobre las ramas, provocando unos picos de aceleración que se amortiguan rápidamente pero que tienen un efecto importante en el derribo. Si se realiza un análisis de la aceleración eficaz, estos picos se promedian y apenas tienen influencia en el resultado de aceleración, por lo que son necesarios estudiarlos y teniéndolos en cuenta por encima de un valor determinado.
- **Tiempo de sacudida:** El tiempo de vibración es un parámetro determinante en sistemas que aplican un contacto continuo con el medio en el que transmiten la vibración, como es el caso de los vibradores de troncos. Sin embargo, los sacudidores de copa transmiten la vibración al árbol en función del modo de contacto con la copa del árbol al realizarse un avance continuo por diferentes zonas de la copa que a su vez no tiene una geometría regular ni una densidad homogénea. De esta manera, se puede diferenciar entre el tiempo total en que una rama está siendo sacudida (entre unos valores mínimos de aceleración cercanos al reposo del árbol) y el tiempo acumulado en el que una rama se encuentra por encima de ciertos valores de aceleración como resultado de los diversos impactos en la rama (Figura 11).

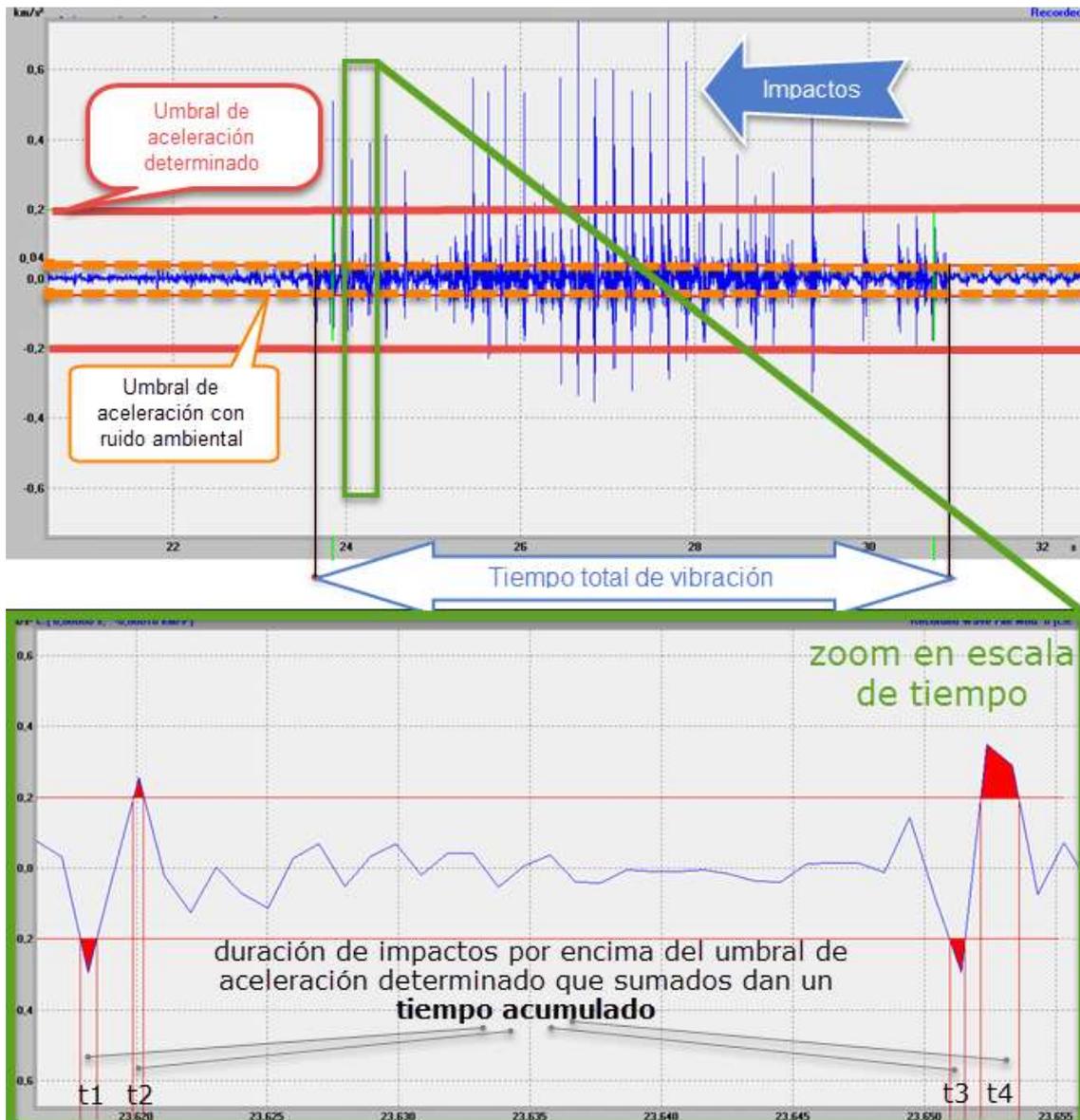


Figura 11. Señal de aceleración temporal generada por un sacudidor de copa

- **Frecuencia de sacudida:** La frecuencia de sacudida en las ramas es el resultado del régimen de giro del sistema de accionamiento alternativo que incorpora el sacudidor y que desemboca en una señal periódica en las ramas donde se aplica el vareo mecánico. La frecuencia de sacudida incide de manera decisiva en el mayor o menor derribo de aceitunas por el sistema conjuntamente con el tiempo en el que se aplica la sacudida, pero también afecta en los daños al árbol.
- **Desplazamiento de las ramas y amplitud del movimiento:** La amplitud del movimiento efectuado por el sistema de golpeo determina el desplazamiento de las ramas en el árbol, siendo consecuencia del

derribo del fruto pero también de su nivel de daños. Por todo ello, es importante determinar la combinación de frecuencia-amplitud óptima en el derribo del fruto.

3.6 Adaptación máquina-plantación plantación-máquina

En cualquier sistema de mecanización es clave la interacción máquina-plantación, lo que lleva a una doble adaptación. Por ello, es importante estudiar las características de las plantaciones para realizar un diseño adecuado de la máquina, pero también conocer las características de la máquina para modelar a la plantación y los árboles a sus particularidades.

3.6.1 Medidas de las plantaciones

La forma y estructura de las plantaciones condiciona la toma de decisiones a la hora de su gestión específica en diversas tareas como la aplicación de productos fitosanitarios, su poda, o el uso de maquinaria específica. En este último caso, es necesario conocer la morfología y parámetros de las plantaciones para la aplicación y diseño de maquinaria de recolección para las mismas.

Existen diversas tecnologías para realizar mediciones precisas de los árboles en general y de sus copas en particular, siendo las más usadas son el uso de sensores de ultrasonidos, técnicas de fotografía digital, escáner de alta resolución y visión estereoscópica. Las técnicas de fotografía digital permiten la obtención de imágenes que pueden ser empleadas en reconstrucción del volumen de copa de árboles individuales por medio de técnicas de visión artificial. El volumen del árbol puede ser estimado por medio de un conjunto de imágenes tomadas desde diferentes ángulos de visión (Phattaralerphong & Sinoquet, 2005). Por último, la visión estereoscópica puede proporcionar información en tres dimensiones por la combinación de dos imágenes monoculares tomadas simultáneamente en una cámara binocular, o con distancia conocida. Estos sistemas proporcionan una considerable precisión, con un error cercano a 0.09mm (Kise & Zhang, 2008). Sin embargo, las condiciones de iluminación y orientación son importantes y requieren de un apropiado calibrado. Además, son menos precisos que los escáneres laser de alta resolución que suponen una tecnología muy prometedora en la recreación de las copa en árboles con alta precisión (Rosell & Sanz, 2011). No obstante, las técnicas de análisis digital de imágenes o fotogramétricas siguen

siendo las más utilizadas para la determinación de las geometrías del árbol debido además a su bajo coste.

Para realizar una recreación correcta del árbol, debería tomarse la totalidad de su geometría para lo cual es prioritario conocer sus perfiles laterales y proyección en planta. Para la proyección lateral, existen técnicas definidas para la adquisición de fotografía con un trípode y un procedimiento general. Para la proyección aérea, la imagen obtenida por satélites podría ser útil, aunque es pobre en cuanto a información y resolución y no puede ser tomada en el momento deseado. En este camino los Unmanned Aerial Systems (UAS) o sistemas aéreos no tripulados pueden ser aplicados para conocer el estado de las plantaciones a tiempo real, y servir para el apoyo de la gestión agrícola de plantaciones en pequeñas alturas proporcionando alta precisión y tomas instantáneas en el momento deseado.

Sin embargo, debido a la falta de estas tecnologías en la mayoría de las plantaciones y a los requerimientos de conocimientos necesarios para su aplicación, los métodos más extendidos para medir las plantaciones son los manuales. En particular, el método del jalón (Figura 12) es usado, tanto por investigadores como por agricultores, pues aporta conocimiento necesario para muchas de las tareas del cultivo a pesar de su baja precisión.



Figura 12. Medida de un árbol tradicional usando un jalón

3.6.2 *Diseño de maquinaria específica*

Una vez son conocidas las condiciones del entorno al que va destinado la maquinaria de recolección, es necesario, generar soluciones aptas para dicho fin que deben ser plasmadas en prototipos reales mediante la ayuda del diseño industrial. En este sentido, la metodología de diseño y desarrollo de productos denominada “Total Design” propuesta por Pugh (1991) (Figura 13) basada en un núcleo descriptivo del proceso compuesto de actividades genéricas que van desde el concepto hasta la fabricación, supone un gran ayuda para el desempeño de estas tareas. El método utiliza la teoría de sistemas para sustentar la propuesta de trabajo a través de funciones y subfunciones que combinan los efectos físicos con las características geométricas y los materiales para que surja el principio de solución (Paul & Beitz, 2013). El método centra su atención en el denominado “embodiment design” pero para ello propone un desarrollo de proyecto por módulos funcionales separados, lo cual tienen como ventaja la simplificación del análisis, pero la desventaja que puede llegarse a una propuesta de conjunto muy compleja.

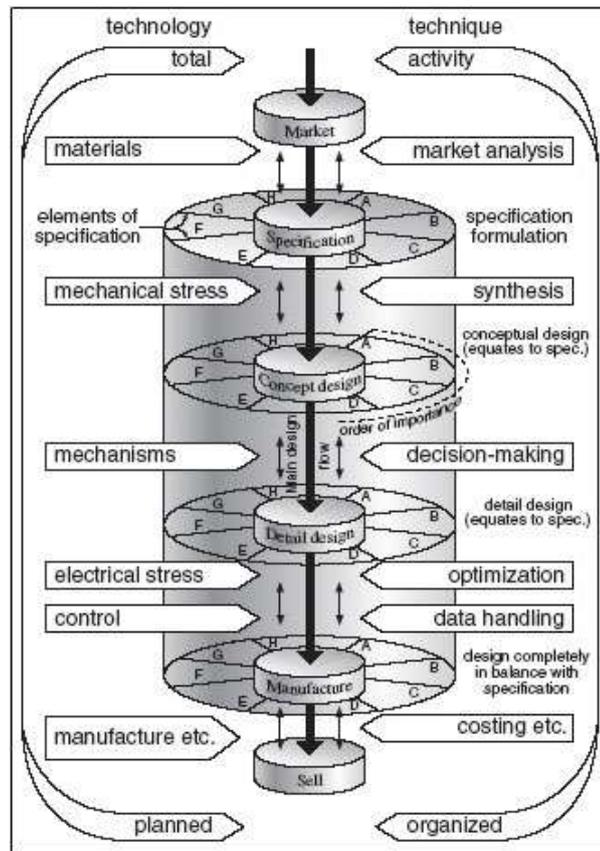


Figura 13. Teoría de “total design” propuesta por Pugh

3.6.3 *Necesidad del contacto del sistema de derribo con la copa del árbol*

La sacudida de copa implica transmitir una determinada aceleración a las ramas del árbol para la caída del fruto. Además, esa determinada aceleración debe ser aplicada un determinado tiempo específico que produzca el derribo del fruto, pero no provoque daños excesivos. Los valores de aceleración en las ramas son mayores en la parte exterior del árbol que en la interior. Savary (2011) determinó que durante un proceso de sacudida, la fuerzas experimentadas por los frutos en el interior de la copa son 0.85 veces menores a las exteriores, debido al amortiguamiento y geometría de las ramas del árbol. La geometría de las ramas y su disposición también condiciona la transmisión de la vibración. Finalmente, la falta de una poda asociada a los sistemas mecanizados que aplique una formación del árbol acorde a estas premisas, ha desencadenado en árboles con contornos muy irregulares que dificultan enormemente las tareas de recolección mecanizada mediante una sacudida con contacto al árbol.

Todas estas variables, llevan a la necesidad de un determinado contacto entre el sistema de sacudida de la copa y el sistema sacudidor que se materialice en un copiado de la copa del mismo. El contacto con la copa del árbol podría ser determinado con la visualización de la geometría del árbol a tiempo real, o bien mediante la medición de su densidad de follaje. Sin embargo, la determinación de estos parámetros es de gran dificultad, para ser llevada a cabo manualmente por un operario que realice la aproximación del sistema de derribo en función de los mismos, aumentando la complejidad de maniobra de los movimientos. Por este motivo, es necesario el desarrollo de un sistema de copiado automático que mantenga un contacto con la copa determinada para aumentar el derribo y minimizar los daños a la copa.

3.6.4 *Adaptación del árbol a la máquina*

La morfología de la mayoría de los olivares tradicionales españoles no está adaptada a la recolección mecanizada con sacudidores de copa. Para la mecanización de las diversas tareas del cultivo, y en especial, la de recolección, es necesario formar al árbol para la maquinaria a usar. Este ha sido pilar fundamental de la mecanización de otros cultivos como el olivar intensivo y superintensivo. Sin embargo, gran parte del olivar no puede ser reconvertido por los altos costes que supondría o en muchos casos porque puede ser muy productivo. Así, es totalmente necesario una adaptación del árbol a la maquinaria de recolección existe para conseguir unos resultados satisfactorios.

Se pueden realizar unas recomendaciones de poda para la recolección mediante los sacudidores de copa laterales, pero hasta que no exista una máquina comercial para su fin, no se puede concretar en unas pautas cerradas y efectuar con el mayor rendimiento posible. Además, se cuenta con la dificultad de una poda del árbol distinta por la desconfianza existente entre los agricultores del sector con una arraigada tradición en su manejo, con la adición de una posible pérdida de producción.

Para la recolección con estos sistemas, es necesario determinar las trayectorias a efectuar con la máquina. Tomando las premisas de que los marcos de plantación típicos de olivar tradicional son grandes y que van desde 8x8 a 12x12 m, se puede plantear una trayectoria en círculo alrededor del árbol como una operación factible para su recolección para poder alcanzar todas las zonas del árbol con una única pasada.

La influencia del número de pies del árbol, no es determinante para la recolección con estos dispositivos de derribo aunque es un factor a tener en cuenta para el dimensionamiento y diseño de los medios de interceptación que incorpore. Aunque sería conveniente evitar troncos demasiado inclinados no es recomendable suprimir ningún tronco puesto que sólo perjudicaría a la producción total del árbol.

El número de ramas principales es un factor a tener en cuenta puesto que a mayor número de ellas, mayor probabilidad de ser sacudidas y efectuar un contacto efectivo un mayor tiempo. En este aspecto, es preferible evitar el mayor número de irregularidades en la copa de los árboles buscando geometrías lo mayor redondeadas posibles. De esta manera, se maximiza el contacto con la copa sin tener que efectuar cambios bruscos de trayectorias para alcanzar diferentes puntos de la geometría del árbol.

Por otro lado, la estructura del árbol es un factor decisivo en la transmisión de la vibración para el derribo de la aceituna. Se sugiere la formación del árbol con ramas abiertas que favorezcan la producción del fruto en las ramas exteriores del árbol, donde es accesible por un sistema sacudidor de copa, y que minimice la producción en el interior, donde no puede llegar ni transmitir la vibración por los altos amortiguamientos.

La altura de la copa del árbol quedará determinada por la altura a la que el último módulo de derribo tenga alcance debiendo no ser mayor que el mismo. En este caso, esta altura podrá rondar los 3.5 m. Del mismo modo la altura de la ramas bajas deberá

ser la que indique el módulo de derribo más bajo, para a su vez permitir que el sistema de interceptación que incorpore se introduzca bajo el árbol sin ocasionar roturas.

En definitiva, es necesario adaptar el árbol en la medida de lo posible a las posibilidades de los sacudidores laterales para conseguir árboles lo más regulares posibles que favorezcan la producción hacia las ramas del exterior (Figura 14).



Figura 14. Vista de olivo tradicional con formación recomendada para la recolección mecanizada con sacudidores de copa en una trayectoria circular

En caso, de que no se sigan estas recomendaciones, existirán unas zonas del árbol en las que el sacudidor no pueda acceder, y otras en las que para acceder produzca rotura en las ramas, existiendo además espacios útiles en los que pueda trabajar y que no exista follaje de árbol para sacudir (Figura 15).



Figura 15. Vistas de olivo tradicional sin formación para la de recolección con sacudidor de copa en una trayectoria circular. Las superficies coloreadas representan diferentes zonas con distinta influencia en su recolección mediante este sistema. Zona amarilla: susceptible de roturas; Zona azul: inaccesible; Zona roja: aprovechada para recolectar; Zona negra: útil de trabajo

CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

La **hipótesis** planteada en esta Tesis Doctoral es que existe la posibilidad de realizar la recolección mecanizada del olivar tradicional de forma integral.

El **objetivo general** es avanzar en el conocimiento necesario para el diseño y desarrollo de cosechadoras, basadas en sistemas sacudidores de copa laterales, con el fin de mejorar los costes de producción y calidad del producto final. Para alcanzarlo se han planteado los siguientes **objetivos parciales** que servirán de referencia en el diseño experimental planteado en la Tesis:

- 1) Evaluación de los sistemas de recolección para olivar tradicional.

Se analiza la aptitud de los diferentes sistemas de recolección disponibles usados para la recolección de olivar tradicional y se evalúan en relación a su eficiencia de derribo, nivel de daños y patrón de vibración, comparándolo con un sistema sacudidor de copa comercial diseñado para otro cultivo.

- 2) Caracterización de las plantaciones y árboles de olivar tradicional.

Se estudian varias plantaciones tradicionales para obtener información de utilidad en el diseño de sacudidores de copa específicos y se presenta un método de caracterización de sus parámetros geométricos, con tecnologías de control remoto, que además, sirve para predecir el potencial productivo del olivar.

- 3) Integración de un dispositivo de gestión de fruto derribado con un sacudidor de copa comercial y estudio de viabilidad de la cosecha integral en olivar tradicional.

Se analiza la viabilidad de la recolección mediante un sacudidor de copa diseñado para otro cultivo, aplicándolo en olivar tradicional, y su aptitud para la cosecha integral mediante la adaptación de un dispositivo con sistemas de interceptación, gestión de fruto, limpieza y almacenamiento.

- 4) Desarrollo de sistemas de derribo sacudidores de copa específicos para el olivar tradicional.

Se evalúan diferentes diseños de dispositivos de derribo basados en sacudidores de copa y se estudian sus parámetros para avanzar en el desarrollo de un sistema específico adaptado a olivar tradicional para su recolección integral.

- 5) Desarrollo de un método para automatizar la aproximación del sistema de sacudida y el copiado de la copa del árbol.

Se desarrolla y evalúa un sistema de copiado automático de la copa del árbol que mantenga los dispositivos de derribo con un contacto adecuado para maximizar el fruto desprendido y minimizar el daño ocasionado al árbol.

Estos objetivos están orientados al diseño y construcción de prototipos precomerciales de cosechadoras para olivar tradicional, y aplicables al intensivo. La innovación que representa puede servir de base a la fabricación de máquinas comerciales que supongan una alternativa a las tecnologías de recolección actuales, y así, implantar la mecanización integral, mejorar la calidad del producto final y reducir sus costes.

CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

1. PARÁMETROS DEL SISTEMA MÁQUINA-ARBOL

En este apartado se definen los parámetros que se van a utilizar en el desarrollo de la tesis según los objetivos planteados (Tabla 3).

Tabla 3. Principales parámetros que definen el sistema máquina-árbol

Sistema	Subsistema	Parámetro	Instrumento de medida
Árbol	Plantación	Distancia entre árboles	Metro
		Irigación	Visual
		Troncos (nº, altura y diámetro)	Metro
		Diámetros, alturas (volumen de copa)	Metro y jalón
		Área de la silueta del árbol (aérea y lateral)	Fotogrametría
		Producción y potencial productivo	Báscula
Fruto		Fuerza de Retención del Fruto	Dinamómetro
		Peso Unitario	Báscula
		Índice de madurez	Visual
Máquina	Dispositivo de derribo	Amplitud	Pie de rey
		Revoluciones de giro o frecuencia	Tacómetro
		Tipo de movimiento	Visual
		Vara de sacudida: longitud, distancia y densidad entre ellas, rigidez	Metro Martillo de impacto
	Dispositivo de interceptación	Localización del fruto derribado	Báscula y metro
	Circuito hidráulico	Presión Caudal	Sensor de presión y caudal con sistema de adquisición
Máquina-árbol	Derribo de fruto	Fruto derribado (interceptado y no interceptado)	Báscula
		Fruto no derribado (exterior e interior del árbol)	
	Daños al árbol	Nivel de daño	Metro y pie de rey
		Peso y número	Báscula
	Patrón de vibración	Aceleración instantánea en ramas (ejes x,y,z) y eficaz	Acelerómetros triaxiales y analizador de señales dinámicas
		Frecuencia	
Número de impactos			
Tiempo de sacudida			
Operación	Transmisión de la vibración		
	Capacidad de trabajo	Peso y cronómetro	
	Trayectorias de trabajo	Visual	
	Velocidad de avance de la máquina	Velocímetro (Georreferenciación)	

1.1 *Árbol*

1.1.1 *Plantación*

Las plantaciones y los árboles fueron caracterizados a través de medidas manuales con jalón y metro, y electrónicas mediante métodos fotogramétricos para determinar diversos parámetros: marco y espaciado entre árboles, pendientes, diámetros de los árboles en las direcciones de las calles principales, altura total y de bajera del árbol, volumen de copa estimado, área y perímetro de la silueta del árbol, así como otros parámetros geométricos mediante ajustes de la silueta a perfiles circulares, elípticos o rectangulares.

1.1.2 *Fruto*

El fruto fue caracterizado mediante la fuerza de retención de fruto, peso del mismo y su índice de madurez mediante medidas aleatorias de muestras antes y después de la recolección del árbol de aproximadamente 30 muestras por árbol.

La medida de la Fuerza de Retención del Fruto (FRF) al árbol, se realizó utilizando un dinamómetro de precisión (Correx, Switzerland) de rango hasta 10 N adaptado para su uso en olivar (Figura 16) y tomando medidas en cada árbol antes y después de la recolección alrededor de las 10:00 pm de la mañana.



Figura 16. Dinamómetro adaptado para medidas de Fuerza de Retención del Fruto (FRF)

La medida del peso del fruto (m) y su madurez (IM) se obtuvo mediante muestras de cada árbol obtenidas del fruto derribado del árbol. Para determinar peso unitario del fruto se utilizó una báscula (KERN FCB, PCE, USA) de 0,1 g de precisión (Figura 17).



Figura 17. Balanza de precisión

Para determinar su índice de madurez un operador entrenado para tal fin, realizó un análisis de 100 muestras por árbol (Figura 18) clasificándolas según el índice Jaén (Tabla 4).

Tabla 4. Referencia usada para ponderar el índice de madurez del fruto en laboratorio

Valor	Características	Apariencia
0	Piel verde intenso	
1	Piel verde amarillento	
2	Piel verde con rojizo en menos de la mitad del fruto	
3	Piel rojiza morada en más de la mitad del fruto	
4	Piel negra y pulpa blanca	
5	Piel negra y pulpa morada sin llegar a la mitad de la pulpa	
6	Piel negra y pulpa morada sin llegar al hueso	
7	Piel negra y pulpa morada totalmente hasta el hueso	



Figura 18. Separación de frutos según su índice de madurez tras la toma de muestras de un árbol

1.2 Máquina

Para el diseño de los diferentes elementos de las máquinas desarrolladas se utilizó una metodología con planteamiento tradicional y secuencial organizada y dirigida por una fase de creatividad coordinada por el autor de este trabajo basada en técnicas de modelado virtual usando software CAD (Computer Aided Design) de diseño paramétrico. Para las fases de simulación en el comportamiento de los prototipos se utilizaron técnicas de análisis de elementos finitos o por software CAE (Computer Aided Engineering) así como de pruebas puntuales sobre prototipos a escala en taller o de prototipado rápido. Para la gestión de la documentación, creación de planos y programas de fabricación se utilizaron programas CAD y CAM (Computer Aided Manufacturing), y códigos CNC (Computer Numerical Control). El principal software usado para tal fin fue CatiaV5R19 (Dassault Systemes, Francia) (Figura 19).

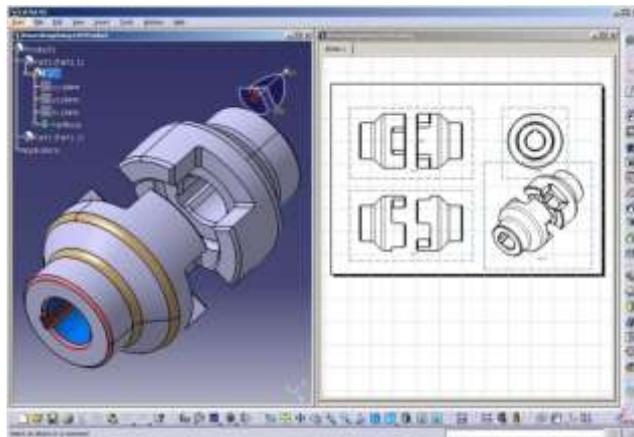


Figura 19. Entorno gráfico del software CAD usado para el diseño los componentes y prototipos

1.2.1 *Dispositivo de derribo*

Para el estudio de los dispositivos se realizaron pruebas de funcionamiento en taller previo diseño computacional, para su posterior aplicación en campo. Las principales variables estudiadas en el diseño de los mecanismos pertinentes fueron el tipo de movimiento (lineal, rotacional, alternativo, con giro forzado, etc.); la amplitud y la frecuencia de sacudida; y la disposición y características de las varas de golpeo.

En ciertas ocasiones, fue necesario determinar ciertos parámetros de los elementos de golpeo o varas de los dispositivos de derribo mediante los impactos que ocasionan. Para ello, se utilizó un martillo de impacto (PCB 086D20, EEUU) (Figura 20) con un rango de medida de 22 240 N, que se colocó fijo sobre diversas estructuras. Para la regulación de los distintos ensayos se usó unas puntas o materiales de impacto de dureza alta de plástico simulando a la madera de un árbol. El parámetro determinado a través del uso de este sistema se denomina **Fuerza de impacto (N)**.



Figura 20. Sensor de martillo de impacto y distintas puntas de golpeo

1.2.2 *Dispositivo de interceptación*

En los estudios en lo que los prototipos de derribo incorporaron un dispositivo de interceptación, se colocó una malla o lienzo bajo el árbol para determinar qué cantidad del fruto es recogido por dicho dispositivo y cuánto se cae fuera. Además, dentro del sistema de interceptación, se colocaron, en algunos casos, una división por sectores para determinar la distribución de la caída del fruto.

1.2.3 *Circuito hidráulico de potencia*

En función de los ensayos planteados, se necesitó registrar una serie de parámetros en el circuito hidráulico de transmisión de potencia de los prototipos, siendo los más

importantes el **caudal** y la **presión**. Para el registro del caudal, se colocó un sensor de presión (Parker SCFT 600, Alemania) con un rango de medida de 15 a 600 l min⁻¹. Para el registro de la presión, se colocó un sensor de presión (Parker SCP 600, Alemania) con un rango de medida de 0 a 600 bar (Figura 21).



Figura 21. Sensores de caudal y presión en el sistema hidráulico de un prototipo sacudidor de copa

Los datos registrados esta serie de parámetros fueron gestionados por un sistema adquisición de los datos formado por un ordenador industrial (Dewetron 2010 PC, EEUU) (Figura 22) empleando los módulos de conexión derivados de acondicionamiento y registro específicos a la señal de salida del sensor utilizado.

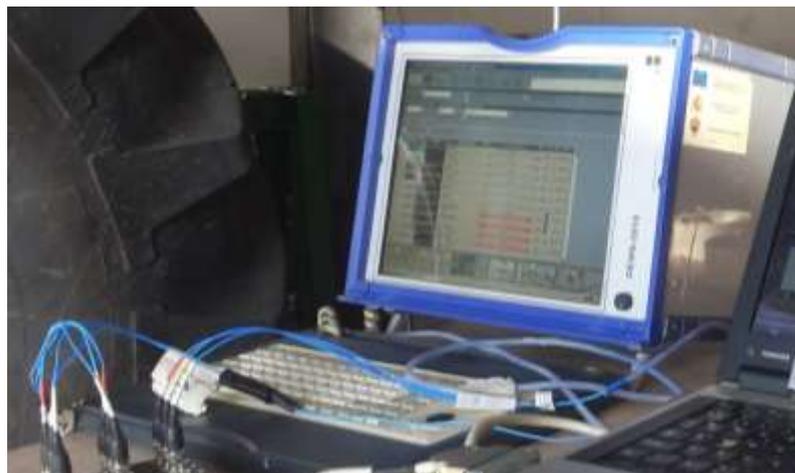


Figura 22. Equipo utilizado para el análisis y registro de las señales de los sensores de caudal y presión

1.3 Interacción máquina-árbol

1.3.1 Derribo de fruto

La evaluación del derribo de fruto se realizó pesando la cantidad desprendida, y la cantidad que no se desprendió del árbol, separándolo de los daños ocasionados al árbol (Figura 23).



Figura 23. Separación de fruto derribado y daños tras un ensayo de recolección de un árbol

En cuanto a la cantidad desprendida, se realizó una distinción entre el fruto cosechado por un sistema de interceptación, en el caso que lo hubiera, y el fruto no interceptado por el mismo. En cuanto a la cantidad de fruto que quedó en el árbol, se procedió a su derribo manual posterior (Figura 24), distinguiendo entre el peso de fruto en el exterior y en el interior del árbol, teniendo en cuenta el volumen imaginario de un cilindro de 1 m de radio centrado en el interior del árbol (ver explicación en “Fruto no derribado interior”).



Figura 24. Apure selectivo de olivo tras de un ensayo de recolección con un sistema estudiado

- **Fruto derribado:** Cantidad de fruto que es desprendida del árbol con el sistema de derribo evaluado. La cantidad de fruto derribado está compuesto por la suma del fruto cosechado y del fruto no cosechado.
- **Fruto cosechado:** Cantidad del fruto derribado que se recoge y cosecha en el sistema de interceptación que lleve incorporado el sistema de derribo evaluado.
 - **Localización del fruto cosechado:** En función del ensayo realizado se realizó un zonificación determinada en la zona de interceptación para determinar donde se reparte el fruto que se derriba y analizar su susceptibilidad a ser interceptado. Para se diseñaron y construyeron distintos sectores en la superficie de interceptación.
- **Fruto no cosechado:** Cantidad del fruto derribado que el sistema de interceptación no es capaz de interceptar o de almacenar y que acaba en suelo.
- **Fruto no derribado** Cantidad de fruto que se queda en el árbol porque el sistema de derribo es capaz de desprender del árbol. Se hacen dos distinciones:

Fruto no derribado interior: Cantidad de fruto no derribado en el interior del árbol debido a que es inaccesible la penetración del sistema de derribo. Se tuvo en cuenta una zona equivalente al área de un cilindro de 1 m de radio en el interior de los árboles (Figura 29), como zona inaccesible para el caso de los sistemas de derribo basada en sacudidores de copa. Esta distinción teórica es realizada para realizar una estimación de las eficiencias de derribo que se pueden obtener con podas adaptadas si se realizan medidas de formación de árbol recomendadas en el punto 3.7 del capítulo II, que minimicen el fruto en zonas interiores y fomentar la producción exterior. Todo ello, está originado por la capacidad de penetración limitada de las varas de golpeo.

- **Fruto no derribado exterior:** Cantidad de fruto no derribado que queda fuera de la zona de fruto no derribado en el interior.

En cada ensayo se realizó un pesado del fruto (Figura 25) en distintas casuísticas según los siguientes parámetros con una balanza de colgar (PCE KERN HCB 99K50, UK) con resolución de 10g:



Figura 25. Procedimiento de pesado del fruto derribado por los sistemas de recolección estudiados

En base a los parámetros definidos se presentan los siguientes términos de caracterización del derribo:

$$\text{Eficiencia de derribo (\%)} = \frac{\text{Fruto derribado (kg)}}{\text{Producción del árbol (kg)}} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

$$\text{Eficiencia de derribo exterior (\%)} = \frac{\text{Fruto derribado (kg)}}{\text{Producción árbol - Fruto no derribado en el interior (kg)}} \times 100 \quad \text{Ec. 2}$$

$$\text{Eficiencia de interceptación (\%)} = \frac{\text{Fruto cosechado (kg)}}{\text{Fruto derribado (kg)}} \times 100 \quad \text{Ec. 3}$$

$$\text{Eficiencia de cosecha* (\%)} = \frac{\text{Fruto cosechado (kg)}}{\text{Producción del árbol (kg)}} \times 100 \quad \text{Ec. 4}$$

$$\text{Eficiencia de cosecha exterior* (\%)} = \frac{\text{Fruto cosechado (kg)}}{\text{Producción árbol - Fruto no derribado en el interior (kg)}} \times 100 \quad \text{Ec. 5}$$

*Los datos de eficiencia de cosecha (Ecuación 4) pueden ser mostrados según diferentes zonas donde el fruto cae, para la localización y distribución del fruto cosechado.

1.3.2 Daños al árbol

El proceso de recolección de cualquier sistema produce una serie de daños al árbol como consecuencia del proceso de derribo de fruto, ya sea por vibración o sacudida. Estos daños se manifiestan en la rotura de ramas de diferentes tamaños y de hojas. En cada ensayo de recolección se procedió a separar los daños al árbol, en función de su

gravedad, para contarlos y pesarlos. Se pueden definir los siguientes términos para la evaluación de daños al árbol.

- **Evaluación de daños:** Los daños ocasionados por rotura de ramas y brotes fueron recogidos y clasificados visualmente en tres niveles (Figura 26) de acuerdo con el diámetro de la rama ponderando según su gravedad en daños leves n_1 , (ramas de diámetro menor a 12,5 mm), moderados n_2 (ramas de diámetro entre 12,5 y 25 mm) y graves n_3 (ramas de diámetro mayor a 25 mm) y fueron cuantificados.

$$\text{Evaluación de daños (\#)} = n_1 + 2n_2 + 3n_3 \quad \text{Ec. 6}$$



Figura 26. Identificación de daños clasificados según gravedad en grupos de ramas. Arriba: daño grave. Abajo derecha: daño moderado. Abajo izquierda: daño leve

- **Daños totales:** Cantidad hojas y ramas derribadas tras el proceso de recolección en kg, pudiendo separarse según las categorías de la evaluación de daños.
- **Daños porcentuales:** Porcentaje de daños totales en el proceso de recolección de un árbol entre su producción total, multiplicándose por 100 (numerador y denominador) para mostrar la siguiente unidad.

$$\text{Daños} \left(\frac{\text{kg daños}}{100 \text{ kg de fruto derribado}} \right) = \frac{\text{Hojas y ramas derribadas (kg)}}{\text{Fruto derribado (kg)}} \quad \text{Ec. 7}$$

La determinación de estos valores se determinó mediante el pesado con una balanza de colgar (Kern HCB 99K50, Alemania) con resolución de 10 g y un calibre digital (Multitoyo LMM500197, Spain) con resolución de 0,01 mm después del ensayo realizado en cada árbol.

1.3.3 Patrón de vibración/sacudida

El proceso de desprendimiento de fruto es consecuencia directa de las aceleraciones existentes en las ramas fructíferas producidas por las vibraciones en las mismas. Se pueden definir los siguientes términos para la evaluación de la vibración o sacudida en las ramas del árbol y en las partes de la máquina.

- **Aceleración pico:** valor máximo de aceleración en un intervalo en una de sus tres direcciones principales de registro (x, y, z).
- **Aceleración eficaz:** aceleración resultante de la componente de las tres direcciones principales de registro (x, y, z).

$$\text{Aceleración eficaz (ms}^{-2}\text{)} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde $a_{\text{dirección}} = \sqrt{1/T \int a^2(t) dt}$ y donde T es el período del ciclo

- **Frecuencia de sacudida:** número de ciclos por segundo en el que se repite la señal de aceleración coincidente con los impactos ocasionados por las varas de golpeo a las ramas.
- **Tiempo total de vibración:** tiempo que se registra señal o vibración por encima de un valor de reposo, en las ramas sacudidas en un proceso de recolección en condiciones de trabajo reales.
- **Tiempo acumulado por encima de un umbral de aceleración:** sumatorio de tiempo en que la rama está sometida a aceleraciones por encima de un valor determinado.
- **Número de impactos por encima de un umbral de aceleración:** número de impactos existentes que superan un intervalo de aceleración determinada.
- **Tasa de transferencia de vibración:** porcentaje de aceleración que se transmite a lo largo de distintas posiciones de la rama.

$$\text{Transferencia de vibración (\%)} = 100 \frac{\text{a. eficaz salida}}{\text{a. eficaz entrada}} \quad \text{Ec. 9}$$

Para medir las vibraciones en las ramas de cada árbol o en ciertas partes de las máquinas, se han utilizado varios acelerómetros triaxiales piezoeléctricos (PCB, 356A02, EEUU) dispuestos de manera aleatoria en distintas partes de la copa del árbol donde iba a efectuarse las sacudidas. El registro y procesado de las señales de los

acelerómetros se ha realizado a través de un analizador de señales dinámicas (OROS 25-PC-Pack II, EEUU). Este equipo se conecta a un ordenador portátil por medio de una tarjeta PCMCIA (Figura 27). Cada resultado de aceleración fue grabado en un rango de frecuencia 500 Hz, con una frecuencia de muestreo de 1,28 kHz. También, se empleó un factor de ampliación para reducir el rango de frecuencia.

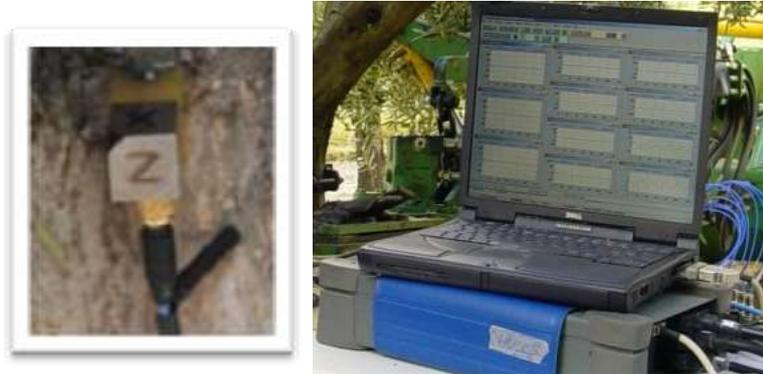


Figura 27. Acelerómetros (izquierda) y equipo analizador de señales dinámicas (derecha) utilizados para la caracterización de la vibración

El estudio de la transmisión de la vibración desde la máquina al árbol fue realizado en condiciones reales de trabajo. En cada árbol, se seleccionó una rama apropiada para el estudio de la vibración, con una disposición y tamaño representativo. Sobre cada rama se colocaron tres acelerómetros capaces de medir la vibración en tres direcciones perpendiculares (Figura 28). El primer acelerómetro se situó en parte externa del árbol, cercano al fruto, en ramas entre 2 y 4 cm de diámetro. El segundo acelerómetro se colocó a media distancia entre el final de la rama y el tronco. El tercer acelerómetro se colocó al comienzo de la rama, cercano al tronco del árbol

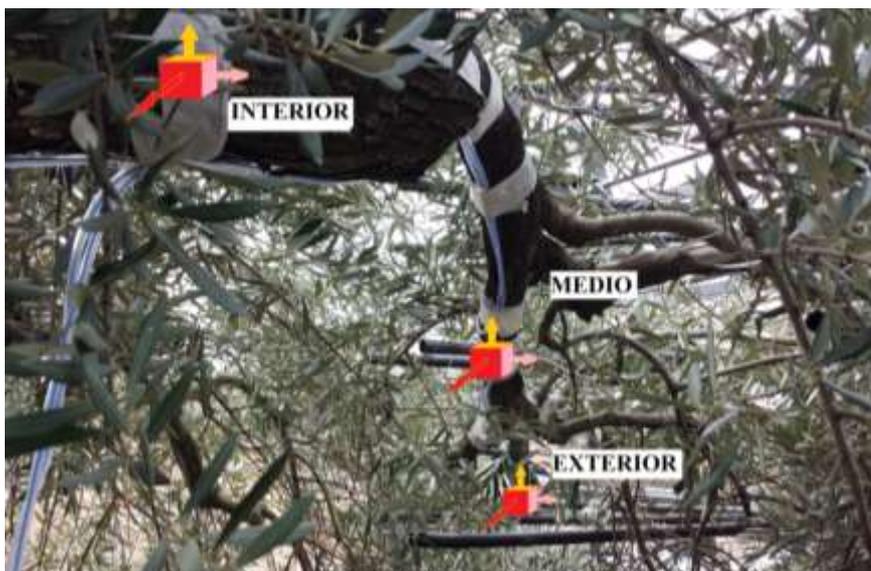


Figura 28. Ubicación de tres acelerómetros en una rama de oliva tradicional para medida de la transmisión de aceleración

1.3.4 Operación de trabajo

Para la operación de trabajo de los sistemas de sacudida de copa laterales existen varias opciones en función de las **trayectorias de trabajo posibles** a efectuar (Figura 29). En esta tesis, se estudiaron principalmente una trayectoria lineal en la dirección de avance de las calles de la plantación, y otra en círculo alrededor del árbol. El modo de ataque de la máquina sobre el árbol, parte de la premisa la máquina debería iniciar su ciclo de sacudida con el tambor de derribo en su posición de aproximación mínima a copa (en función de su sistema de aproximación) y con la máquina situada en una dirección de avance tangencial al árbol. A partir de ahí, la máquina debería de realizar las trayectorias necesarias para cubrir la totalidad de la copa, bien en círculo alrededor del árbol, o bien en varias pasadas en línea. En cada una de estas trayectorias el tambor debería de estar o mantener el contacto con la copa lo máximo posible.

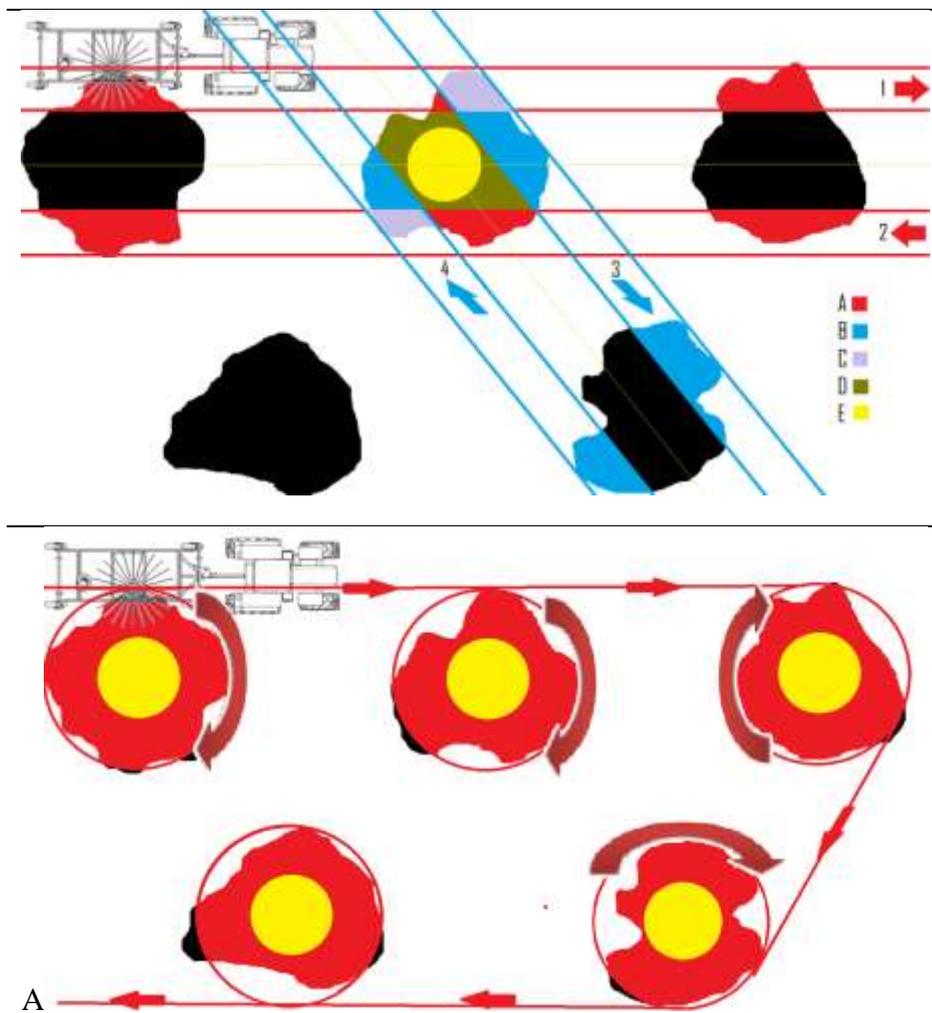


Figura 29. Trayectorias efectuadas en campo con los prototipos con árboles en disposición en tresbolillo. Arriba: Pasadas lineales. Abajo: Pasadas alrededor del árbol. Zona A: partes tocadas durante pasadas paralelas; zona B: partes tocadas durante pasadas cruzadas; zona C: partes comunes tocadas durante ambas pasadas; zona D: partes no tocadas durante pasadas debido a la trayectoria efectuada; zona E: zona inaccesible para los dispositivos en ningún caso.

Para la determinación de la **capacidad de trabajo** de algunos prototipos, se partió de los datos recibidos por un dispositivo de seguimiento que dispone de una antena GPS alojada en el tractor que los prototipos (Figura 30). Este dispositivo es un equipo autónomo de acceso remoto marca “MTX terminals” modelo “MTX-65+G v3” con tecnología de envío de datos “Quad band GSM GPRS Class 12” envía a un servidor informático en tiempo real, a intervalos de 4 segundos, señales de su posición geográfica (latitud y longitud), su posición en el tiempo (fecha y hora), velocidad de avance, rumbos seguidos y el estado de una entrada digital conectada, en este caso, en el accionado del sistema de sacudida que permita determinar los períodos de tiempo en los cuales se están sacudiendo los árboles (Tiempo efectivo, TE) y diferenciarlos del resto de tiempos. Los resultados son enviados vía GPRS en un archivo de extensión “.kml” obteniendo mapas de georreferenciación.



Figura 30. Equipo autónomo de acceso remoto, en el que se aprecian los conectores para la antena GPS (derecha) y para la antena GSM (izquierda)

La información obtenida es enviada a un servidor informático, mediante una antena GSM, usando tecnología GPRS. De esta forma se origina un archivo que contiene toda la información generada durante un día de trabajo sin ninguna intervención por parte del operario de la máquina. Esta información se descarga a cualquier PC vía internet para ser procesada.

Para el estudio del rendimiento de las máquinas en función de las trayectorias efectuadas se define el siguiente concepto:

$$\text{Capacidad de trabajo} \left(\frac{\text{ha}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ árboles recolectados}}{\frac{\text{n}^{\circ} \text{ árboles}}{\text{plantación (ha)}} \text{ tiempo requerido (h)}} \quad \text{Ec. 10}$$

2. PLANTACIONES DE ENSAYOS

Las plantaciones destinadas para los ensayos (Figura 31) tuvieron condiciones de secano y riego deficitario ($1000 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$).

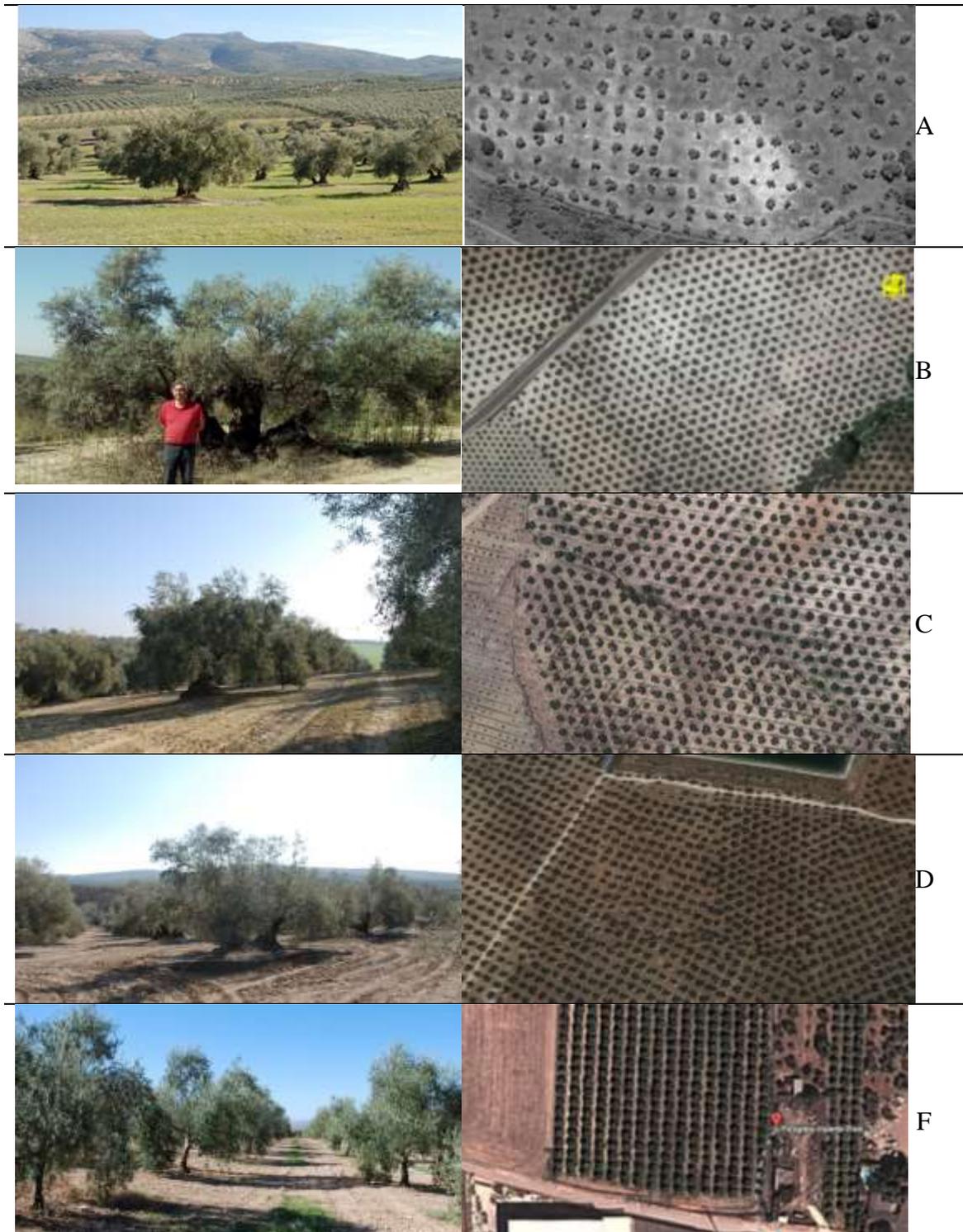


Figura 31. Plantaciones de olivar usadas en el desarrollo de la tesis. A: Finca del CIFA (Cabra), B: Finca “La Mata” (Lucena), C: Finca “Fuente la Rosa” (La Rambla), D: Finca “Torreblanca” (Santiago de Calatrava), E: Finca Moresil

Algunas características de las mismas se muestran en la Tabla 5. Los árboles tradicionales ensayados estuvieron caracterizados por tener varios troncos, grandes copas y amplios espacios entre los mismos con densidades por debajo de 120 árboles por hectárea. Las plantaciones tienen pendientes menores al 6% y están situadas en las provincias de Córdoba y Jaén al sur de España.

Tabla 5. Características de las plantaciones de ensayos

Finca	Marco	Variedad	Ubicación*	Riego
IFAPA. (Cabra, Córdoba)	13 m cuadrado	Picual	X: 373 807 m Y: 4 150 353 m	Secano
La Mata. (Lucena, Córdoba)	13 m tresbolillo	Hojiblanca	X: 361 900 m Y: 4 140 540 m	Secano
Fuente la Rosa. (La Rambla, Córdoba)	12 m tresbolillo	Hojiblanca	X: 340 750 m Y: 4 176 000 m	Riego deficitario
Torreblanca. (Sant. Calatrava, Jaén)	12 m cuadrado	Picual	X: 399 110 m Y: 4 177 400 m	Riego deficitario
Moresil (Posadas, Córdoba)	7 m cuadrado	Hojiblanca	X: 37 805 579 m Y: -5 109 243 m	Riego deficitario

* UTM coordenadas usando WGS84 elipsoide

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para desarrollar los **objetivos específicos** definidos en el capítulo III se ha planteado el diseño experimental que se describe a continuación:

3.1 *Evaluación de los sistemas de recolección para olivar tradicional.*

En este apartado se realizaron unos ensayos comparativos entre los sistemas de recolección habitualmente usados para la recolección de olivar tradicional.

3.1.1 *Ensayos*

Los ensayos se realizaron en la plantación de Fuente La Rosa en el mes de febrero de 2012 en similares condiciones meteorológicas y franja horaria diaria. Los árboles presentaban buen estado fisiológico y sanitario y estaban podados con un sistema tradicional para su recolección manual. Otros datos de la plantación y sus frutos están resumidos en la Tabla 6:

Tabla 6. Características de la plantación de olivar tradicional en los ensayos de evaluación de los sistemas de recolección actuales para olivar tradicional. Valores muestran la media \pm desviación típica

Parámetros de árbol y fruto	
Altura de árbol	3,82 \pm 0,25
Altura de tronco (m)	1,51 \pm 0,14
Diámetro de tronco (m)	0,47 \pm 0,09
Diámetro de copa menor (m)	6,60 \pm 1,01
Diámetro de copa mayor (m)	612 \pm 0,92
Volumen de copa (m ³)	69,6 \pm 20,9
Producción por árbol (kg)	123,4 \pm 20,6
Fuerza de retención del fruto (N)	3,37 \pm 0,96
Peso del fruto fresco (g)	2,7 \pm 0,1

Los sistemas de recolección ensayados (Figura 32), que muestran las técnicas disponibles para la recolección del olivar de almazara, se describen a continuación:

- **Sistema manual o manual harvesting (MH):** los frutos fueron recolectados usando varas por dos operarios entrenados bajo condiciones de trabajo normales aplicando un vareo en ramas selectivo.
- **Vibrador de ramas o hand held branch shaker (BS):** La vibración fue aplicada en ramas con fruto mediante el enganche del agarre de un vibrador de ramas (MasterBlock, Magnum Plus). Otro operario completó el derribo del fruto usando varas durante la vibración del mismo para alcanzar mayor eficiencia de derribo.
- **Sacudidor de ramas o hand held shaker comb (SC):** La vibración fue aplicada en zonas de la copa del árbol donde el fruto estaba localizado con un sacudidor manual (Stihl, SP90).
- **Vibrador de troncos o trunk shaker (TS) o:** La aplicación de la vibración en el tronco fue realizada con un vibrador de troncos sin sistema de recepción (Noli, VBFHG) montado en un tractor (John Deere, 6420) con 81 kW y usando dos repeticiones.
- **Sacudidor de copa o canopy shaker (CS):** La vibración fue aplicada alrededor de la copa del olivo usando un sacudidor de copa lateral arrastrado para cítricos (Oxbo, 3210) sin sistema de recepción con varas de longitud de 1,5m de longitud, trabajando de forma continua alrededor de la copa de los árboles.



Figura 32. Sistemas de recolección utilizados para el ensayo. Manual (A), vibrador de ramas (B), sacudidor de ramas (C), vibrador de troncos (D), sacudidor de copa (E)

Estos sistemas se pueden clasificar en manuales o de ayuda mecánica (MH, SC, BS) aplicando la recolección parcialmente o discontinua al árbol, y sistemas masivos que aplican el proceso de recolección a la totalidad del árbol (TS, CS). Esta última definición está importada del término anglosajón (massive systems). 12 árboles fueron ensayados por cada sistema de recolección ensayado.

3.1.2 *Parámetros evaluados*

Para el análisis de cada sistema de recolección se usaron los parámetros de eficiencia de derribo total y exterior, daños porcentuales, aceleración eficaz y tiempo acumulado por encima de valores de aceleración en intervalos de 100 m s^{-2} . Los frutos derribados y no recogidos fueron muy reducidos y no considerados.

3.1.3 *Procedimiento*

Para la evaluación de dichos parámetros, los frutos derribados y daños en el árbol por cada sistema de recolección ensayados fueron recogidos con lonas situadas debajo de la copa de cada árbol, siendo después separados y pesados. Posteriormente, se usó un apure manual para recoger y pesar todo el fruto que permaneció en la copa del árbol tras el la aplicación del sistema de recolección. Paralelamente se colocaron dos acelerómetros por árbol distribuidos aleatoriamente en diferentes ramas del árbol y se procedió al registro de las aceleraciones generadas por cada sistema de recolección. Los ensayos de recolección se realizaron siguiendo las técnicas habituales y las recomendaciones de los fabricantes.

3.2 *Caracterización de las plantaciones y árboles de olivar tradicional.*

En este apartado se estudian las características peculiares de las plantaciones de olivar tradicional en lo referente a las variables que pueden afectar al diseño de maquinaria específica para su recolección, en cuanto a sus parámetros geométricos o productivos. Por una parte, se realizó un estudio basado de la geometría específica del árbol para dimensionar una cosechadora en parámetros funcionales: alto, ancho, largo, radios de giro, penetración de varas, grado y modo de aproximación, dimensión de sistema de interceptación, dimensión de elementos de contacto a tronco, etc. Por otra parte, como complemento, se planteó un modelo predictivo de la capacidad productiva o rendimiento potencial del olivar en función de su geometría aérea, que sirve de comparativa entre metodologías de medición de volumen de copa con métodos tradicionales y la tecnología fotogrametría aérea, y además, para determinar la capacidad de trabajo potencial (ha h^{-1}) de una futura cosechadora.

3.2.1 Ensayos

Para la caracterización de los árboles y plantaciones se evaluaron 24 árboles aleatorios de la finca de Fuente La Rosa y La Mata en el mes de Marzo después de su recolección, usando el método manual, la fotogrametría lateral y la fotogrametría aérea. Para la medición con el método fotogramétrico aéreo se realizó un barrido de al menos una hectárea por finca para disponer de mayor rango de árboles entre las que incluyen los árboles evaluados.

Para la obtención de un modelo de la capacidad productiva de las plantaciones rendimiento potencial, se evaluaron varias fincas de olivar intensivo, junto con varias plantaciones de olivar tradicional en un año de producción máxima de su vecería en 4 diferentes años de 2011 a 2014. Las tipologías de plantaciones estudiadas fueron las más comunes en el olivar, siendo tradicionales de secano y regadío, intensivo secano y regadío, y olivar en seto de marcos amplios en regadío. En este estudio no se han considerado plantaciones con marco estrecho con más de 800 plantas por hectárea (Rallo, Castro-García, Connor, Gómez del campo & Rallo, 2013). En total han sido muestreados un total de 518 árboles de 10 plantaciones de olivar con diferentes marcos de 12 x 12 m a 6 x 3 m, y por consecuente diferentes densidades desde 69 árboles ha⁻¹ a 556 árboles ha⁻¹.

3.2.2 Parámetros evaluados

3.2.2.1 Caracterización de los árboles y plantaciones

De la medición directa sobre los resultados obtenidos con los métodos fotogramétricos se obtuvieron resultados del dimensionamiento de ciertos parámetros de las máquinas a diseñar (capacidad de inclinación, radios de giro, capacidad de aproximación a la copa, etc.) Por otra parte, se pudieron obtener otros parámetros que se plantean para este estudio para realizar una caracterización geométrica más teórica que puede ayudar a discernir entre las podas de formación de los árboles. Los parámetros obtenidos fueron:

-Parámetros obtenidos con el método manual con jalón:

DIRECTOS

- **Diámetro mayor:** Distancia máxima entre los puntos más alejados del contorno del árbol que corresponda a una línea horizontal visto en la dirección calle principal de la plantación.

- **Diámetro mayor:** Distancia máxima entre los puntos más alejados del contorno del árbol que corresponda a una línea horizontal visto en la otra dirección de calle principal de la plantación.
- **Altura de copa:** Altura máxima de la copa desde punto más extremo de un perfil del árbol hasta el suelo.
- **Altura de bajera:** Altura mínima de las ramas bajas desde punto más extremo de un perfil del árbol hasta el suelo.

INDIRECTOS

- **Área:** área del perfil del árbol desde la dirección observada que se calcula como ajuste a una elipse según la siguiente fórmula:

$$\text{Área (m}^2\text{)} = \frac{1}{4}\pi (D_{menor} + D_{mayor}) (\text{Altura total} - \text{Altura bajera}) \quad \text{Ec. 11}$$

- **Volumen de copa:** volumen de copa fue calculado con una fórmula de una elipsoide según la fórmula:

$$\text{Volumen copa (m}^3\text{)} = \frac{1}{6}\pi D_{menor} D_{mayor} (\text{Altura total} - \text{Altura bajera}) \quad \text{Ec.12}$$

-Parámetros obtenidos con fotogrametría lateral:

DIRECTOS

Los parámetros de árbol medidos son los mismos que el método manual, (**Diámetro mayor, Diámetro mayor, Altura de copa y Altura de bajera**) con la salvedad que el valor de los mismos se obtiene de la medida de la fotografía escalada obtenida desde cada una de las dos direcciones principales de la calle de plantación.

INDIRECTOS

- **Área:** área de los contornos cerrados que representa el perfil en (px²) y calibrado para su interpolación a m².
- **Volumen de copa:** volumen de copa fue calculado con la fórmula de una elipsoide según la fórmula anterior pero con las medidas obtenidas por fotogrametría lateral.

-Parámetros obtenidos con fotogrametría aérea:

Los parámetros de árbol medidos son los que se obtienen desde su proyección aérea de una ortofotografía con la imposibilidad de obtener valores de altura de copa y bajera. La obtención de los **diámetros** se puede obtener sus medidas directas sobre las fotografías escaladas de cada árbol.

Para una caracterización de los contornos aéreos que sirva de base en el estudio de aplicación de maquinaria específica con operaciones de trabajo con trayectorias regulares, se realizó un ajuste de dichos contornos a geometrías conocidas teniendo en cuenta que el **área** es la misma que la del contorno originario aéreo (Figura 33):

• Ajuste circular:

- **Diámetro circular (Dc):** Diámetro del círculo ajustado por el programa de análisis de imágenes Image J

$$\text{Desviación con el contorno real} = \frac{4 \text{ Area}}{\pi D_c^2} \quad \text{Ec. 13}$$

• Ajuste elíptico:

- **Diámetro elíptico (D₁, D₂):** Diámetros de la elipse ajustado el programa de análisis de imágenes Image J
- **Ángulo:** ángulo formado entre el diámetro principal de la elipse ajustada por ImageJ y el eje horizontal coincidente con la calle de la plantación.

$$\text{Desviación con el contorno real} = \frac{4 \text{ Area}}{\pi D_{\text{mayor}}^2} \quad \text{Ec. 14}$$

• Ajuste Feret:

- **Diámetro de Feret:** Mayor distancia entre dos puntos cualquiera a lo largo del contorno del perfil.
- **Ángulo:** ángulo formado entre el diámetro principal de Feret y el eje horizontal coincidente con la calle de la plantación.

$$\text{Desviación con el contorno real} = \frac{4 \text{ Area}}{\pi D_f^2} \quad \text{Ec. 15}$$

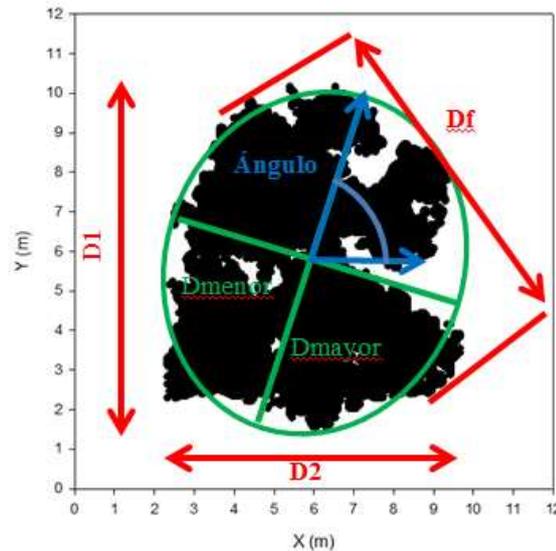


Figura 33. Representación de los principales descriptores del perfil aéreo de un árbol en el ensayo de caracterización geométrica mediante análisis de partículas

Por otra parte, para caracterizar lo homogéneo que es el perfil de un árbol para su trabajo en círculo, se define el concepto de circularidad como

$$\text{Circularidad} = \frac{4 \pi \text{Area}}{\text{Perímetro}^2} \quad \text{Ec. 16}$$

El cálculo aproximado del **volumen de copa** de los árboles se realizó mediante la fórmula planteada para la elipsoide de dos maneras diferentes:

- usando los diámetros según cada uno de los ajustes geométricos y la altura obtenida por fotogrametría aérea.
- usando los diámetros según cada uno de los ajustes geométricos y la altura obtenida por el método del jalón.

Además de estos parámetros, la fotogrametría aérea permitió la obtención de otros parámetros como el **espaciado entre árboles** y la **inclinación media del terreno**.

3.2.2.2 Capacidad productiva o rendimiento potencial de las plantaciones

Los árboles fueron recolectados para obtener su rendimiento potencial en kg árbol⁻¹ y multiplicado por su densidad de plantación para obtener su rendimiento potencial por plantación en kg ha⁻¹. Dichos árboles fueron medidos con el método tradicional con jalón para obtener un modelo que proporcione una relación entre el volumen de copa

medido con método tradicional y el rendimiento potencial de la plantación, separándolo según plantaciones en regadío o secano. Finalmente, para dar al modelo de mayor utilidad, se relacionó el volumen de copa de 36 árboles aleatorios de las plantaciones más representativas con el área de su copa obtenido de las ortofotografías obtenidas con UAS. Dicha relación se introdujo en el modelo y se realizó una validación del mismo.

Los volúmenes de copa se determinaron según un método de medición con jalón explicado en esta tesis en la caracterización de los árboles. Posteriormente la estimación del volumen de copa se realizó asemejándolo al volumen de una elipsoide según metodología de Muñoz-Cobo and Humanes-Guillén (1988). El área del árbol en su proyección aérea fue obtenida según el procedimiento descrito a continuación:

3.2.3 *Procedimiento*

Para el estudio de las medidas de los parámetros específicos de olivar, se usó inicialmente un método manual de medida con jalón para medir los árboles. Sin embargo, este método aporta un número muy escaso de datos para realizar una caracterización adecuada de las plantaciones y árboles tradicionales presentando una gran incertidumbre debido al error y baja precisión en la toma de medidas. Por ello, se planteó utilizar otro método para la caracterización de las geometrías de las plantaciones y árboles tradicionales basado en la fotogrametría.

De las medidas obtenidas con el método manual se extra información de los diámetros del árbol, altura total de árbol, altura de bajeras y un cálculo de su volumen de copa ajustado a una elipsoide.

De las fotografías laterales se realizaron medidas para determinar los diámetros mayor y menor de los árboles según sus dos perfiles y se compararon con las medidas tomadas del método manual con jalón.

De las fotografías aéreas tomadas se obtuvieron parámetros de las disposición de los árboles y la geometría de sus copas. Después, se realizó un ajuste de los contornos reales de las copas a geometrías básicas conocidas, tomando como partida la consideración de igualar el área de dichas formas. Estas geometrías, fueron posteriormente analizadas con técnicas de análisis de partículas (Abramoff, Magalhães & Ram, 2004) con el software ImageJ obteniendo una serie de parámetros asociados o descriptores.

De los distintos parámetros analizados se han extraído resultados específicos relacionados para el diseño de maquinaria de recolección de sacudidores de copa que sirvan para la correcta integración máquina-árbol.

3.2.3.1 Método de medida manual con jalón

Con este método (Figura 34) un operario se situó con el jalón en posición vertical en el centro de la copa del árbol y otro localizado fuera de la misma a 10 m de distancia anotó las medidas de la máxima altura el árbol y altura de mínima de bajera del árbol. Después el primer operador situó el jalón en una posición horizontal a 1,5 m desde el suelo y colocando su extremo en la posición extrema de un lado de la copa del árbol según indicaciones del segundo operario. Una vez colocado el mismo, éste anotó la medida de la anchura máxima de la copa. Esta operación, se realizó una vez más en el mismo árbol pero en un plano perpendicular al que corresponde a otro perfil del árbol. Posteriormente, el procedimiento se repite en cada árbol de la plantación medida.

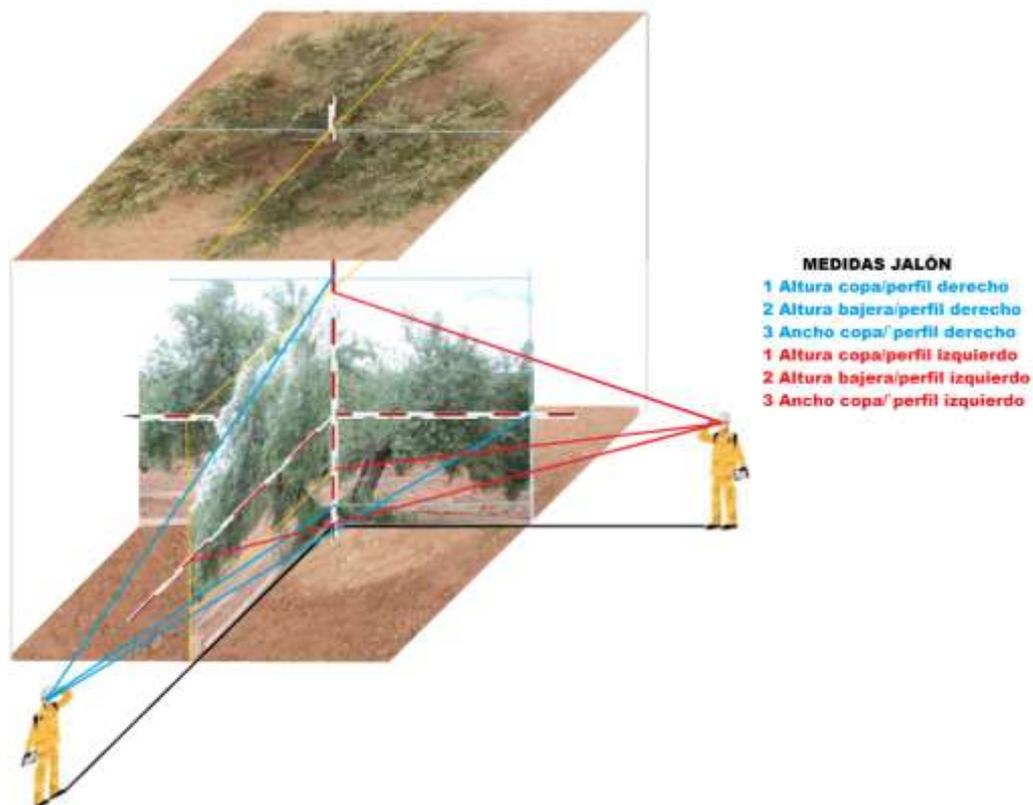


Figura 34. Representación del método manual de la medida de copa con jalón en olivar

3.2.3.2 Métodos de medida fotogramétricos

El procedimiento usado para los métodos fotogramétricos se dividió en la toma de imágenes (laterales y aéreas) y en el procesado de la información obtenida de las mismas

.3.2.3.2.1 *Obtención de imágenes laterales*

La operativa realizada fue similar a la realizada en el método del jalón, es decir, se colocó un trípode con una cámara digital (SONY NEX7, Japan) con una apertura de 3.5, distancia focal de 18 mm y sin flash en la misma distancia a la que se colocó el operador en el método anterior que tomaba las lecturas del jalón, a una altura de 1.8m del suelo, y apuntando perpendicularmente al árbol. En el árbol se colocó una gran pantalla de color blanco con una superficie plástica para poder discernir entre el fondo de los árboles (Figura 35).



Figura 35. Fotografía lateral con fondo blanco plástico en olivar tradicional y posicionamiento de jalón en posición central del árbol

.3.2.3.2.2 *Obtención de imágenes aéreas*

La cámara digital usada fue colocada en un dispositivo de estabilizador de cámaras gimbal Zenmuse, Z15, China que se ancló a un UAS con una estructura de hexacóptero (DJI S800, China), controlado por un autopilot multirotor (WOOKONG-M, China) (Figura 36). Posteriormente, se procedió a realizar una ortografía completa de los árboles ensayados. Para ello, se estableció un plan de vuelo en el UAS mediante una

programación con waypoint a una altura 70 m y una velocidad de 8 m s^{-1} y un solape entre pasadas de 65%, para la obtención de imágenes de manera automática. Las imágenes fueron sincronizadas usando la georeferenciación de un GPS y un autodespacho programado para cada imagen. No se realizó ningún control de tierra durante el vuelo. Todas las fotografías fueron realizadas sobre las 12:30 pm.



Figura 36. Elevación de UAS en olivar para la obtención de fotografías aéreas antes de la puesta en modo automático

Las fotografías obtenidas fueron procesadas mediante el software pix4d (Ecublens, Switzerland) creando un modelo de superficies digital (DSM) y una ortofotografía por un proceso de aerotriangulación basado en un modelo matemático con ecuaciones de colinealidad que incorporan gran cantidad de redundancias al proceso para poder dar robustez al sistema y obtener resultados con alta fiabilidad.

.3.2.3.2.3 Post-procesado de las imágenes obtenidas

El proceso de post-procesado de las ortofotografías y fotografías laterales ((Figura 37) consiste en la generación de diferentes índices de color que distinguen elementos en sus coordenadas cromáticas. Para ello se utilizó un software libre de análisis de imágenes Image J (Image J, USA) previa discriminación de fondos y elementos indeseables usando la técnica RGB para píxeles individuales (Meyer & Neto, 2008).

En una primera etapa del proceso los valores originales RGB de la imagen (Figura 37A) fueron transformados en una escala de grises para crear una imagen monocromática para su procesamiento digital (Clement, Gazquez, Manzano-Agugliaro,

2012). La banda verde fue usada para conseguir una segmentación de varios componentes (tierra y árbol). Posteriormente, se determinaron dos rangos en la escala de grises que permitieron distinguir las formas de las siluetas de los árboles eligiendo la banda más brillante que representaba el fondo de la foto lateral y el suelo en la fotogrametría (Figura 37B). Esta separación de bandas fue realizada manualmente por un experto usando R-values con rango entre 0-255. Después se procedió a la eliminación dicho fondo para discriminar con la obtención de las siluetas. Finalmente dicha silueta fue convertida en una única superficie de color negro para poder ser utilizada como análisis de partículas utilizando cada pixel obtenido (Figura 37C). Para este último paso se utilizó el software ImageJ (Igathinathane, Pordesimo, Columbus, Batchelor & Methuku, 2008) calibrando el área en píxels con unidades en m².

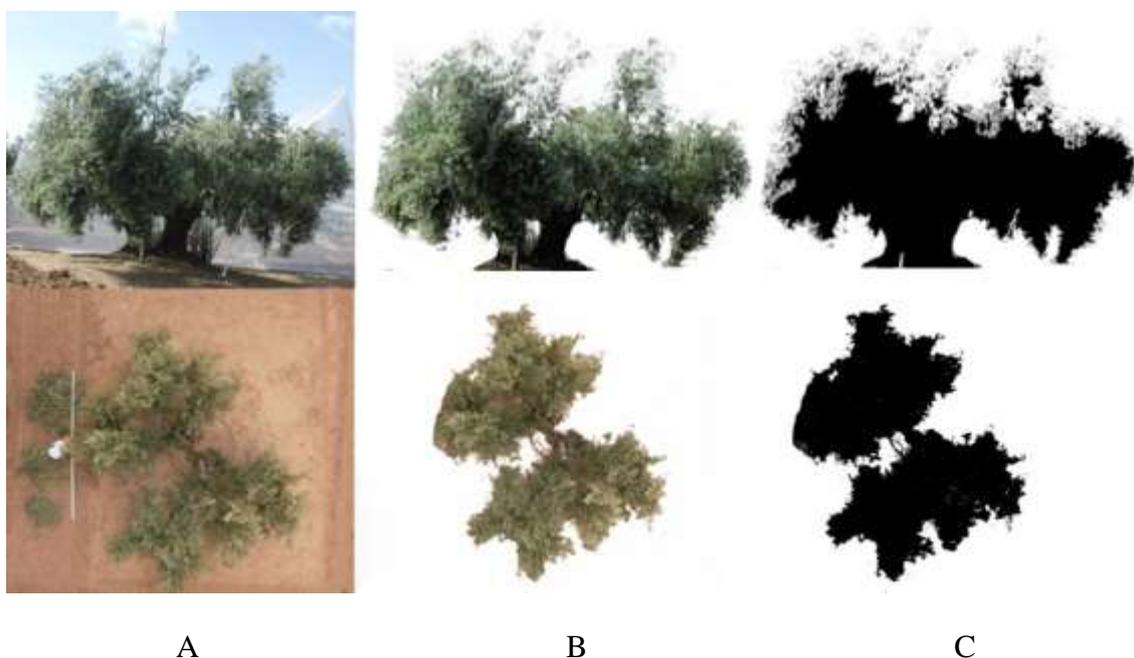


Figura 37. Metodología de procesado de imágenes obtenidas. A. Obtención de fotografía escalada georreferenciada y corrección de lente; B. Proceso de segmentación de fondo; proceso de eliminación de fondo; C. Proceso de digitalización de contornos y análisis de partículas

3.3 Integración de un dispositivo de gestión de fruto derribado con un sacudidor de copa comercial y estudio de viabilidad de cosecha integral en olivar tradicional.

En este apartado se realizaron una serie de actividades para demostrar la viabilidad de la recolección integral con un sacudidor de copa comercial. Para ello se estudió dicho sacudidor de copa en lo relativo a parámetros de derribo, localización de fruto derribado y características de funcionamiento para finalmente desarrollar un

dispositivo de recepción y gestión de fruto e integrar ambos. De esta manera se realizaron tres fases:

- ✓ FASE A: Estudio de la viabilidad de un sistema sacudidor de copa comercial en olivar tradicional y su configuración.
- ✓ FASE B: Determinación de un dispositivo acoplado al sacudidor de copa para la recepción del fruto derribado.
- ✓ FASE C: Desarrollo de un dispositivo que realice todas las tareas necesarias, para que unido al sistema sacudidor de copa, realice la recolección integral del olivar tradicional.

3.3.1 *Maquinaria utilizada*

El sistema de derribo del fruto empleado en todas las fases del trabajo, ha sido un sacudidor de copa comercial para cítricos Oxbo 3210 accionado por un tractor (John Deere, 6920). La máquina fue cedida por la finca Moratalla en (Almodóvar del Río, Córdoba).

Para proceder a la obtención de un sistema de recolección integral, en primer lugar fue necesario obtener la geometría del sistema de derribo realizando un modelado tridimensional. Para ello, se realizaron las medidas geométricas y dimensionales necesarias de la máquina y de los componentes principales. (Figura 38).



Figura 38. Mediciones dimensionales y geométricas de la máquina Oxbo 3210 para su modelado geométrico

Para caracterizar los grados de movimiento y la cinemática de la máquina, ésta se colocó en sus puntos de funcionamiento extremos (Figura 39).



Figura 39. Mediciones de los grados de movimiento y cinemática de la máquina Oxbo 3210

Finalmente se obtuvo el modelado geométrico con el ensamblaje de los distintos mecanismos que la componían y se establecieron sus restricciones geométricas y cinemática asociadas (Figura 40) para simular virtualmente el comportamiento de la máquina y no crear colisiones en el diseño del sistema complementario de gestión de fruto.

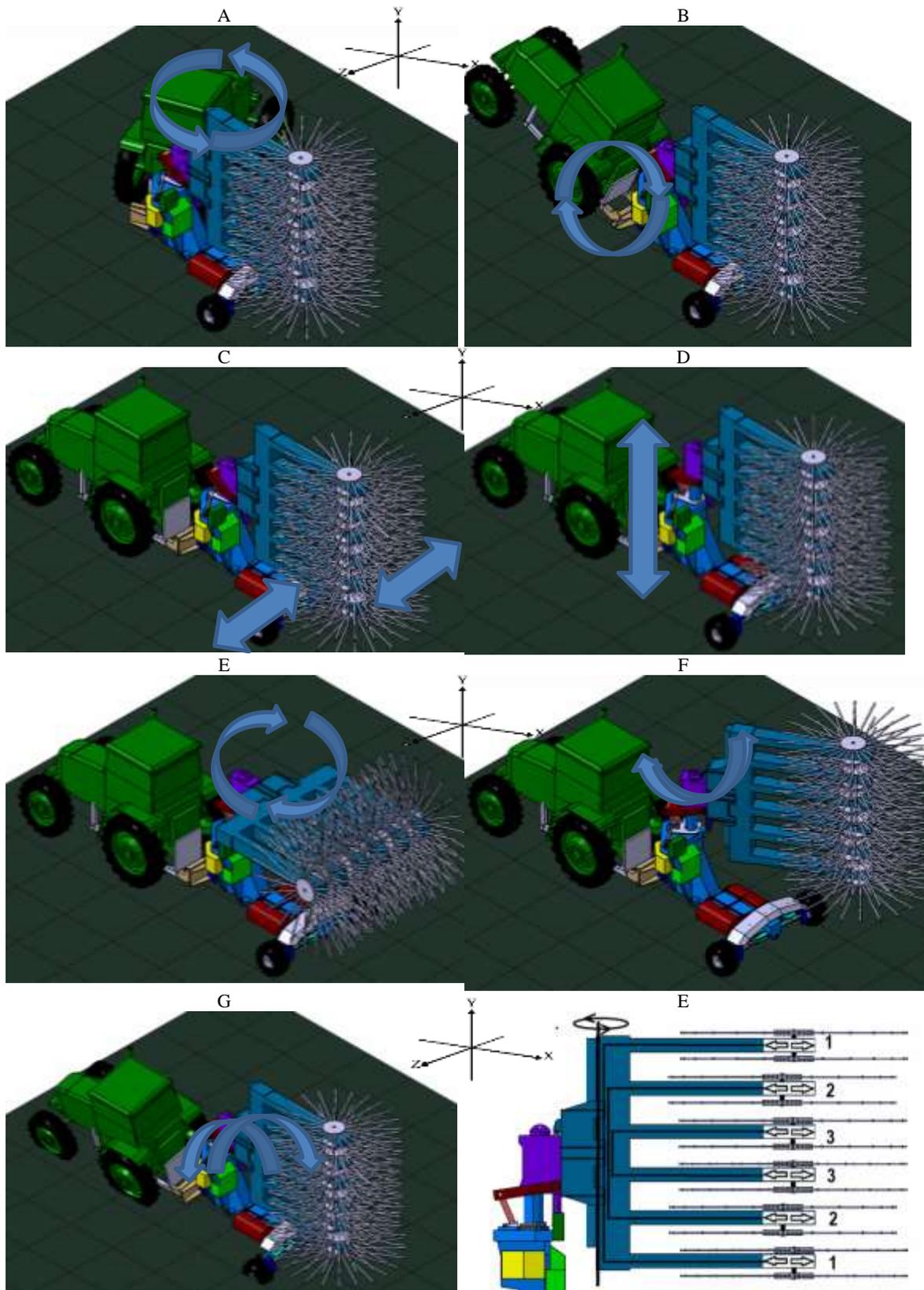


Figura 40. Movimientos de la máquina Oxbo 3210. Rotación del tractor en eje y (A), y eje z (B), extensión del ancho de vía de las ruedas traseras (C), elevación del sistema de brazos portadores de varas (D), rotación del sistema de brazos portadores de varas en eje z (E), y eje y (F), rotación del conjunto sacudidor de copa en eje z (G), movimiento lineal alternativo del portavaras en eje x (E)

3.3.2 Ensayos

La investigación se llevó a cabo en tres fases diferentes y los ensayos fueron realizados en las fincas de IFAPA, Fuente La Rosa y La Mata respectivamente según las distintas fases. Los datos que supusieron dichas plantaciones en las fechas ensayadas se exponen en la Tabla 7:

Tabla 7. Características de las plantaciones ensayadas. Valores muestran la media± desviación típica

	Fase A	Fase B	Fase C
Periodo recolección	dic-09	feb-11	feb-12
Plantación	IFAPA	Fuente La Rosa	La Mata
Altura total (m)	4,14±0,51	3,87±0,13	4,340±0,196
Altura de tronco(m)	-	1,34±0,13	1,54±0,18
Diámetro de copa (m)	6,53±1,03	6,51±0,7	7,60±0,74
Diámetro de tronco (m)	-	0,48±0,10	0,46±0,08
Volumen de copa (m³)	78,54±30,78	75,42±17,19	112,56±20,27
Producción (kg árbol⁻¹)	108,38±34,30	121,571±12,362	62,838±28,525
FRF (cN)	479,61±112,69	347,887±95,58	441,947±75,82

3.3.3 Parámetros evaluados

En función de las fases que comprenden este punto se estudiaron diferentes parámetros:

- ✓ FASE A: Parámetros propios del sacudidor de copa relativos al derribo tales como eficiencia de derribo total y exterior, daños al árbol, aceleración eficaz y su transmisión.
- ✓ FASE B: Parámetros de un sistema de interceptación como la localización del derribo y eficiencia de interceptación. De igual manera, se estudiaron parámetros de diseño para el dimensionamiento y comportamiento de una estructura de recepción de fruto.
- ✓ FASE C: Parámetros del conjunto sacudidor-interceptación para evaluar la eficiencia de derribo total y exterior, eficiencia de interceptación, eficiencia de cosecha, daños al árbol y la capacidad de trabajo del sistema.

3.3.4 Procedimiento

Para la evaluación de los distintos ensayos se diseñó un método de trabajo basado en una trayectoria de desplazamiento del dispositivo que permita el trabajo alrededor de la

copa de árbol para así llegar a casi la totalidad de la misma y alcanzar grandes niveles de derribo con un ciclo de trabajo continuo. Esta trayectoria se basaba en una primera aproximación tangencial a la copa del árbol con el sistema de sacudida accionado, seguida de una trayectoria circular alrededor de la copa del árbol en función de su geometría, procurando que el contacto del sistema de sacudida con la misma sea el mayor posible. Tras recorrer la totalidad del perímetro de la copa, el sistema se dirige al siguiente árbol por la distancia más corta e inicia el ciclo de trabajo.

Cada una de estas fases tuvo asociada una metodología con actividades específicas que se muestran a continuación:

✓ **Fase A.**

Para determinar las características del derribo del sacudidor de copa se realizaron seis configuraciones diferentes en sus parámetros de funcionamiento (Tabla 8), considerando la velocidad de desplazamiento del dispositivo (1 y 1,5 km h⁻¹) y la frecuencia de sacudida (3, 4 y 5 Hz). Cada configuración se aplicó en 7 árboles distintos. En cada ensayo se estableció un ángulo fijo de inclinación de varas de unos 5° con respecto a la horizontal.

Tabla 8. Configuraciones planteadas para los ensayos en la fase A

Configuración	Velocidad de avance(km h⁻¹)	Frecuencia de sacudida (Hz)
1		3
2	1	4
3		5
4		3
5	1,5	4
6		5

El estudio de la transmisión de la vibración desde la máquina al árbol fue realizado en condiciones reales de trabajo sobre tres olivos. En cada rama se realizaron seis medidas distintas correspondientes a distintas configuraciones del sacudidor de copa. En cada rama, se colocaron los acelerómetros en su punto más exterior, en un punto más interior separado 1,5 m aproximadamente y en un punto intermedio entre ambos (Figura 27). Las medidas de la aceleración en los diferentes puntos permitieron determinar la frecuencia de la vibración y la transmisión de ésta a lo largo de la rama.

En cada ensayo los frutos y daños derribados fueron separados y pesados de lienzos que se pusieron debajo de los árboles recolectados. Finalmente, se realizó un apure de los árboles diferenciando su exterior e interior y se procedió a su pesado.

✓ **Fase B.**

El dimensionamiento y diseño del sistema integral de recolección parte del estudio del comportamiento del sistema de derribo trabajando con una estructura de recepción. Además, para conseguir unos porcentajes altos de eficiencia de interceptación, fue de vital importancia localizar la caída del fruto y determinar su modo de hacerlo para así conseguir una alta eficiencia con una superficie mínima de interceptación, que permitiera una buena maniobrabilidad en el método de recolección planteado alrededor del árbol.

Se diseñó una superficie de recogida (Figura 41) que permitió sectorizar la caída del fruto derribado en las zonas de la máquina. Se establecieron 9 zonas posibles de caída de los frutos derribados

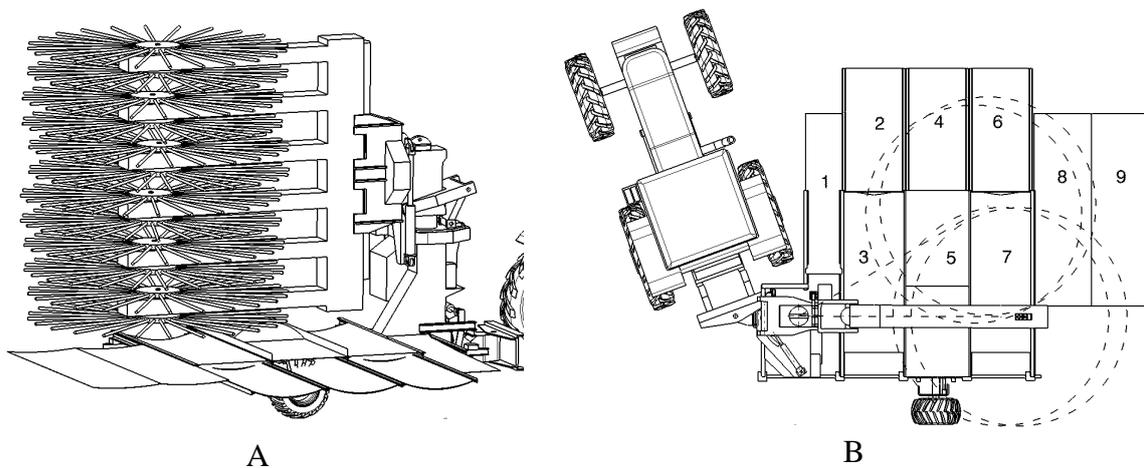


Figura 41. A: Sistema de interceptación diseñado para la determinación de la distribución del fruto derribado por el sacudidor Oxbo 3210. B: Vista en planta de los distintos sectores de estudio. Las líneas discontinuas muestran de los movimientos extremos del sacudidor

Cada sector estuvo cubierto por una superficie de tela plástica sin tensión para permitir que el fruto derribado se alojara en el sector correspondiente donde cayera en primera instancia, absorbiendo en el derribo la energía que tuviese y así evitar rebotes. La estructura estaba compuesta por medio de perfiles metálicos que sirvieran de bastidor a las telas plásticas usadas como superficie de recepción (Figura 42), de tal manera que los sectores que formaran pudieran moverse con respecto a un chasis principal por medio de correderas y así formar distintas configuraciones. Las

dimensiones regulables de los sectores permitieron distintas configuraciones que garantizarán, tras distintas pasadas de recolección experimentales, la mayor capacidad de recepción posible con la mejor maniobrabilidad de la máquina que permitiera aproximarse a los troncos de los árboles sin causar colisiones en su trabajo en círculo. De esta manera, los sectores 2, 4, 6, 8 ,9 podían aumentar su superficie de recepción siendo extensibles hacia su dirección transversal.



Figura 42. Sistema de interceptación experimental con sectores para la localización del fruto derribado por el sacudidor de copa Oxbo 3210

El chasis principal se anclaba a la parte delantera y trasera del sacudidor de copa de tal modo, que toda la estructura se comportara del mismo modo que el sistema de tracción del conjunto, es decir, que se autonivelase de forma independiente al conjunto de brazos del sacudidor.

Sobre cada zona estudiada se determinó la cantidad de fruto que contenía así como la cantidad de brotes, hojas y ramas causados por el derribo del sacudidor.

Fase C.

Se diseñó un prototipo para la realización de las operaciones de recepción, gestión, limpieza y almacenamiento del fruto que es derribado por el sacudidor de copa. Ambos fueron acoplados consiguiendo así un sistema de recolección integral arrastrado por un tractor, que permitiera el trabajo en continuo sin paradas y fuera dirigido por un tractorista.

El proceso de diseño y desarrollo del prototipo estuvo basado en una metodología con planteamiento tradicional y secuencial llevada a cabo en un proceso de fase creativa, con reuniones periódicas con distintas personas expertas en la materia tratada, llevando a cabo una toma de decisiones basadas en las necesidades requeridas y objetivos planteados para el diseño y desarrollo de cada uno de los subsistemas del

prototipo y su integración general. Todo ello, generó en modelo paramétrico a través de un diseño conceptual de los subsistemas. Finalmente, se pasó a una fase de diseño detallado para el perfeccionamiento de todos los sistemas con un correcto funcionamiento cinemático que no permitiera colisiones.

El prototipo final diseñado (Figura 43 y 44) estuvo formado por un chasis metálico portador de unas bandas transportadoras, que conducen el fruto derribado, junto con los restos realizados por daños a la copa del árbol, hacia un dispositivo de limpieza. El fruto limpio es elevado hacia una tolva de almacenamiento que puede verter su contenido, por basculación, en el medio que se desee. Consta de un sistema de pesado dinámico que permite saber en cada momento cuál es el peso de fruto derribado. Una parte de la estructura de interceptación, dispone de un sistema de plegado tipo “ala” con dispositivos de adaptación al tronco o escamas, que permite verter el fruto a la banda transportadora principal tras realizar el proceso de derribo de un árbol y además ocupar menos espacio en sus desplazamientos en campo. El prototipo dispone, a su vez, de un eje trasero pivotante con dos ruedas autogiratorias para su adaptación al terreno y una buena maniobrabilidad según la trayectoria seguida por el arrastrados del conjunto. El acople del prototipo al sistema de derribo se realizó mediante unos enganches alojados en los ejes de las ruedas del sacudidor.

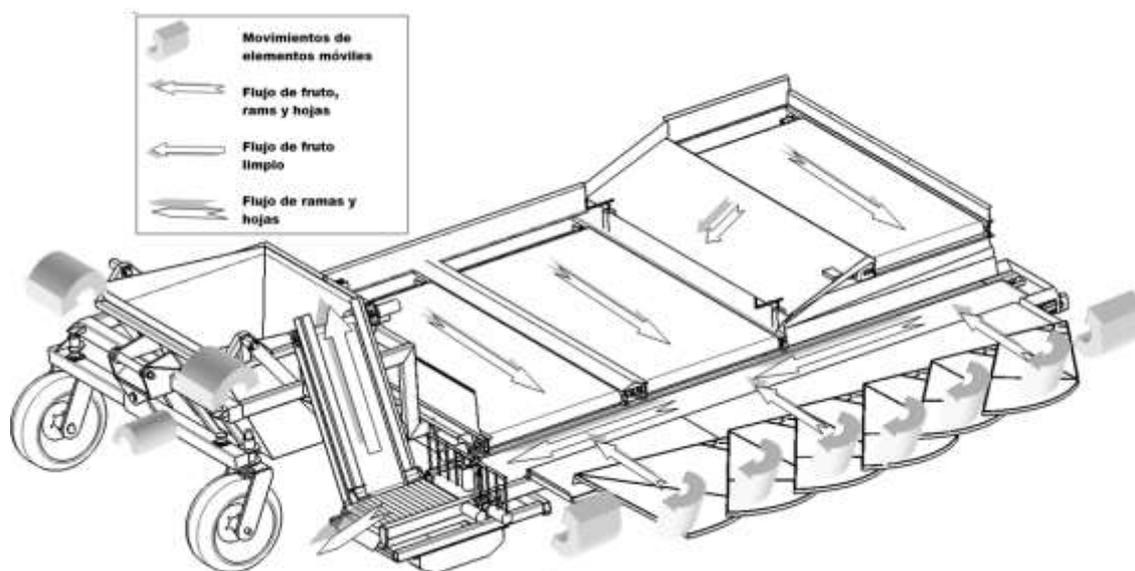


Figura 43. Prototipo para las operaciones de recepción, gestión, limpieza, carga y descarga acoplado al sistema de derribo Oxb0 3210. Representación de los movimientos del prototipo y los flujos de fruto y daños derribados

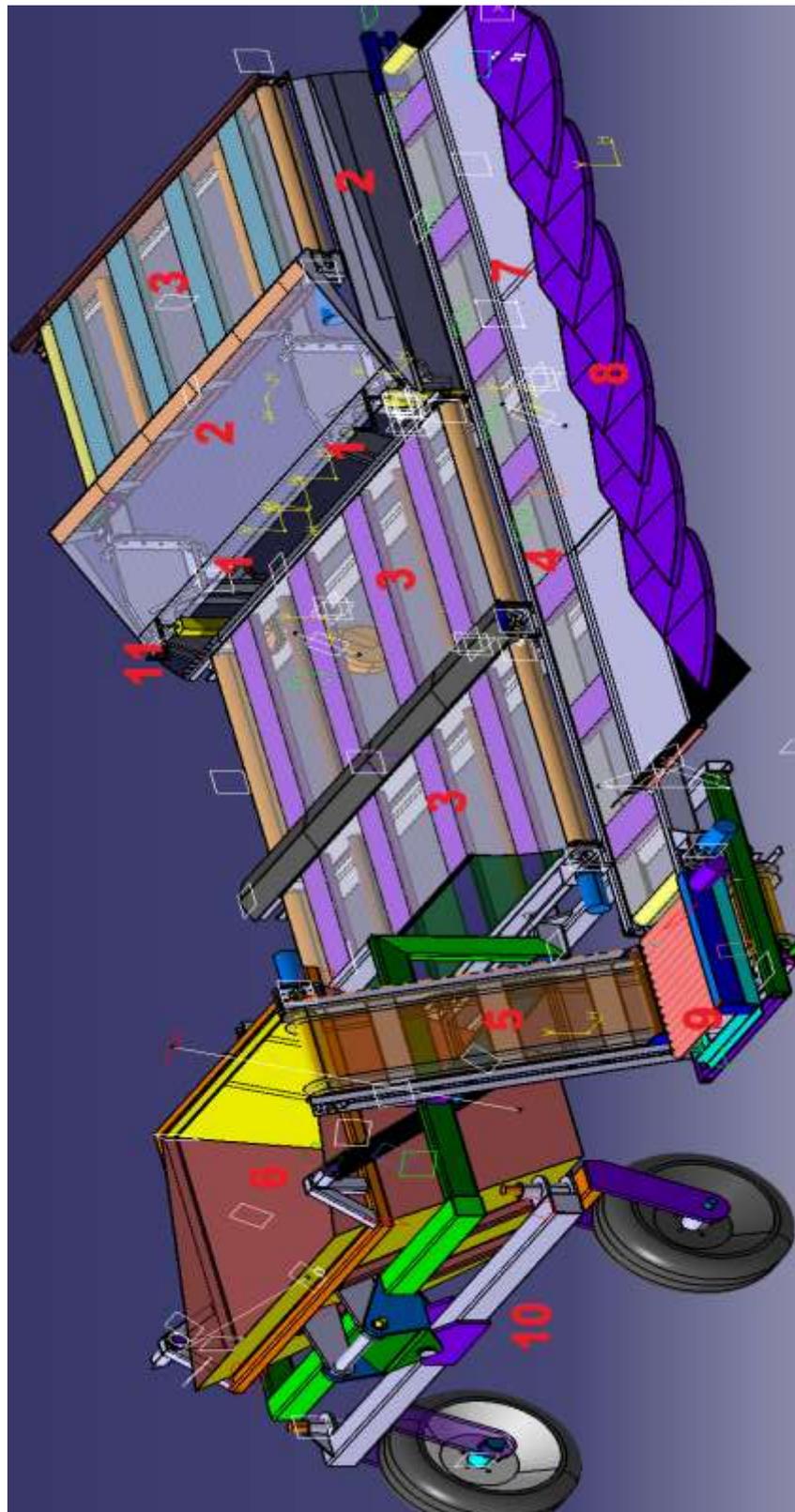


Figura 44. Prototipo para las operaciones de recepción, gestión, limpieza, carga y descarga acoplado al sistema de derribo Oxb0 3210. Las partes principales son: 1. Acoples en ejes del sacudidor; 2. Chapas protectoras y deflectoras; 3. Cintas transportadoras laterales; 4. Cinta principal transversal 5. Cinta elevadora; 6. Tolva almacenamiento con basculación hacia atrás y con sistema de pesado; 7. Sistema de recepción con sistema de plegado hacia la máquina; 8. Sistema de adaptación a tronco del árbol; 9. Sistema de limpieza del fruto; 10. Sistema suspensión-dirección con ruedas autogiratorias; 11. Sistema de ruedas delanteras para acople con máquina sacudidor

Tras cerrar la fase de diseño, se llevó a cabo la puesta en marcha, fabricación de componentes y montaje hasta formar el prototipo diseñado (Figura 45).



Figura 45. Dispositivo para las operaciones de recepción, gestión, limpieza, carga y descarga en proceso de fabricación

Finalmente, se realizó la instalación electro-hidráulica (Figura) necesaria para el control de los componentes del prototipo mediante un joystick situado en el tractor de arrastre de la máquina. Las funciones habilitadas fueron la regulación del sistema de plegado “ala” de la máquina, el sistema de basculación de la tolva, y funcionamiento de las bandas transportadoras. Todo ello fue gobernado por un distribuidor hidráulico que obtuvo el caudal hidráulico de un circuito del sacudidor, proveniente de un sistema de soplado que incorporaba para el barrido del fruto derribado al suelo que no fue usado ni necesario en estos ensayos.

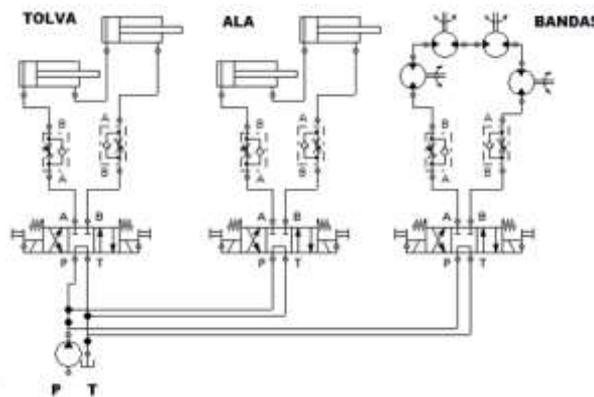


Figura 46. . Diseño del circuito hidráulico del prototipo planteado para las operaciones de recepción, gestión, limpieza, carga y descarga acoplado al sistema de derribo Oxb0 3210

Finalmente, se realizaron unos ensayos de recolección de una jornada de trabajo, evaluando los diferentes parámetros necesarios para evaluar la eficiencia del dispositivo de recolección integral.

3.4 *Desarrollo de sistemas de derribo sacudidores de copa específicos para el olivar tradicional.*

En este capítulo se diseñaron diferentes prototipos de derribo basados en sacudidores de copa y se analizó su funcionamiento con diferentes mecanismos y parámetros. El desarrollo de un mecanismo específico sigue una evolución que fue desde una fase creativa, que continuó con el diseño y fabricación de varios prototipos a los que se incorporaron modificaciones para llegar al estudio de dos alternativas posibles de derribo basadas en un sistema completo (con capacidad de atacar a toda una sección vertical de la copa) y otro modular (con capacidad de atacar a sólo un sector de la sección vertical de la copa). Finalmente, fueron estudiados parámetros específicos de la herramienta de golpeo o sacudida.

3.4.1 *Evolución y diseño de sistemas de derribo*

3.4.1.1 Elección de parámetros de diseño

Para tomar ciertas decisiones en cuanto a los parámetros del diseño de un sacudidor de copa aplicado a olivar tradicional, se realizó la matriz QFD (Figura 47) a 10 personas implicadas y no implicadas en la realización del proyecto, para valorar la dificultad en la consecución de una serie de objetivos, la importancia para el usuario final y la evaluación del servicio prestado al mismo.

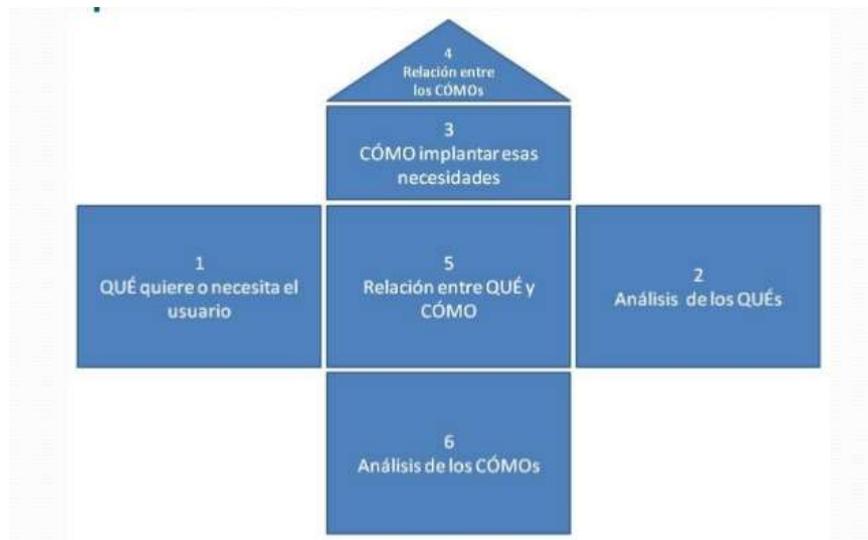


Figura 47. Esquema básico de matriz QFD

Los objetivos propuestos (QUÉs) para el cliente se muestran en la primera columna junto con la valoración de los mismos en su importancia, en escala de 1 a 5. La dificultad de consecución de los objetivos se muestra en la fila inferior, en una escala de 1 a 5. En las dos últimas filas se evalúa el peso que da el cliente al servicio se muestra con dos valores: un valor absoluto, que indica la suma de las puntuaciones de cada factor, y un valor relativo, que se calcula en porcentaje respecto al total de las puntuaciones dadas para el conjunto de factores evaluados.

3.4.1.2 Diseño del sistemas de derribo. Pruebas de mecanismos y su funcionamiento

Para el diseño del sistema de derribo se propusieron varios sistemas basados en la sacudida de la copa. Los diseños pasaron por una evaluación previa en gabinete, en la cual se seleccionaron las propuestas más interesantes, que respondían a las premisas obtenidas de la matriz QFD. La propuesta elegida fue fabricada y probada iniciando un proceso de pruebas para la viabilidad del mecanismos en el olivar tradicional. Tras cada prueba se realizaron mejoras o rediseños para evolucionar hacia un diseño de sistema de derribo válido para la tipología de plantación estudiada.

3.4.2 Evaluación de prototipos de derribo modular y completo

Para discutir las diferencias entre un prototipo de sacudida modular que afecte a un sector concreto del árbol y un sistema completo lateral de un único cuerpo que aplique la sacudida a toda la copa en general, se realizó un estudio en dos vertientes provenientes de los diseños estudiados en la fase anterior (Figura 48).

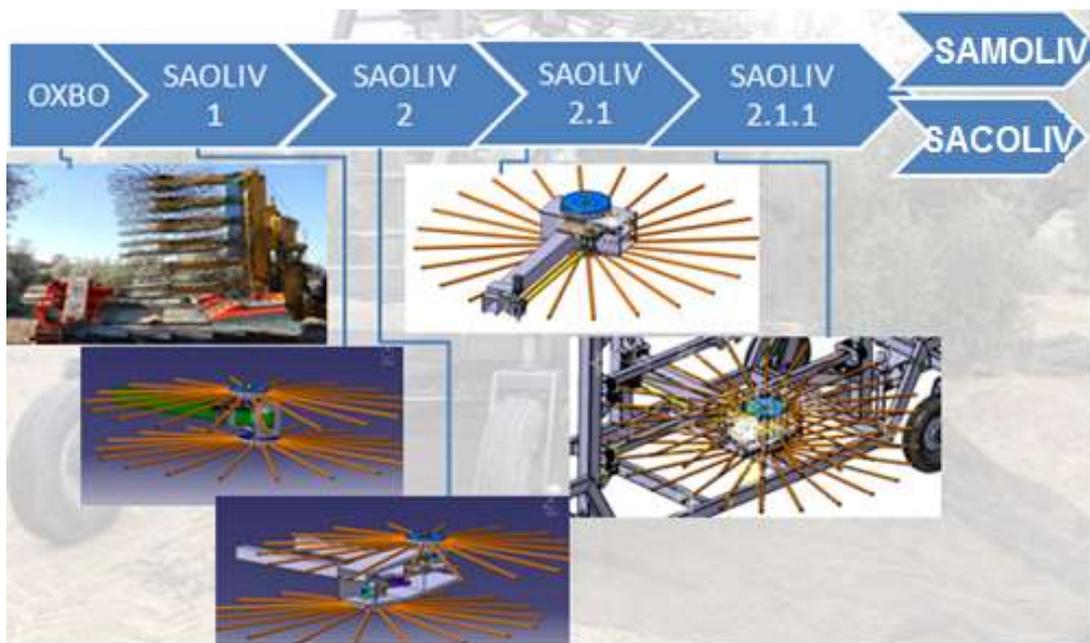


Figura 48. Evolución de los prototipos de sacudida de copa estudiados en el apartado 3.4.1.2

En primer lugar, se eligió una de las propuestas de la fase anterior y se rediseñó en base a los resultados obtenidos de esta fase obteniéndose el prototipo SAMOLIV (Sacudidor Modular Olivar). En segundo lugar, se eligió realizar un prototipo de sacudida completo basado en otra de las propuestas de la fase anterior, con una configuración similar al sistema de derribo de fases anteriores Oxbo 3210, pero adaptado al olivar tradicional en parámetros y configurable, obteniéndose el prototipo SACOLIV (Sacudidor Completo Olivar). Ambos prototipos fueron fabricados y ensayados para estudiar diferentes parámetros para la recolección del olivar tradicional.

3.4.2.1 Ensayos

3.4.2.1.1 PROTOTIPO DE DERRIBO MODULAR (SAMOLIV)

Se ha ensayado en una finca de Posadas en olivar de variedad picual formados a un pie y con un marco de 6 x 7,5 m. Se han recogido 18 árboles separándolos en dos mitades según den a una u otra calle. Cada una de las caras ha sido recolectada con una trayectoria lineal con el sistema de derribo manteniendo el máximo contacto posible con la copa. Algunos de los parámetros se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros del fruto y árboles empleados para el ensayo. Valores muestran la media± desviación típica

Parámetros de árbol y fruto	Valores
Altura de árbol	3,1 ± 0,5
Diámetro de copa menor (m)	3,8 ± 1,1
Volumen de copa (m ³)	30,6 ± 5,7
Fuerza de retención del fruto (N)	4,2 ± 0,8
Peso del fruto fresco (g)	2,6 ± 1,24
Índice de madurez	3,8± 0,3

3.4.2.1.2 PROTOTIPO DE DERRIBO COMPLETO (SACOLIV)

El ensayo se realizó la finca de Fuente La Rosa en Diciembre de 2013 bajo similares condiciones siendo los valores de los árboles y frutos los mostrados en la Tabla 10.

En total, 45 árboles fueron recolectados, nueve árboles por modificación del factor de estudio, o configuración realizada de la máquina.

Tabla 10 Parámetros de los árboles ensayados. Valores muestran la media± desviación típica

Parámetros del árbol y fruto	Valores
Altura del árbol (m)	3,86 ± 0,36
Altura del tronco (m)	1,55 ± 0,18
Diámetro de tronco (cm)	1,27 ± 0,35
Diámetro mayor de copa (m)	7,00 ± 1,19
Diámetro menor de copa (m)	6,70 ± 0,88
Volumen de copa (m ³ árbol ⁻¹)	81,41 ± 21,16
Producción (kg árbol ⁻¹)	64,62 ± 27,25
Fuerza de Retención de Fruto (N)	3,95 ± 0,95
Peso unitario de fruto (g)	3,67 ± 0,76

3.4.2.2 Parámetros evaluados

3.4.2.2.1 *PROTOTIPO DE DERRIBO MODULAR (SAMOLIV)*

El prototipo fue ensayado en función de sus configuraciones de estudio ensayando principalmente frecuencias de sacudida, velocidad de avance y material de golpeo. Tras la aplicación de cada configuración se evaluó la eficiencia de derribo y los daños causados a la zona del árbol a la cual se aplicó la sacudida (Figura 49).



Figura 49. Zona de actuación en la copa del árbol del prototipo SAMOLIV

Para la evaluación de las aceleraciones en ramas, se colocaron dos acelerómetros distribuidos aleatoriamente en diferentes ramas fructíferas de los árboles ensayados. En cada señal registrada, se obtuvieron unos descriptores: el tiempo total que existe entre el primer y el último valor de aceleración que supera 40 ms^{-2} ; los tiempos acumulados que la señal está por encima de los umbrales de 200, 400 y 600 ms^{-2} ; y el número de impactos que superan los umbrales de 200, 400 y 600 ms^{-2} .

.3.4.2.2.2 PROTOTIPO DE DERRIBO COMPLETO (SACOLIV)

Se ensayaron las variables más importantes que afectan a la operación de recolección en la regulación de la máquina. Los factores ensayados fueron la amplitud del movimiento del tambor, la frecuencia del movimiento alternativo y el número de varas por tambor, y el tiempo de sacudida afectado por la velocidad de avance del prototipo. Dichos factores fueron estudiados partiendo de una configuración de referencia y realizando modificaciones en diferentes componentes para estudiar la influencia de dicho factor sobre los parámetros estudiados. La tabla 11 resume dichas modificaciones en el que cada factor se estableció en dos niveles. La configuración de referencia se estableció con los valores del nivel low de cada factor de estudio. A partir de dicha configuración de referencia, las modificaciones ensayadas para analizar la influencia de cada factor se realizaron incrementando dicho factor desde su valor low a su valor high y manteniendo el resto constante.

Tabla 11. Factores estudiados en el ensayo del prototipo SACOLIV y diferentes configuraciones de los mismos. La configuración de referencia es A0D0F0S0

Nomenclatura	Factor	Modificación en la máquina	Niveles	Valores	Configuración
A	Amplitud (m)	Excentricidad de la manivela	Low (0) High (1)	0.12 0.17	A1D0F0S0
D	Densidad de varas (#)	Número de varas por tambor	Low (0) High (1)	12 24	A0D1F0S0
F	Frecuencia (Hz)	Caudal en el motor	Low (0) High (1)	4 5	A0D0F1S0
S	Velocidad de avance (Km s^{-2})	Velocidad del tractor	Low (0) High (1)	0.5 1	A0D0F0S1

El prototipo fue evaluado según su eficiencia de derribo total y exterior y los daños generados en la operación por la rotura de ramas y brotes. De igual manera se estudió la

localización del fruto derribado. Para ello, los frutos derribados por el prototipo fueron interceptados por una superficie de interceptación dividida en cuatro zonas según la Figura 50. La zona 1 recogió los frutos derribados en la proyección vertical de los tambores con varas. Las zonas 2 y 3 recogieron los frutos caídos al inicio y final del proceso de sacudida, respectivamente, así como los frutos derribados debido a la transmisión de la vibración por las ramas y al rebote de los frutos en la copa. La zona 4 recogió los frutos caídos o proyectados hacia el interior de la copa del árbol. Debajo del árbol se dispusieron redes sobre el suelo para recoger los frutos derribados y no interceptados por la superficie de interceptación.

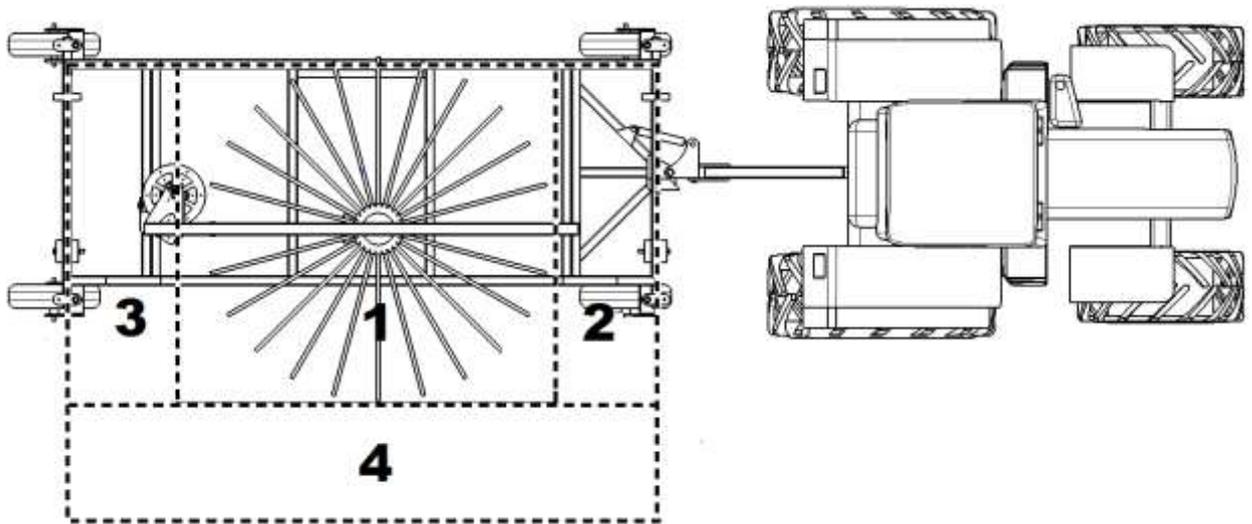


Figura 50. Esquema de la distribución de las zonas de estudio en la superficie de interceptación de los frutos derribados por SACOLIV

Para la evaluación de las aceleraciones en ramas, se colocaron dos acelerómetros distribuidos aleatoriamente en diferentes ramas fructíferas de los árboles ensayados. En cada señal registrada, se obtuvieron unos descriptores: el tiempo total que existe entre el primer y el último valor de aceleración que supera 40 ms^{-2} ; los tiempos acumulados que la señal está por encima de los umbrales de 40 ms^{-2} y 200 ms^{-2} ; y el número de impactos que superan el valor de 200 ms^{-2} .

3.4.2.3 Procedimiento

3.4.2.3.1 *PROTOTIPO DE DERRIBO MODULAR (SAMOLIV)*

9 árboles se han recogido empleando varas de fibra de vidrio y otros 9 empleando varas de acero. Se han realizado distintos tratamientos de frecuencia de sacudida a 3, 4 y 5 Hz aplicados a ambas caras de un árbol, y distribuidos al azar. También se han

aplicado dos velocidades de recolección, una por cada cara del mismo árbol. Las dos velocidades escogidas han sido $0,75 \text{ km h}^{-1}$ y $1,25 \text{ km h}^{-1}$, lo que daría una capacidad real de trabajo estimada entre $0,12$ y $0,21 \text{ ha h}^{-1}$ empleando uno o dos operarios.

Para medir el derribo se ha aplicado la sacudida a una altura fija de $1,5 \text{ m}$ del suelo a la primera vara y se ha establecido un margen de actuación del módulo de 1 m considerando 320 mm por encima y por debajo del perfil de las varas que están separadas entre sí otros 360 mm . Esta zona ha sido apurada selectivamente para conseguir datos de eficiencias de derribo y daños.

.3.4.2.3.2 PROTOTIPO DE DERRIBO COMPLETO (SACOLIV)

Los ensayos fueron realizados siguiendo las calles principales de la plantación manteniendo el centro de los tambores en contacto con las ramas más exteriores del árbol para recolectar la toda la copa y siguiendo una trayectoria lineal. De este modo se hicieron cuatro pasadas por árbol. Tras finalizar se realizó un proceso pesado del fruto y daños recolectado en los diferentes sectores del prototipo y fuera del mismo. Posteriormente, se realizó un apure selectivo del árbol para evaluar la eficiencia de derribo exterior y total.

3.4.3 Estudio de los elementos de sacudida del sistema de derribo.

En este apartado se evaluaron diferentes parámetros de los elementos de sacudida o golpeo en las ramas formados por tambores con varas, para profundizar en la comprensión de su comportamiento en el proceso de vareo mecánico.

3.4.3.1 Momento de inercia y control del giro.

Para evaluar el efecto del momento resistente de la herramienta golpeadora, compuesta por el tambor de sacudida y varas, se han realizado un ensayo sobre el prototipo SAOLIV 2.1.1 con diferentes configuraciones de varas. Se colocó un martillo de impacto fijo en un extremo donde la vara golpea, para medir los impactos ocasionados en su ciclo de trabajo a varias frecuencias ($1, 2, 3$ y 4 Hz) y con un giro libre o restringido por un freno que anulaba el giro del tambor, basado en unos platos de fricción (Figura 51). También se varió la masa del sistema y su momento de inercia mediante la colocación de varias configuraciones de varas de $24, 12$ y 4 , suponiendo que el conjunto de dos tambores (2×24 varas) pesa 160 kg y que el de una vara es de $2,35 \text{ kg}$, por lo que el paso de 24 a 12 varas supone una reducción de 56 kg y el paso de

12 a 4 de 38 kg. Se colocaron 4 acelerómetros en distintas partes del sistema de sacudida, en el centro del tambor, en el extremo de una vara del sacudidor, en el extremo de la vara usada para impactar, y en la estructura portante del sacudidor.



Figura 51. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Ensayo de registro de aceleraciones en diferentes partes del mecanismo, con martillo de impacto colocado en la estructura fija de su chasis.

3.4.3.2 Material, longitud y rigidez.

3.4.3.2.1 ENSAYO A

Para estudiar el funcionamiento del elemento impactante o varas, se ha creado un simulador de movimientos alternativos de las varas donde se pueden simular diferentes frecuencias y amplitudes de vareo, colocando diferentes configuraciones de varas. Dicho mecanismo está formado por un, una barra que pivota sobre un punto central anclado a una base fija. La barra se encuentra unida a un vibrador electromagnético LDS V721 que transmite un movimiento alternativo en un eje vertical a una frecuencia controlada. En el otro extremo, la barra se encuentra libre circulando por una serie de correderas. En este extremo, se colocan las varas a estudiar. La vara golpea sobre un martillo de impacto protegido por una punta de un material de comportamiento similar al de la madera de olivo (Figura 52). Las diferentes correderas que incorpora el mecanismo en los pivotes, permiten variar la amplitud de golpeo. El sistema de agarre del mecanismo permite alojar varas de diferente diámetro y longitud.

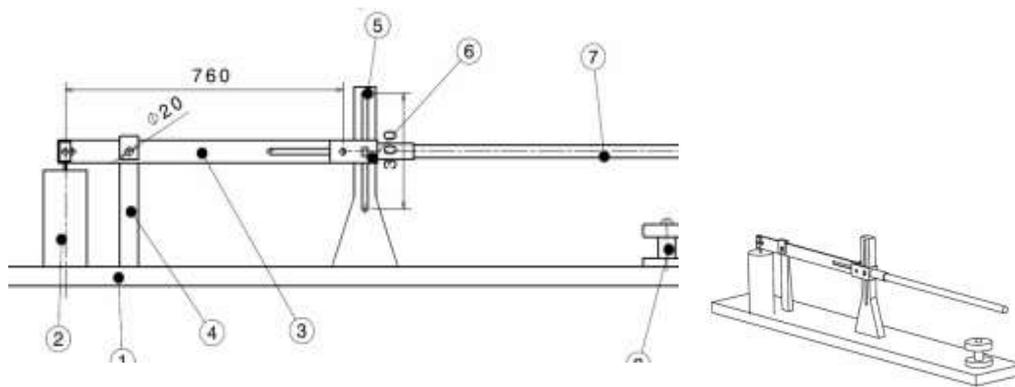


Figura 52. Mecanismo de simulación de vareo desarrollado para el ensayo de la herramienta de golpeo compuesto por: 1. Base del sistema; 2. Vibrador electromagnético; 3. Barra pivotante; 4. Soporte del pivote de giro; 5. Correderas; 6. Portavaras; 7. Vara a estudiar

Para estudiar diferentes parámetros en las varas de golpeo, se simuló el comportamiento de diferentes configuraciones estudiando la influencia de diámetros, longitudes, y materiales de varas con diferentes frecuencias y amplitudes de trabajo.

El ensayo ha tenido un carácter exponencial estudiando el comportamiento de las varas en el simulador función de los siguientes factores:

- Tipo de vara: Acero, acero recubierto de goma, híbrido de acero-nylon, poliéster reforzado con fibra de vidrio y fibra de carbono.
- Longitud de las varas: 0,8, 1,2 y 1,4 m
- Amplitud del movimiento: 100, 150 y 200 mm del anclaje del portavaras en su recorrido por la corredera.
- Frecuencias: 3, 4, 5, 6 Hz

.3.4.3.2.2 ENSAYO B

Para estudiar la influencia de algunos materiales de varas y la rigidez de los mismos a través de su sección, se ha determinado la fuerza de impacto que ejercen diversas varas con una energía determinada y ángulo que alcanzas en los diversos rebotes que cuando impactan con un elemento rígido para disipar dicha energía.

Para ello, se ha diseñado un mecanismo basado en un péndulo (Figura 53). La vara se coloca en una posición 90° y se suelta. En este momento la vara tiene una energía potencial máxima directamente proporcional a su masa y altura y que se va transformando en energía cinética a medida que cae hasta su punto máxima a 0° donde se encuentra un martillo de impacto con un material de dureza media. En ese momento parte de la energía se disipa en forma de deformación de la vara y otra parte en una fuerza de reacción contraria que empuja a la vara a ser rebotada un ángulo determinado que es registrado por un potenciómetro en el pivote. La vara sigue rebotando hasta disipar toda la energía y llegar al reposo. También se ha registrado el valor del impacto efectuado por la vara en el impacto.

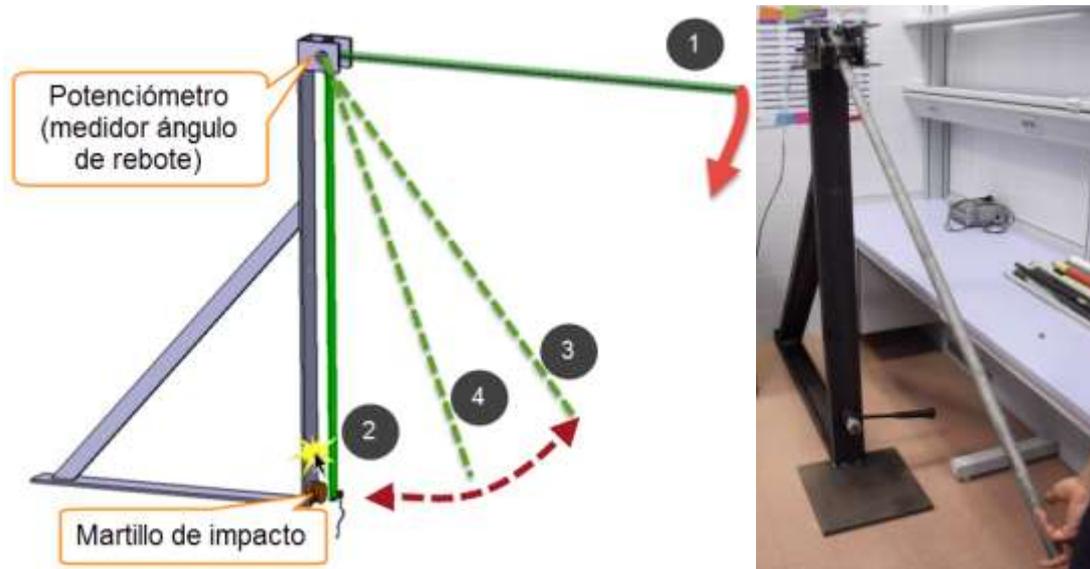


Figura 53. Mecanismo de impacto desarrollado para el estudio de la herramienta de golpeo. 1: Vara a 90° con energía cinética nula y potencial máxima; 2: Vara impacta en martillo a 0° con energía cinética máxima y potencial nula; 3: posición de vara en primer rebote; 4: punto de vara en segundo rebote.

Se han estudiado diferentes varas según varios materiales y dos secciones de vara, en el caso del acero, para una longitud fija de 1400mm. Dichas varas se han colocado en el mecanismo planteado se han colocado diferentes varas (Figura 54) con sección tubular y de longitud. Las varas estudiadas son:

- Acero:
 - Sección 32x2mm
 - Acero S-235 J2 sin ningún tratamiento térmico
 - Acero S-235 J2 nitrurado
 - Acero S-235 J2 templado
 - Acero S-235 J2 carbonitrurado
 - Sección 30x1.5mm
 - Acero S-235 J2 sin ningún tratamiento térmico
 - Acero S-235 J2 nitrurado
 - Acero S-235 J2 templado
 - Acero S-235 J2 carbonitrurado
- Fibra de vidrio
- Poliamida
- Madera

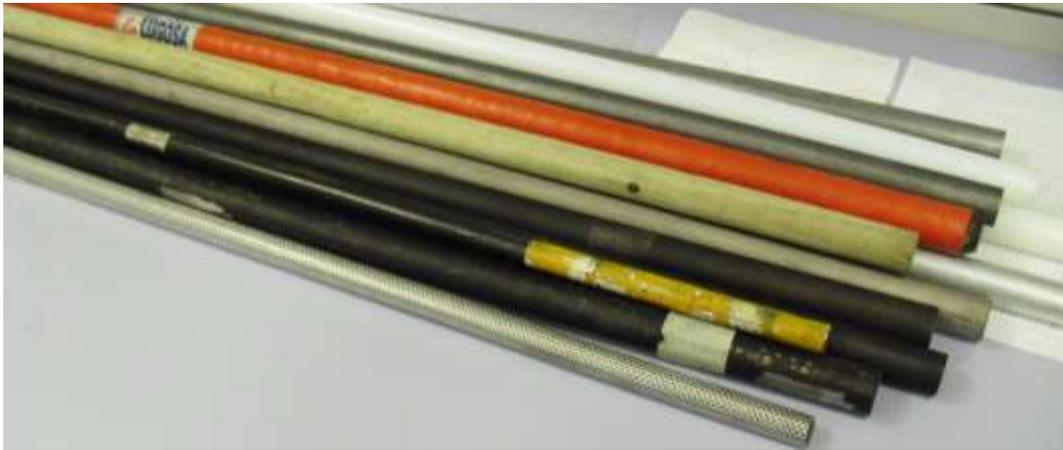


Figura 54. Varas usadas en el ensayo de estudio de la herramienta de golpeo

3.5 Desarrollo de un sistema de automatización de la aproximación del sistema de sacudida y el copiado a la copa del árbol.

En este apartado se desarrollaron dos sistemas de automatización y control del sistema de aproximación de un sacudidor de copa, que mantuviera un nivel de contacto adecuado con el contorno del árbol en su trayectoria de recolección. Este sistema será necesario incorporarlo en un prototipo futuro debido a la necesidad del contacto continuo de los sistemas sacudidores de copa con el olivo objeto de recolección para conseguir un nivel de derribo aceptable.

Las dos variables de control que sirvan de referencia para mantener el contacto con la copa son la distancia a la superficie de copa a sacudir y la densidad de follaje de la zona de sacudida. La densidad de follaje ha sido estimada a través de la caída de presión

en el circuito hidráulico del motor del sistema de accionamiento de derribo sobre el que se aplica la sacudida.

3.5.1 Ensayos

Los ensayos se realizaron en la finca La Mata. Los árboles en este año presentaban buen estado fisiológico y sanitario y estaban tradicionalmente podados para su recolección manual aunque con una morfología muy irregular. Otros datos de la plantación y sus frutos están resumidos en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros de árbol y fruto en la finca La Mata. Valores muestran la media± desviación típica

Parámetros de árbol y fruto	Valores
Altura de árbol	4,1 ± 0,4
Diámetro de copa (m)	7,2 ± 1, 1
Volumen de copa (m ³)	139,2 ± 30,2
Fuerza de retención del fruto (N)	4,1 ± 0, 6
Peso del fruto fresco (g)	3,4 ± 0,4

Se han recolectado 21 árboles, diferenciando 7 árboles para cada uno de los tratamientos planteados. Debido que el prototipo utilizado para la implementación del sistema de automatización, sólo tenía un módulo de derribo, se ha utilizado sólo la zona del árbol de actuación del mismo, siendo esta de un 1 m, a partir de 1,5 m sobre el suelo (Figura 49). Tampoco, se ha tenido en cuenta la producción en el interior del árbol.

El prototipo utilizado para implantar el sistema de automatización fue SAMOLIV colocado en una estructura en voladizo colocada a 2 m sobre el tripuntal trasero de un tractor New Holland T7.185 (Figura 55). El módulo de derribo permitía la aproximación al árbol radial a partir de un punto de pivote con un margen de aproximación de 1,1 m. Se han utilizado dos tomas hidráulicas remotas de un tractor para conectar el circuito de aproximación a la copa y el motor de sacudida respectivamente, de tal manera que no haya caídas de caudal considerables en su funcionamiento simultáneo.



Figura 55. Prototipo SAMOLIV con sistema de automatización experimental de aproximación al árbol

3.5.2 Parámetros evaluados

Para el estudio del sistema de automatización del copiado de copa y sus modos de funcionamiento, se ha medido la eficiencia de derribo y realizado una evaluación de daños ocasionados por el sistema de derribo en la zona de actuación en el árbol.

También se han medido otros parámetros durante el ciclo de recolección en un árbol: la presión del circuito hidráulico del sistema de derribo; la distancia relativa entre el mástil de sujeción del módulo y el árbol; y la posición del módulo con respecto a una posición inicial de reposo. Con estos parámetros se va a calcular el porcentaje del tiempo total de vibración, desde que comienza a recolectar el árbol hasta que acaba, en el que los valores de presión del circuito del motor se encuentran dentro del umbral establecido, por arriba o por abajo, para evaluar su correlación durante el ensayo. De igual modo, se va a calcular el porcentaje del tiempo de vibración en que la relación de la distancia medida en el sensor de ultrasonidos y la distancia medida en la posición de la aproximación del módulo de SAMOLIV se encuentran dentro de unos umbrales cercanos a 0,8-1,2 para evaluar su correlación durante el ensayo.

3.5.3 Procedimiento

Para el proceso de recolección, se ha establecido una velocidad de avance del tractor de $0,75 \text{ Km h}^{-1}$ con una trayectoria de recolección alrededor del árbol. La frecuencia de sacudida utilizada durante los ensayos ha sido de 5 Hz.

Se ha fijado la posición de referencia relativa a la “no aproximación” (0) del módulo sacudidor en un punto coincidente con la proyección vertical de la trayectoria de la rueda interior del tractor en su radio de giro máximo de 3,6 m (Figura 56). La trayectoria seguida por el tractor fue lo más homogénea posible coincidente con la media de los radios medios de los árboles ensayados en la plantación. Desde la posición de referencia el módulo tuvo la capacidad de aproximación de 1,1 m.

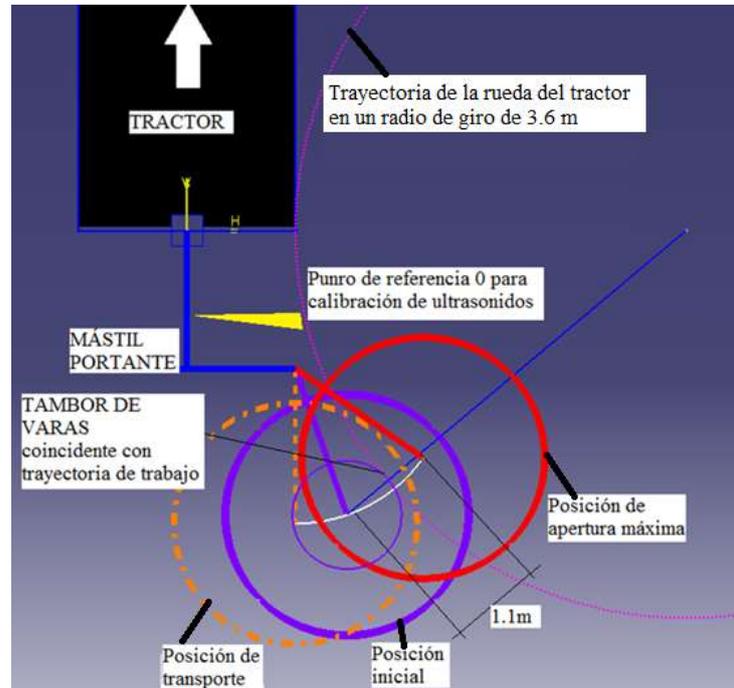


Figura 56. Esquema de posición del módulo de derribo de SAMOLIV (vista en planta)

Se han realizado tres tratamientos o modos de trabajo distintos para el estudio de la aptitud del sistema de control y sensores de detección para la aproximación automática a la copa:

- Modo de referencia: el prototipo no tiene aproximación de ningún tipo y se encuentra en una posición fija correspondiente a la posición inicial (Figura 56).
- Modo Presión: el prototipo aproxima a la copa del árbol, en función de los valores de una variable de control basada en la presión en el circuito hidráulico del motor de accionamiento. Los valores de control se establecen con umbral de presión mínimo (mayor a la presión del motor trabajando en vacío) y máximo (determinado por experimentación cuando existe una penetración excesiva del módulo de derribo). Cuando los valores de presión registrados en el circuito del motor se encuentran por

debajo de este umbral, el módulo aproxima a la copa para conseguir una cierta penetración del tambor y varas en el interior de las ramas, y que está relacionado con la densidad de follaje de la zona sacudida. Cuando los valores exceden el umbral, el módulo retrocede para no causar daño.

- Modo Distancia: el prototipo aproxima a la copa del árbol, en función de los valores de una variable de control basada en la distancia del mástil donde se soporta el prototipo a la copa. De esta manera la distancia de referencia se fija cuando el tambor del módulo se encuentra en su posición inicial de trabajo que coincide con una penetración correcta a la copa de un hipotético olivo con diámetro conocido trazando una trayectoria de giro de igual valor (Figura 56). Cuando el tractor avanza, la distancia varía con las irregularidades de la copa, aproximando o retrocediendo el módulo del derribo en función de los incrementos o decrementos de la distancia de referencia, y gracias al conocimiento de la posición del módulo por su sensor lineal.

Para el proceso de programación del modo automático se planteó una lógica de control que queda reflejada en los siguientes diagramas de flujo (Figura 57-60):

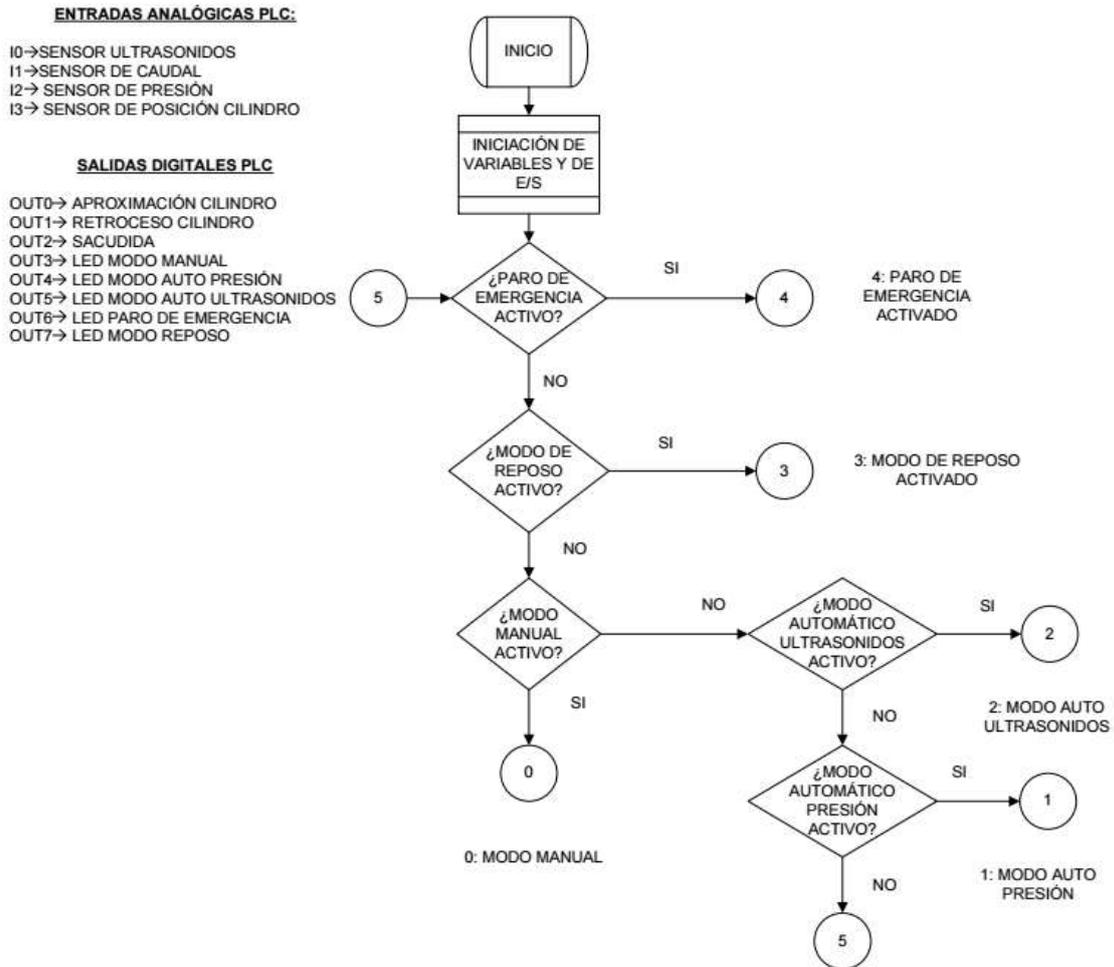


Figura 57. Lógica de control de inicio del algoritmo de copiado automático de copa

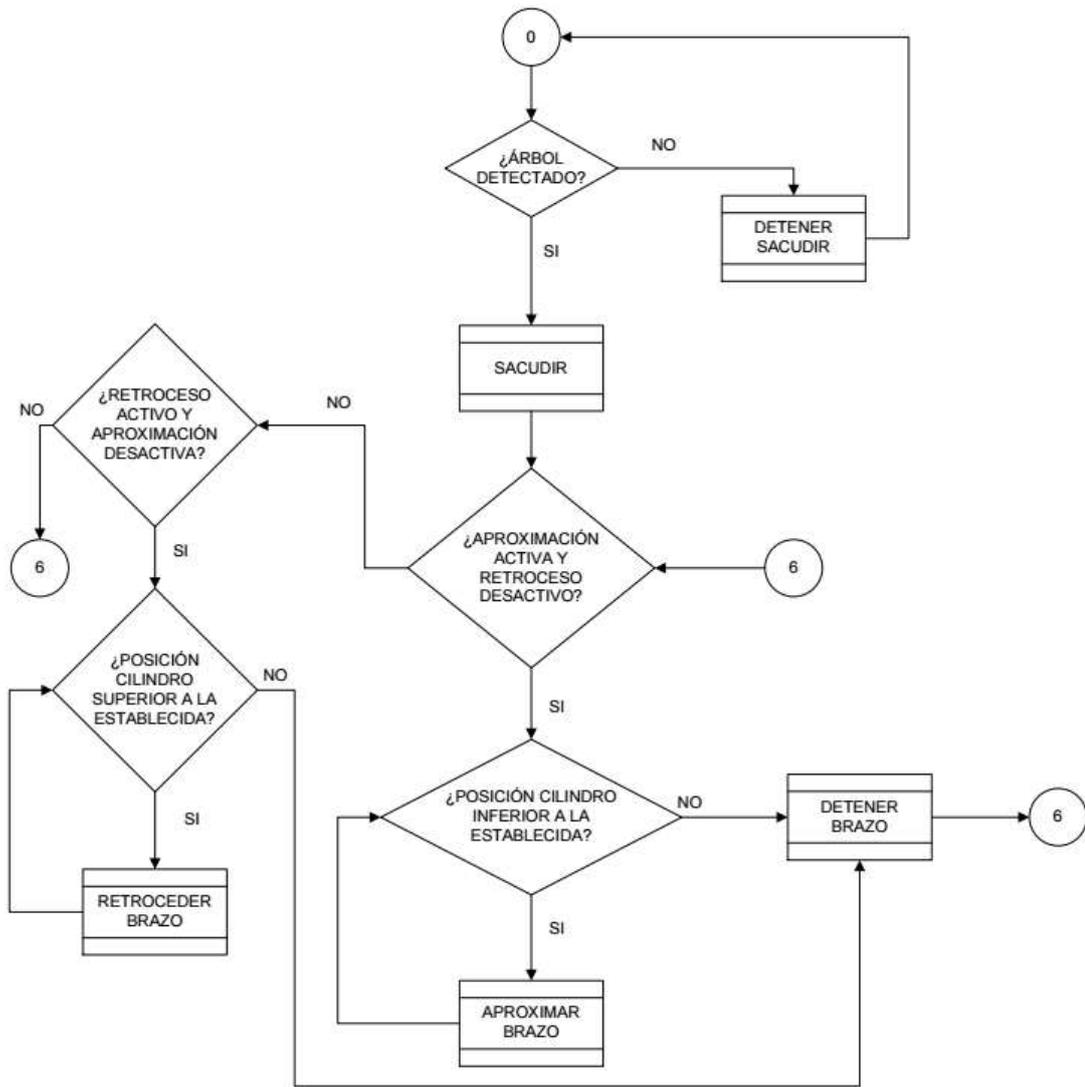


Figura 58. Lógica de control del algoritmo del modo manual para el algoritmo del ensayo de automatización de la aproximación a copa del sistema de derribo

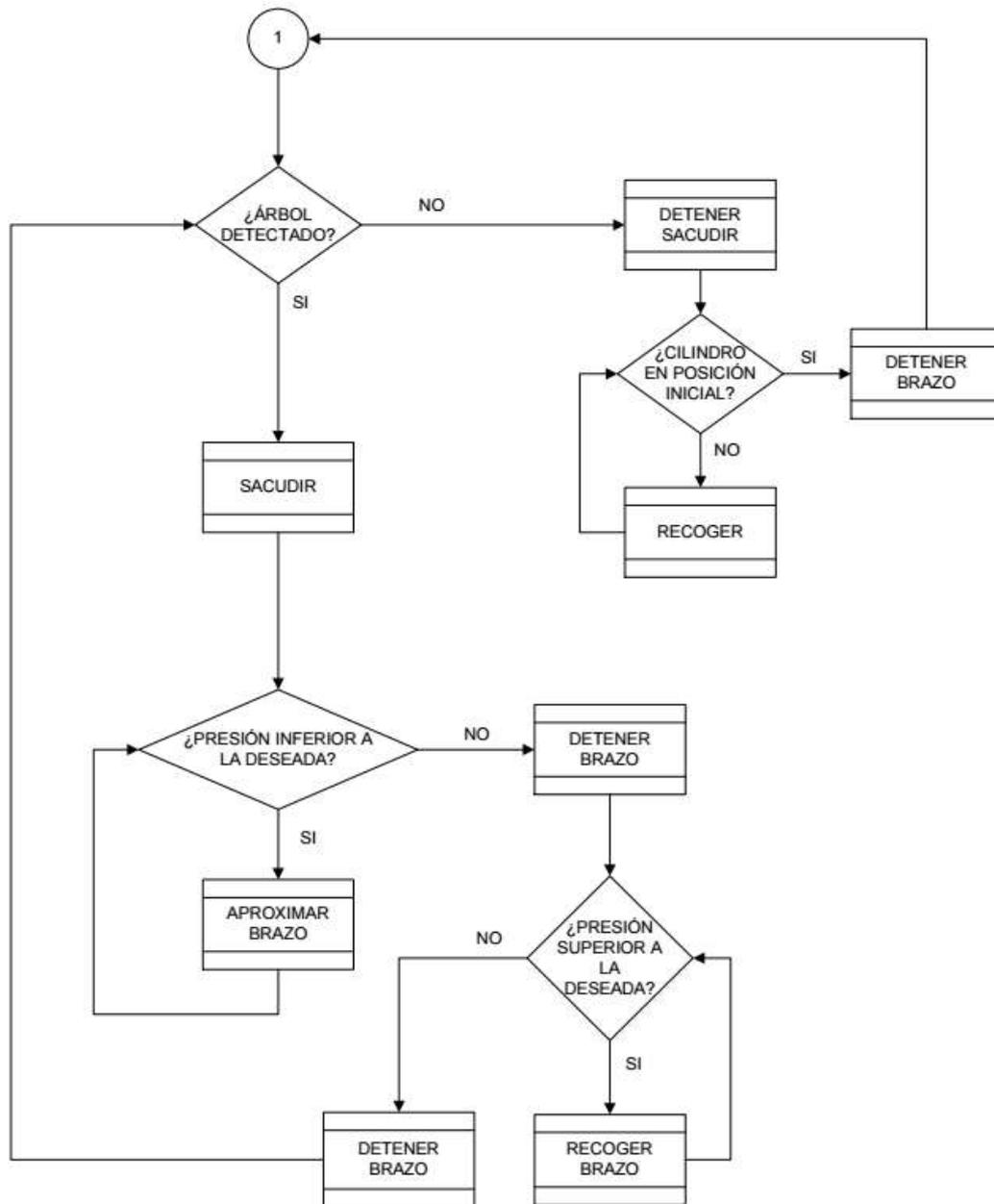


Figura 59. Lógica de control del algoritmo del modo de copiado automático de copa por presión para el algoritmo del ensayo de automatización de la aproximación a copa del sistema de derribo

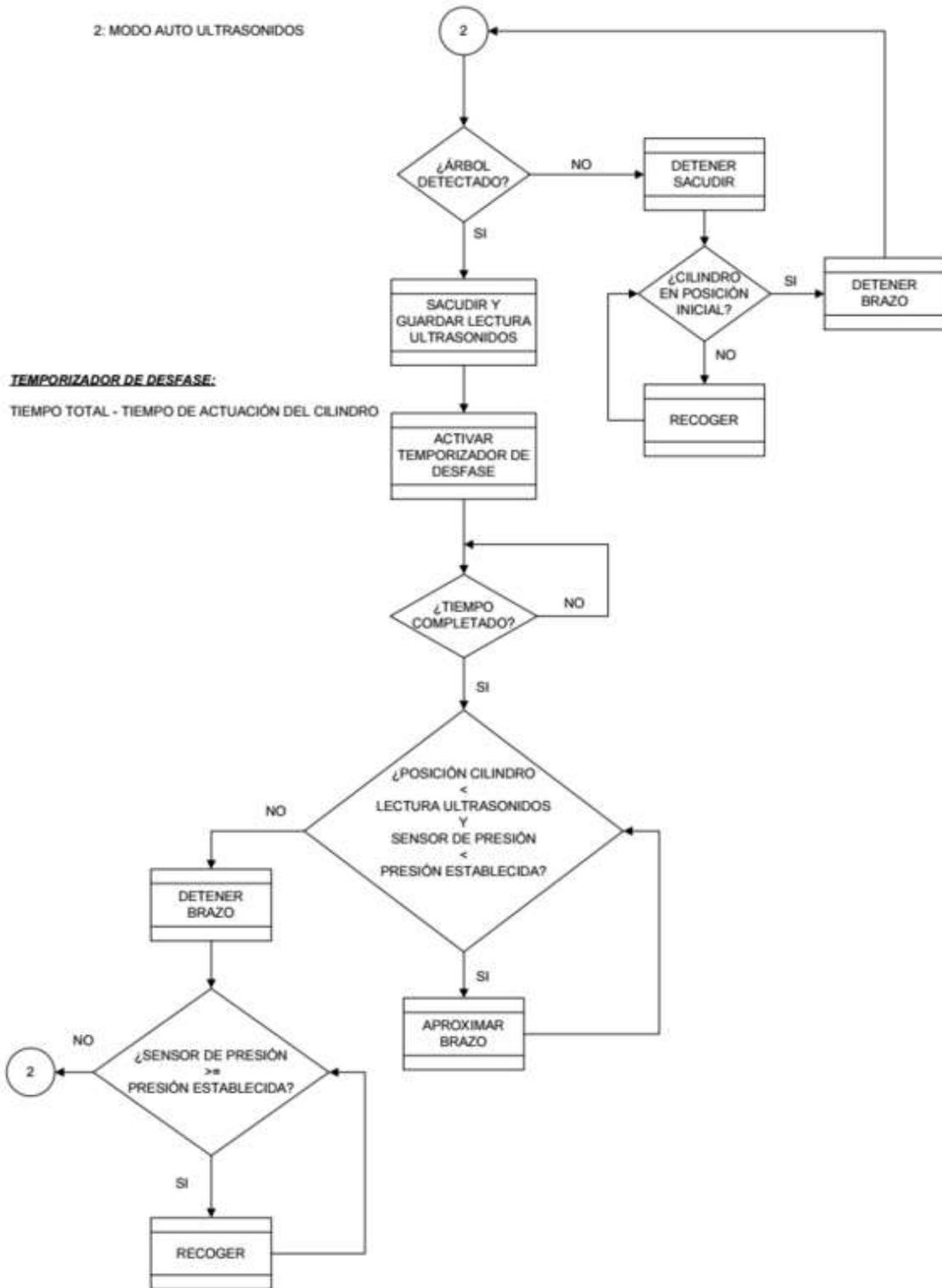


Figura 60. Lógica de control del modo automático distancia para el algoritmo del ensayo de automatización de la aproximación a copa del sistema de derribo

Para el sistema de control se implementó un PLC HMI CR1082 (IFM electronics) que se gobierna desde un display táctil que incluye los distintos menús de navegación en base a los modos de funcionamiento (Figura 61, 62). Dicha pantalla sirve de datalogger de los datos registrados por los sensores implantados. La programación del sistema ha sido realizada a través de entorno de desarrollo CODESYS conforme con el estándar industrial internacional IEC 61131-3.



Figura 61. Visualización de las pantallas desarrolladas para el ensayo de automatización a la aproximación según dos modos de presión y distancia



Figura 62. Visualización pantallas en modo automático de presión y ultrasonidos y selección de umbrales de trabajo

Todos los sensores han ido cableados a un módulo externo de entradas y salidas con comunicación CAN CR2033, que conecta con el micro-controlador y sus señales serán tratadas en el PLC con algoritmos de filtrado y dispersión para disminuir errores y mejorar el comportamiento del prototipo. El módulo para relés y fusibles utilizado es el BasicRelay CR0421 con 10 fusibles de automóvil y 6 relés lógicos. Como salidas del PLC se encuentran las señales por CAN BUS que gobiernan las electroválvulas encargadas del control de los módulos de aproximación a la copa del olivo y la visualización también por medio de comunicación CAN con el display para diagnóstico durante la fase de trabajo del prototipo.

Los sensores y actuadores utilizados para dicho ensayo fueron:

- Sensor distancia entre el módulo de aproximación fijo y la copa (Ultrasonidos) modelo UC6000-30GM-IUR2-V15 de Pepperl Fuchs que tiene un rango de detección de 35 a 600 cm
- Sensor presión situado en el circuito hidráulico del motor de sacudida: modelo SCPT-600-0-02 de Parker que detecta un rango de presión de 0 - 600 bares.
- Sensor posición del cilindro de aproximación (Potenciométrico de hilo) JX-PA-30 de UniMeasure que presenta un rango de recorrido de 0-80 cm

Para determinar los umbrales de distancia y de presión adecuados a los modos automáticos de trabajo, se realizó una calibración previa en taller basada en la variación de dichos parámetros para la aproximación del módulo al árbol con un ajuste de contacto visual (Figura 63).

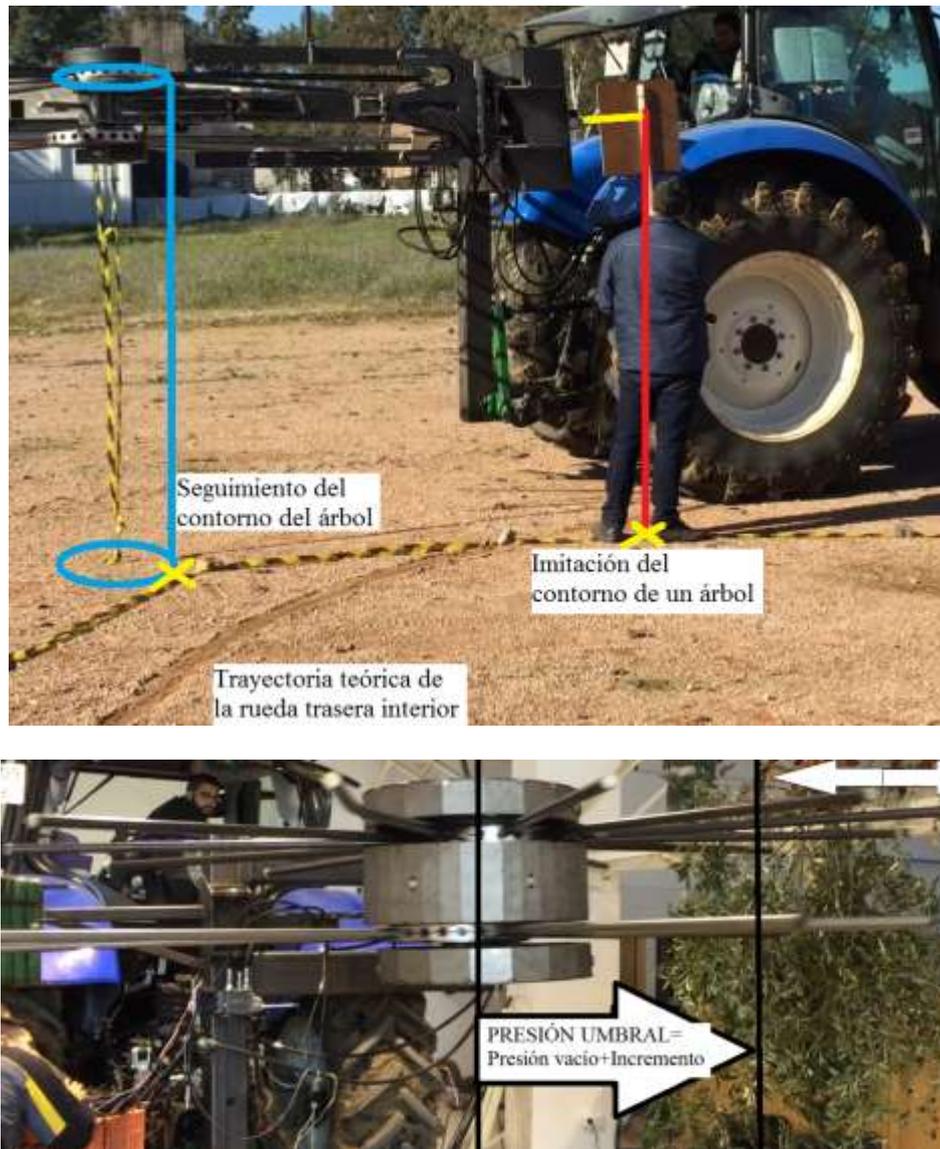


Figura 63. Ensayo de ajuste de los parámetros del modo ultrasonidos (Arriba) y presión (abajo)

4. ANÁLISIS DE DATOS

Con los valores de los parámetros de estudio obtenidos en cada ensayo, se procede a su análisis estadístico, utilizando las técnicas de correlación y regresión junto con los tests de comparación de medidas.

Con la correlación se determina la relación entre variables cuantitativas. Esta prueba es el primer paso para luego poder establecer la fórmula matemática (regresión) que represente la relación y permita estimar el valor de la variable dependiente, sin necesidad de medirla, en función de los valores de las variables independientes.

A menudo se utiliza el modelo de regresión lineal simple incluso cuando se sabe que el modelo es algún otro, o que la estructura verdadera es desconocida. Este

procedimiento es casi siempre adecuado, en especial cuando el rango de la variable independiente es estrecho. De esta forma, el modelo utilizado se transforma en una función de aproximación, de la cual se espera que sea una representación adecuada de la realidad en la región de interés (Walpole y Myers, 1989).

La medida de la asociación lineal entre dos variables se realiza a través del coeficiente de correlación de la población (ρ), que se estima a través del coeficiente de correlación muestral (r) o coeficiente de correlación lineal de Pearson, cuyos valores varían entre -1 y +1, correspondiendo ambos extremos a un ajuste exacto de los datos a una recta. Si $r > 0$ se dice que la correlación es directa o positiva, siendo inversa o negativa en el caso contrario ($r < 0$). Cuando $r = 0$, el ajuste lineal no tiene sentido y las variables no están correlacionadas. Para valores de r próximos a 0 tendremos una correlación débil y para valores próximos a 1 ó -1 la correlación lineal será fuerte.

El valor r^2 se denomina coeficiente de determinación de la muestra y expresa la proporción de la variación total en los valores de la variable dependiente que puede ser explicada por una relación lineal con los valores de la variable independiente.

Con los tests de comparación de medias se analiza si un carácter cualitativo (denominado normalmente “tratamiento”), que presente varias modalidades, afecta de forma significativa a un carácter cuantitativo.

Si disponemos de “ p ” muestras aleatorias diferentes, cada una correspondiente a una modalidad del tratamiento, cuyas medias muestrales X_1, X_2, \dots, X_p son, en general, diferentes, se trata de contrastar la hipótesis nula, $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_p$, donde $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p$ son las medias poblacionales, frente a la hipótesis alternativa, $H_1: \mu_i \neq \mu_j$, para algún par de poblaciones i, j .

Si se acepta H_0 se da por supuesto que las diferencias observadas en los valores de las medias muestrales no son significativas y se pueden deber al azar, en consecuencia no hay razón para pensar que los diferentes tratamientos tengan efecto sobre la variable cuantitativa. Si se rechaza H_0 , consideramos que las diferencias entre X_1, X_2, \dots, X_p son significativas, esto es, demasiado grandes para que se deban al azar y, por tanto, consideramos que los tratamientos tienen efecto significativo sobre la variable cuantitativa. En este caso, se continúa el análisis para determinar qué par o pares de poblaciones tienen media población diferente.

La prueba más utilizada para comparar p -medias es el Análisis de la Varianza con un solo factor (conocido como ANOVA). Se trata de una prueba paramétrica que

supone el cumplimiento de tres hipótesis llamadas condiciones paramétricas del Análisis de la Varianza.

- 1) Las poblaciones de donde proceden las muestras debe ser normales (Hipótesis de Normalidad).
- 2) Igualdad de varianzas de las poblaciones (Hipótesis de homocedasticidad).
- 3) Muestras deben haber sido elegidas al azar (Hipótesis de Independencia).

Si existen dudas razonables sobre el incumplimiento de las hipótesis se debe aplicar un test no paramétrico. Estas pruebas tienen la ventaja de no requerir prácticamente condiciones para su aplicación, pero por el contrario son menos sensibles para detectar efectos significativos.

No obstante, las pruebas no paramétricas son de distribución libre y, en consecuencia, se pueden aplicar aun cuando se verifiquen las hipótesis del ANOVA. Esto es, la posibilidad de estudio mediante Análisis de la Varianza no excluye el uso de tests no paramétricos.

También podemos analizar la influencia de varios factores sobre la variable cuantitativa, teniendo entonces el Análisis de la Varianza Multifactorial. Se puede suponer que cada factor actúa independientemente de los otros, es decir, que el efecto producido por sus niveles no depende de los niveles de los demás factores, por lo que en este caso se dice que el modelo es de efectos aditivos. En caso contrario el modelo presenta interacción, recibiendo los factores el nombre de efectos de la interacción.

El análisis estadístico se ha realizado con el programa SPSS que incorpora gran variedad de técnicas en los diferentes procedimientos que lo forman: análisis explorativo, contrastes sobre medias, ANOVA de un factor, ANOVA factorial, correlación, regresión lineal y curvilínea, análisis factorial y discriminante, pruebas no paramétricas, etc. Todos los procedimientos así como su realización práctica vienen descritos por Pardo y Ruiz (2002).

CAPÍTULO V. RESULTADOS

1.1 Evaluación de los sistemas de recolección para olivar tradicional.

El ensayo de los diferentes sistemas de recolección mostró resultados variables, según los parámetros de estudio considerados, para los árboles en plantación tradicional.

1.1.1 Eficiencia de derribo

La eficiencia de derribo fue muy elevada en los sistemas donde el operario realiza una recolección manual (MH) o con sistemas manuales de ayuda mecánica con vibrador de ramas (BS) o sacudidor de ramas (SC). (Figura 64). En estos casos, los máximos valores de eficiencia de derribo fueron próximos al 98 %. Las técnicas de recolección mecanizada con vibrador de troncos (TS) o sacudidor de copa (CS) reportaron menores valores de eficiencia de derribo. El vibrador de troncos obtuvo un valor medio de eficiencia de derribo del 90,5 %. Los frutos sin derribar con este sistema quedaron distribuidos principalmente en la parte exterior de la copa del árbol ($8,8 \pm 2,2$ %). La variación de los resultados con el vibrador de troncos fue reducida debido a la homogeneidad de los árboles en la plantación de olivar tradicional. Por otro lado, el sacudidor de copa obtuvo un valor medio de eficiencia de derribo del 78,8 %. Los frutos que permanecieron en el árbol después de la recolección estuvieron localizados en la parte interna de la copa ($7,2 \pm 2,5$ %) y sobre ramas externas que no fueron alcanzadas por las varas ($14,0 \pm 5,1$ %). La eficiencia de derribo fue similar a la recolección manual en aquellas zonas del árbol donde las varas contactaron con la copa. Se observan diferencias significativas en la eficiencia de derribo entre los sistemas manuales o de ayuda manual (MH, BS, SC) con los sistemas de recolección masiva (TS, CS). A su vez, dentro de los sistemas masivos existen también diferencias significativas entre la eficiencia de derribo entre los vibradores de troncos y los sacudidores de copa.

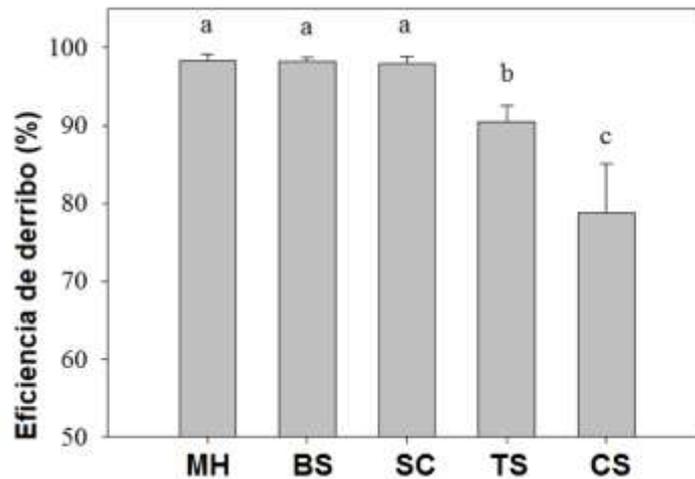


Figura 64. Eficiencia de derribo según los sistemas de recolección utilizados en el ensayo con olivar tradicional. MH: recolección manual con vareo, BS: vibrador de ramas, SC: sacudidor de ramas, TS: vibrador de troncos, CS: sacudidor de copa. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$ HSD de Duncan) entre sistemas de recolección

Los resultados obtenidos han mostrado que ningún sistema de recolección ha llegado a recoger el 100 % de los frutos. Con sistemas manuales o de ayuda manual mecanizados quedan un valor medio del 1,8 % de frutos sobre el árbol que no son cosechados. En cultivos de secano, como el olivar tradicional, estos valores son habituales para la recolección manual ya que la producción de frutos por unidad de superficie es reducida. Estos valores son menores que los obtenidos con los sistemas de recolección masivos como vibrador de troncos y sacudidor de copa. Comparando con otros cultivos más avanzados en recolección mecanizada, estos valores son inferiores a los obtenidos por la recolección mecanizada en cítricos, usando favorecedores de abscisión, con vibrador de troncos (4,6%) o con sacudidor de copa (3,1%) (Burns, Buker & Rokka, 2005). Se observa que cualquier sistema de derribo masivo deja un mayor número de aceitunas en el árbol que los sistemas manuales que realizan un apure selectivo. Sin embargo, el fruto restante puede dejarse sin recolectar por las ventajas de tiempo y reducción de coste de la recolección.

El sacudidor de copa y vibrador de troncos, son sistemas de recolección masivos que permiten realizar un derribo y recogida simultánea en plantaciones modernas de olivar (Ravetti & Robb, 2010) ya que ambos presentan la posibilidad de incorporación de sistemas de recepción. Sin embargo, en el olivar tradicional, la incorporación de una superficie de interceptación se dificulta en el caso de los vibradores de troncos.

1.1.2 Daños

El daño porcentual (kg daños por cada 100 kg de fruto derribado) refleja la severidad de los sistemas de recolección a través de la rotura y derribo de ramas primarias, brotes y hojas. (Figura 65). El sistema de recolección manual con vareo es la técnica más agresiva para la recolección del árbol representando un valor medio de 8,5 % de daños en árbol sobre el peso fresco total de fruto derribado. Los sistemas manuales de ayuda mecánica junto con el vibrador de troncos presentaron similar producción de daños, con un valor medio de $4,3 \pm 1,7$ %. El vibrador de troncos, sacudidor de copa junto con el sacudidor de ramas alcanzaron los menores porcentajes de producción de daños ($3,4 \pm 1,6$ %). El sacudidor de copa realizó el proceso de recolección derribando sólo un tercio de daños producido por el sistema manual. Se observan diferencias significativas entre el sistema manual con el resto de sistemas debido a su severidad. Sin embargo, estas diferencias son menores en el caso de sistemas mecanizadas aunque se si observa una diferencia significativa en la generación de daños con el sacudidor de copa.

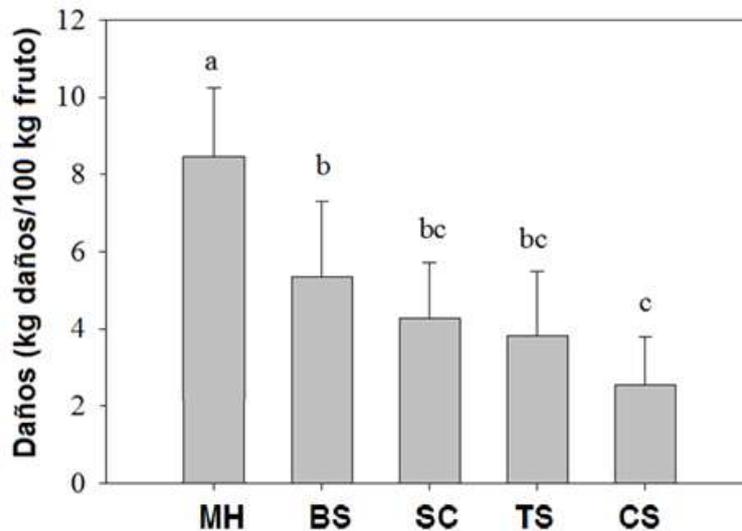


Figura 65. Daños producidos por los diferentes sistemas de recolección usados en olivar tradicional. MH: recolección manual con vareo, BS: vibrador de ramas, SC: sacudidor de ramas, TS: vibrador de troncos, CS: sacudidor de copa. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$ HSD de Duncan) entre sistemas de recolección

La daños producidos en el árbol han sido especialmente importantes el vareo manual estando relacionados directamente con la obtención de elevados valores de eficiencia de derribo y elevados valores de aceleración (Castro-García, Blanco-Roldán & Gil-Ribes, 2011). Sin embargo, los sistemas de recolección masivos que permiten la recolección mecanizada del cultivo (CS y TS), han generado daños de una manera más reducida que

el resto de sistemas. Resultados inversos han sido obtenidos en la recolección de cítricos, donde el empleo del sacudidor de copa frente a la recolección manual incrementa los daños desde un 20 a un 250% (Spann & Danyluk, 2010). Especialmente, el sistema de sacudidor de copa muestra un resultado prometedor para la recolección del olivar tradicional.

1.1.3 Vibración

Cada sistema de recolección mostró un patrón característico de aceleración en el árbol con cierta singularidad (Figura 66).

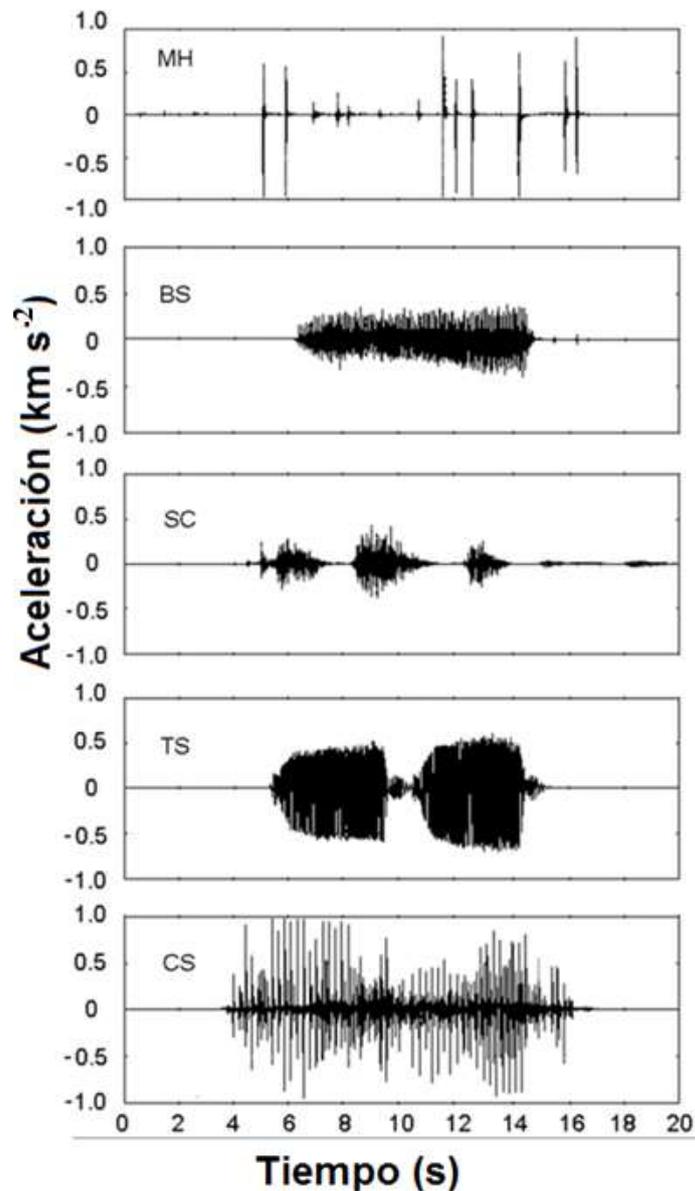


Figura 66. Ejemplos de señales de aceleración temporal en ramas generados por cada sistema de recolección. MH: recolección manual con vareo, BS: vibrador de ramas, SC: sacudidor de ramas, TS: vibrador de troncos, CS: sacudidor de copa

La medida de la vibración en las ramas fructíferas mostró una amplia variación en la combinación de parámetros en frecuencia y aceleración que se resumen en la Tabla para cada sistema de recolección. El sistema manual ha producido una evolución temporal de vibración resultado del impacto de la vara contra la copa del árbol. Estos impactos se han caracterizado por una elevada aceleración pico de $676 \pm 449 \text{ m s}^{-2}$ y una duración media de $0,06 \pm 0,03 \text{ s}$ ($N=63$). El resto de técnicas de recolección han realizado una vibración de la copa en rangos de frecuencia estables entre repeticiones. Los sistemas que aplican el contacto directo en la copa (CS y SC) produjeron valores medios reducidos de aceleración eficaz ($110,2$ y $71,3 \text{ m s}^{-2}$) y de frecuencia de vibración ($4,6$ y $13,5 \text{ Hz}$). Sin embargo, los sistemas que aplican una vibración forzada en la estructura del árbol (TS y BS) proporcionaron una vibración de mayor frecuencia ($16,6$ y $24,2 \text{ Hz}$) y elevados valores de aceleración resultante ($193,2$ y $343,1 \text{ m s}^{-2}$).

Tabla 13. Parámetros de la vibración medidos en ramas fructíferas olivar tradicional según los diferentes sistemas de recolección. Valores muestran la media \pm desviación típica. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$ HSD de Duncan) entre sistemas de recolección.

Sistema de recolección	Frecuencia (Hz)	Aceleración eficaz (m s^{-2})
Manual (MH)	n.a.	$676 \pm 449^*$
Vibrador de ramas (BS)	$16,6 \pm 1,3 \text{ c}$	$193,2 \pm 53,9 \text{ b}$
Sacudidor de ramas (SC)	$13,5 \pm 0,3 \text{ b}$	$71,3 \pm 35,1 \text{ d}$
Vibrador de tronco (TS)	$24,2 \pm 1,0 \text{ a}$	$343,1 \pm 138,0 \text{ a}$
Sacudidor de copa (SC)	$4,6 \pm 0,2 \text{ d}$	$110,2 \pm 51,0 \text{ c}$

* Valor pico

La distribución del tiempo en que la rama fructífera está vibrando bajo diferentes valores de aceleración ha permitido diferenciar dos patrones de vibración entre sistemas (Figura 67). Por un lado, los sistemas que aplican la vibración sobre la estructura del árbol (rama o tronco) permiten que las ramas fructíferas experimenten un amplio porcentaje del tiempo sometidas a elevados valores de aceleraciones resultantes. El vibrador de ramas produjo un patrón de vibración donde el 85 % del tiempo la rama estuvo bajo vibración tuvo valores de aceleración de hasta 302 m s^{-2} , mientras que el vibrador de troncos se amplió a valores de aceleración de hasta $549,8 \text{ m s}^{-2}$. Por el contrario, los sistemas que aplican la vibración sobre la copa del árbol realizaron el mayor tiempo de vibración en valores bajos de aceleración eficaz. Las ramas fructíferas fueron sometidas el 85 % del tiempo de la vibración en niveles hasta $141,2$ y $187,8 \text{ m s}^{-2}$ para el sacudidor de ramas y sacudidor de copa respectivamente. Todo esto lleva a idea

de que existen otros factores intrínsecos al derribo de fruto como puede ser los impactos, que provocan aceleraciones eficaces muy altas en un tiempo muy reducido.

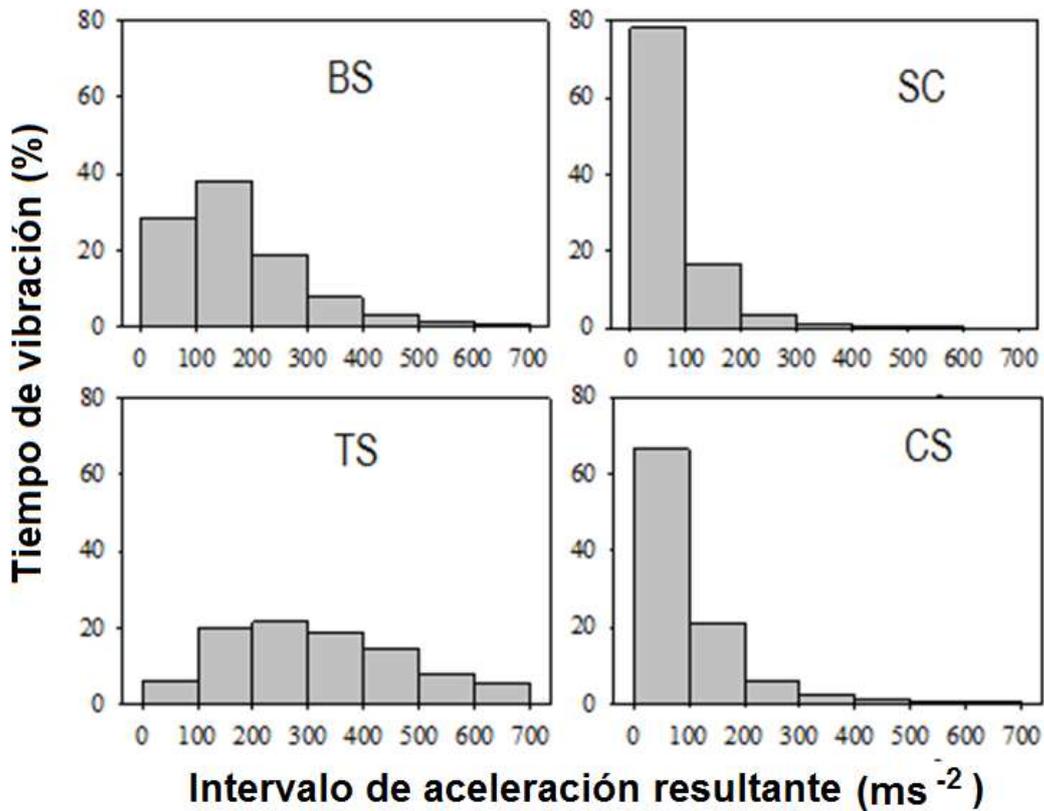


Figura 67. Distribución del tiempo acumulado en función de intervalos de aceleración eficaz según diferentes sistemas de recolección

El proceso de desprendimiento mecánico de los frutos del árbol es un fenómeno complejo que ha sido analizado por diversos autores. Todos ellos coinciden en que ciertas combinaciones de frecuencia y amplitud de la vibración forzada son determinantes (Aristizábal, Oliveros & Álvarez, 2003). Estas diferencias se acentúan cuando la vibración es aplicada en zonas alejadas del fruto y debe transmitirse hasta los frutos por la estructura del árbol (Castro-García, Blanco-Roldán, Gil-Ribes & Agüera-Vega, 2008; Du, Chen, Zhang, Scharf & Whitting, 2012). El sistema manual y los de ayuda manual mecanizados han mostrado patrones de vibración muy diferentes, pero todos ellos han obtenido elevados valores de eficiencia de derribo altos al ser aplicados en zonas cercanas al fruto. El sistema de vareo manual provoca impactos de alto valor máximo de aceleración y amplitud localizados en la copa en zonas cercanas a los frutos que rápidamente son amortiguados. El sacudidor de ramas produce un patrón que concentra el tiempo de vibración de la rama en bajos valores de aceleración resultante. El vibrador de ramas extiende el tiempo de la vibración de la rama en elevadas valores

de aceleración resultante. A pesar de estas amplias diferencias, los sistemas han generado sobre los frutos otros fenómenos inerciales, de momentos torsores y de fatiga que pueden ser la razón dominante para el desprendimiento de los frutos. La aplicación de elevados niveles de aceleración en zonas cercana al fruto ha desempeñado un papel dominante en el desprendimiento del fruto, haciendo que estos sistemas obtengan elevados valores de eficiencia de derribo.

En la actualidad, el empleo de sistema de ayuda mecanizada se combina con el vareo manual para la recolección del olivar de aceite para incrementar el derribo y el rendimiento de la operación. El empleo de vibrador de ramas de forma convierte a las variables peso del fruto y fuerza de retención como dominantes en el proceso de derribo (Kouraba, Gil-Ribes, Blanco-Roldán, Jaime-Revuelta & Barranco-Navero, 2004). El incremento de la frecuencia de la vibración y el empleo de favorecedores de la abscisión son formas de incrementar la eficiencia de derribo con vibrador de ramas sin emplear un sistema de vareo manual (Sessiz & Özcan, 2006). En otros cultivos con similares problemas de recolección, como los cítricos, donde no se emplea el vareo complementario, la configuración de los parámetros de la vibración de los vibradores de ramas son determinantes en la obtención de elevadas eficiencias de derribo (Torregrosa, Ortí, Martín, Gil & Ortíz, 2009).

Los sistemas vibradores de troncos y sacudidores de copa aplican un patrón de vibración con parámetros muy diferentes sobre la copa o sobre la estructura principal del árbol. El vibrador de troncos, con alta frecuencia, baja amplitud y una distribución de aceleración resultante en un amplio rango de valores, ha obtenido una elevada eficiencia de derribo. Algunos autores han obtenido similares valores comprendidos en el intervalo de 72 al 96 % en olivar tradicional de 100 árboles ha⁻¹ (Dias, Peça & Pinheiro, 2012). Sin embargo, otros autores han reportado resultados medios menores (75,9 %) en plantaciones intensivas de 357 árboles ha⁻¹ (Ravetti & Robb, 2010). Los frutos sin derribar con el vibrador de troncos se han localizado principalmente en las ramas externas, donde las diferentes orientaciones de las ramas con el tronco provocan diferentes valores en la trasmisión de la vibración hasta los frutos. En cambio, la transmisión de la vibración es más efectiva en las ramas interiores, más verticales, derribando prácticamente la totalidad de los frutos (Du, Chen, Zhang, Scharf & Whitting, 2012). Además, para los vibradores de troncos el derribo de los frutos se ve altamente condicionado por los valores de fuerza de retención de los frutos y por su peso, relacionados con la variedad y el momento de recolección o por la imposibilidad

de usarse en plantaciones con grandes troncos, donde solamente es posible la vibración de ramas principales. Por otro lado, el sacudidor de copa ha mostrado un resultado interesante en el olivar tradicional presentando la ventaja mostrada por los sistemas manuales de ayuda mecanizada, al localizar la vibración sobre las ramas fructíferas. En este sistema de recolección, la fuerza de retención de los frutos y su peso ha presentado poca relación con la eficiencia de derribo (Gil-Ribes *et al.*, 2011). Además, el sacudidor de copa permite realizar una recolección continua del árbol al localizar la caída del fruto en zonas específicas. Sin embargo, la eficiencia de derribo en olivar tradicional ha estado limitada por la accesibilidad de las varas a la copa del árbol. La parte interior de la copa resulta inaccesible a este sistema de recolección. Mientras que la parte exterior de la copa presenta formas irregulares donde se localizan los frutos. En olivar intensivo, los sistemas sacudidores de copa pueden alcanzar valores de eficiencia de derribo del 90.9% al asegurar el contacto de las varas con la copa (Ravetti & Robb, 2010). La adaptación e implantación de este sistema para recolección continua del olivar tradicional requiere de podas que reduzcan la fructificación interior de los árboles y las irregularidades exteriores de las copas. No obstante, el sistema de sacudidor de copa se presenta con una posible alternativa interesante al presentar una eficiencia de derribo considerable a pesar de la falta de adaptación, un nivel de daño reducido, y un patrón de vibración adecuado que a su vez posibilita la interceptación simultánea del fruto al no permitir una recolección continua en el contorno del árbol.

1.2 Caracterización de las plantaciones y árboles de olivar tradicional

1.2.1 Caracterización geométrica del árbol

Se obtuvo un modelo digital del terreno (Figura 68) sin pérdidas considerables en la composición de imágenes mediante el algoritmo de reconstrucción con las fotografías obtenidas con el UAS usado. Las geometrías de las copas de los árboles mostraban buen nivel de detalle en su parte alta. Sin embargo, las partes bajas de la copa no se pudieron recrear en el modelo debido a la estructura de los árboles con sus ramas pendular y la altura programada de vuelo con el UAS, que impidió fotografiar los detalles inferiores de los árboles.



Figura 68. Modelo digital del terreno obtenido con técnicas fotogramétricas con vuelo UAS

El análisis del modelo virtual permitió estudiar las pendientes existentes en las plantaciones estudiadas a través del modelo digital obtenido, mediante diferencias de alturas topográficas de los diferentes puntos en el modelo digital.

Concretamente, las dos plantaciones estudiadas mostraron una gran variabilidad en la orografía del terreno con diversidad de cárcavas en las terminaciones de líneas de pendiente. Dichas pendientes tuvieron diferentes inclinaciones siendo de hasta 12% en la finca de Fuente la Rosa y 4% en Torreblanca, sin mostrarse ningún patrón común en la distribución de dichas pendientes.

Esta diversidad de orografía encontrada en tan sólo dos plantaciones plantea la necesidad de que las máquinas alberguen sistemas de nivelación de al menos estos niveles de inclinación para mantener estables sus componentes y evitar el vuelco. Así, niveles de adaptación hasta 15% se consideran razonables para trabajos en plantaciones de olivar tradicional mecanizable. Además, estos sistemas de nivelación deberían ser incorporados en varias partes de las máquinas si la longitud de las mismas fuera elevada puesto que pueden existir zonas que tengan distintos planos de apoyo. Este efecto se ve acrecentado si se consideran trayectorias de trabajo en círculo alrededor de los árboles, al implicar cambiar la nivelación de la máquina en transitorios de pendiente lateral positiva y negativa con velocidad de avance no superiores a $1,5 \text{ km h}^{-1}$.

De los modelos digitales se obtuvo una ortofotografía de $1\,326 \times 1\,074 \text{ px}$ con resolución de $0,035 \text{ m px}^{-1}$, la cual obtuvo un segmentado muy bueno debido a la homogeneidad de los suelos de la finca (Figura 69).

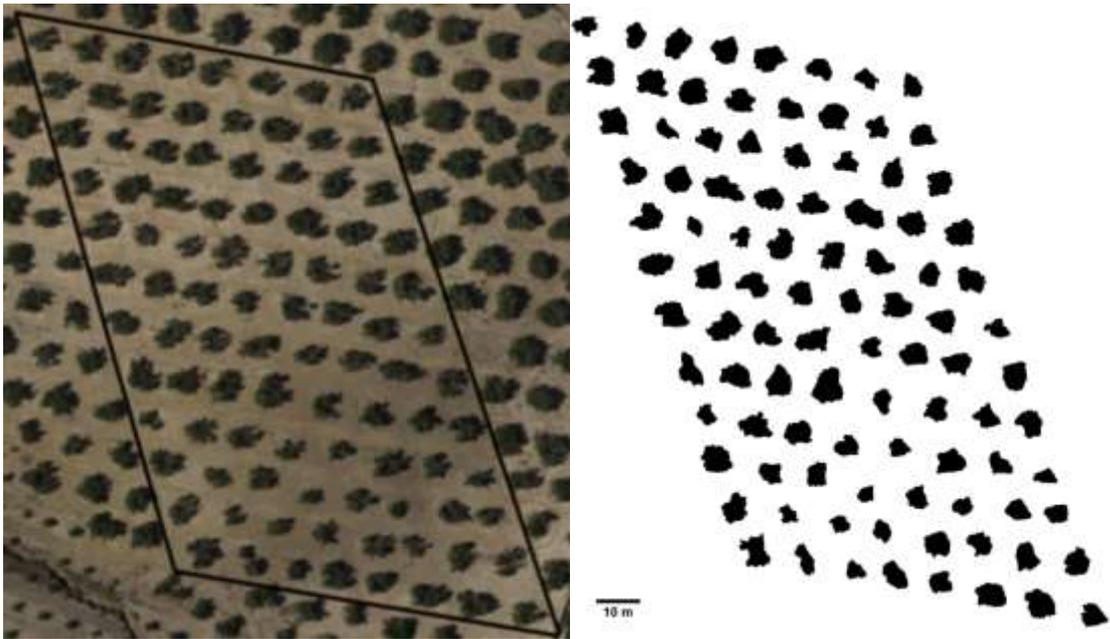


Figura 69. Ortofotografía en la finca Fuente la Rosa en olivar tradicional (izquierda) e imagen segmentada y escalada (derecha)

Sobre las ortofotografías se pudieron realizar medidas reales de parámetros de las plantaciones con un nivel aceptable de calidad y precisión para caracterizar las plantaciones (Figura 70). Se midieron los espacios entre árboles para calcular los marcos típicos en las plantaciones. La finca Torreblanca mostró marcos cuadrados muy regulares, con distancia entre las líneas principales de $11,4\pm 0,8$ m y ángulos entre líneas de $3\pm 2^\circ$. La finca Fuente La Rosa mostró sus árboles plantados en configuración en tresbolillo, distancia entre líneas principales de $10,8\pm 1,1$ m y ángulos entre líneas de $58\pm 6^\circ$.

Suponiendo la posibilidad de que puedan existir árboles con 8 m de diámetro de copas, se obtiene que existen espacios entre árboles del orden de 3 m para que las máquinas puedan transitar por las calles de trabajo sin provocar roturas, por lo que se debe fijar esta longitud como limitante de ancho de trabajo del volumen de la máquina.



Figura 70. Vistas de plantaciones de olivar tradicional obtenidas por técnicas de fotogrametría aérea

La caracterización con los métodos fotogramétricos lateral y aéreo, junto con el método tradicional con jalón, ha permitido la determinación de los parámetros geométricos mostrados en la Tabla 14. Los datos fueron obtenidos en los ensayos realizados en la finca Fuente la Rosa.

Tabla 14. Parámetros geométricos de la copa de olivos tradicionales mediante el método tradicional con jalón y fotogrametría lateral y aérea. Valores muestran la media± desviación típica

Parámetro	Método manual con jalón	Fotogrametría lateral	Fotogrametría aérea
Diámetro mayor (m)	7,29±0,98	6,38±0,98	6,27±1,13
Diámetro menor (m)	6,32±0,9	5,28±0,94	5,92±0,90
Altura de copa (m)	3,26±0,32*	3,93±0,39*	-
Área (m ²)	36,34±8,65**	38,68±12,68	25,25±6,85

*Calculada de la diferencia entre la altura total del árbol y su rama más baja

**Calculada según el área de una elipse

De la comparativa de los métodos, se observa que la medida manual da mayores valores de diámetros con respecto a la fotogrametría lateral debido a los efectos de la apertura del triángulo de visión desde un punto alejado, que se incrementa por las profundidades de las copas, y sin embargo, da menores valores de altura de copa. Este efecto sobre el cálculo del área hace que se compense e equilibre los errores visuales con resultados de similitud cercana. Esto supone que el método de estimación de los

parámetros del árbol mediante jalón es un método que puede suponer relativa utilidad para algunos usos teniendo en cuenta la facilidad y precio del mismo.

El ajuste a las geometrías parametrizadas con respecto al contorno original (Figura 71) calculadas según el programa de análisis ImageJ se muestra en las Tabla 15 donde se pueden observar los principales parámetros del contorno aéreo y sus desviaciones respecto al mismo.



Figura 71. Imagen segmentada y procesado de imagen mediante la técnica de análisis de partículas y generación de elipses y círculos

Tabla 15. Valores dimensionales y geométricos con ajustes geométricos de los perfiles aéreos de los olivos tradicionales. Valores muestran la media± desviación típica

Aproximación	Parámetro *	Desviación geométrica con respecto al contorno real *
Contorno real	Área (m ²)	25,25±6,85
	D1 (m)	6,27±1,13
	D2 (m)	5,92±0,90
Ajuste a círculo	Diámetro (m)	6,29±0,76
	Diámetro mayor (m)	6,41±1,03
Ajuste a elipse	Diámetro menor (m)	4,94±0,78
	Ángulo (grad)	105,45±54,40
Ajuste Feret	Diámetro m)	7,03±1,11
	Ángulo (grad)	116,69±50,37

*Definidos en el apartado 3.2.2.1 de esta tesis

Los ajustes geométricos calculados con respecto al contorno aéreo muestran que existe una aproximación muy buena al perfil circular y elíptico en comparación con su área original, siendo en este caso la aproximación por Feret la que presenta mayor

desviación. Estos datos arrojan la dificultad que requeriría una adaptación del árbol hacia perfiles regulares siendo necesarios podas muy radicales que bajarían la producción de árbol a años posteriores, o bien, podas más ligeras y más prolongadas en el tiempo. En cualquier caso la adaptación hacia un perfil circular representa menores desviaciones geométricas, siendo además esta forma, la más idónea para trabajos de recolección alrededor del árbol.

Los contornos aéreos de los árboles medidos presentan una circularidad de $0,65 \pm 0,06$ lo que indican que son perfiles muy irregulares que no pueden ser fácilmente copiados por una máquina mediante una trayectoria circular. Para ello, la máquina debe disponer de una buena maniobrabilidad para adaptarse a estas altas desviaciones.

Si se calcula el volumen de la copa del árbol medio con los diferentes métodos (Tabla 16) se obtiene que existen diferencias según el uso de los distintos métodos. Se considera que la elipsoide más ajustada sería la correspondiente al ajuste de la elipse aérea con estimación de la altura de copa con fotogrametría lateral, pues sus diámetros no se ven afectados por la dirección de la calle principal donde se han tomado las fotografías y la altura en fotografía no tiene errores de visualización como en el método manual.

Tabla 16. Volúmenes de copa calculados según la aproximación a una elipsoide, con las medidas obtenidas de los diferentes métodos usados

Altura según	Diámetros según	Volumen (m ³)
Método manual con jalón	Método manual con jalón	78,61
Fotogrametría lateral	Fotogrametría lateral	69,28
Método manual con jalón	Fotogrametría aérea	67,49
	<i>Aproximación círculo</i>	
	<i>Aproximación elipse</i>	
Fotogrametría lateral	<i>Aproximación rectángulo</i>	63,32
	Fotogrametría aérea	81,37
	<i>Aproximación círculo</i>	
	<i>Aproximación elipse</i>	
<i>Aproximación rectángulo</i>	76,34	

Si se separan los perfiles laterales de los árboles estudiados (Figura 72) y se realiza una sectorización por cuadrantes de 0,5 m se puede realizar una estimación de ciertos parámetros del árbol mostrados en la Tabla 17 según el método de fotogrametría lateral.

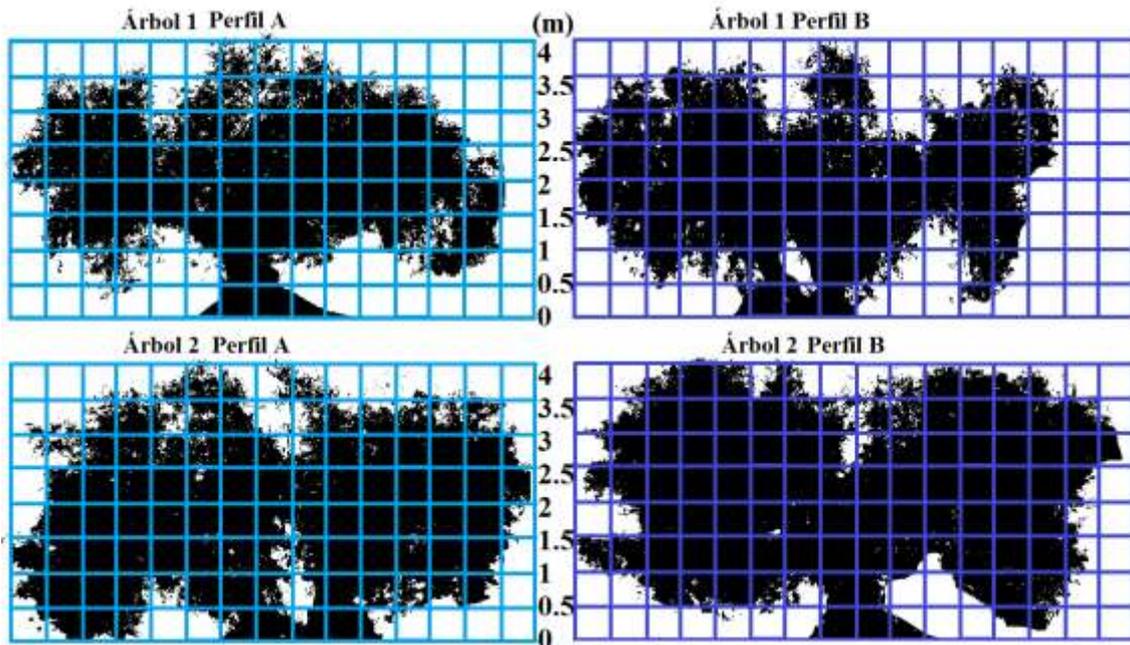


Figura 72. Ejemplos de dos perfiles segmentados de dos árboles tradicionales con una malla de sectorización de 0,5x0,5m

Tabla 17. Parámetros medios de la copa del árbol en función de la altura con respecto al suelo

Altura (m)	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5
Porcentaje de Follaje	6,04	9,90	16,27	16,93	17,04	16,13	12,98	4,40	0,30
Diámetro menor (m)	4,15	5,95	6,60	6,60	6,75	6,65	6,20	5,40	1,45
Diámetro mayor (m)	7,85	7,80	8,00	8,20	8,30	8,30	8,20	6,30	0,05

Estos valores permiten obtener conclusiones interesantes a la hora del dimensionamiento del sistema de recolección basado en sacudidores:

A partir de 1 m del suelo y hasta 3,5 m se encuentra la mayor cantidad de porcentaje del follaje de la copa. Esto indica que dicha zona de copa de 2,5 debería ser sacudida íntegramente albergando sistemas de vareo en toda su superficie, e indicando un dimensionamiento aproximado del cabeza del vareo.

Existe un número elevado de ramas bajas que cuelgan a menos de 1m con respecto al suelo. Dichas ramas presentan una estructura pendular y flexible, no transmite bien la

sacudida debido a su falta de rigidez, pero permite que puedan ser levantadas por cualquier elemento para poder ser sacudidas a un nivel superior donde puedan existir sistemas de vareo. No obstante, sería conveniente reducir la altura de dichas bajeras para facilitar la recolección con elementos de interceptación por debajo de los dispositivos de derribo.

A partir de 4 m de altura es innecesario llegar con un sistema de derribo, pudiendo reducirse a 3,5 m el cabezal de sacudida si se tienen en cuenta que esta zona representa una estructura de ramas muy rígidas y verticales con una mejor transferencia de la vibración.

Si se toma en cuenta los diámetros de los árboles medidos, se observa el diámetro medio que un árbol puede tener es 6,5 m por lo que posicionando sus troncos en su centro geométrico, es necesario conseguir al menos una penetración de más de 3 m para alcanzar a la totalidad del fruto. Sin embargo, considerando que el volumen de un cilindro de 1 m de diámetro posicionado en el exterior del árbol no tienen una cantidad de fruto representativa, la capacidad de aproximación puede reducirse a 2,5 m desde el exterior de las ramas hacia el interior en que debe de realizarse la sacudida. Si además, se considera que es posible presionar la copa del árbol en torno a 0,5 m hacia su interior sin producir roturas, queda una distancia de 2 m de sacudida. Finalmente, si se considera que puede existir una tasa de transferencia de vibración de en torno al 40%, según resultados de ensayos anteriores con los sistemas sacudidores de copa, se extrapola que con una penetración mínima de aproximadamente 1,4 m se podría alcanzar a la gran parte de las copas de los árboles. Este dato muestra la longitud orientativa que han de tener las varas del sistema de derribo utilizado.

La aproximación a la copa puede realizarse de dos modos según lo expuesto: mediante una única aproximación global del conjunto de sacudida o mediante la aproximación independiente de varios módulos de derribo. Si se toma la altura de copa útil a partir de 1 m respecto al suelo y hasta 4 m totales, los diámetros a diferentes alturas (Tabla 17) tienen diferentes valores con un alto grado de dispersión, existiendo desviaciones típicas superiores a 1 m. Esto conlleva a que se requiera un sistema de aproximación, con una aproximación mínimo de este valor, para alcanzar a las diferentes zonas, aunque un único sistema de derribo y aproximación sería negativo produciendo rotura en las ramas intermedias al intentar alcanzar las más interiores. En este camino, si se realiza una zonificación de zonas de 1 m, quedando cuatro niveles

modulares de sacudida, los resultados serían mejores pues conseguirían aproximarse en varios niveles (Figura 73).



Figura 73. Representación de una posibilidad de modulación de sistemas de derribo a la copa del árbol

1.2.2 *Modelo predictivo de la capacidad productiva o rendimiento potencial.*

En la Tabla 18 se muestran los parámetros fundamentales de las fincas muestreadas para olivos en año de carga máxima acorde a su vecería. Los resultados muestran un mayor rendimiento potencial, calculado a través de la producción de los árboles por su densidad de plantación, a medida que aumenta la densidad de plantación. El rendimiento potencial por árbol exhibe una tendencia contraria con valores de $162,9 \pm 27,9$ kg árbol⁻¹ para plantaciones de regadío tradicionales comparado con $24,2 \pm 11,4$ kg árbol⁻¹ para plantaciones de seto amplio en regadío. Así, la producción por árbol decrece para plantaciones con mayor densidad (León, De la Rosa, Rallo, Guerrero & Barranco, 2007; Larbi, Ayadi, Ben, Msallem & Caballero, 2012) y la producción por hectárea aumenta cuando la densidad de plantación es mayor para el mismo sistema de formación. El volumen de copa por árbol muestra la misma tendencia que rendimiento potencial.

Tabla 18. Parámetros de las plantaciones en función del sistema de plantación. Valores muestran la media± desviación típica. N indica el número de árboles medidos

Tipo plantación	Riego	Marco (m)	N (#)	Producción medida o rendimiento potencial (kg árbol ⁻¹)	Rendimiento potencial plantación calculada (kg ha ⁻¹)	Volumen de copa manual medido (m ³ árbol ⁻¹)	Eficiencia de producción calculada (kg m ⁻³)	Volumen de copa por hectárea calculada (m ³ ha ⁻¹)
Seto amplio	Regadío	6x3	30	31,4 ± 9,3	17,463	11,7 ± 3,4	2,8 ± 0,8	6 723
		7x3,5	45	24,2 ± 11,4	9,883	7,6 ± 2,5	3,1 ± 0,9	3 099
		8x4	22	29,3 ± 6,1	9,171	21,6 ± 5,3	1,4 ± 0,3	6 760
Intensivo	Regadío	7x5	57	53,3 ± 17,3	15,251	19,9 ± 9,5	2,9 ± 0,6	5 690
		6x8	110	39,0 ± 16,8	7,479	21,4 ± 9,3	1,9 ± 0,6	4 655
		7x7	48	45,1 ± 15,4	9,190	23,9 ± 8,1	1,9 ± 0,5	4 879
	Secano	7x9	47	45,2 ± 11,5	7,181	21,4 ± 5,1	2,2 ± 0,7	3 395
		8x9	51	31,4 ± 9,6	4,278	22,3 ± 9,6	1,5 ± 0,4	3 023
Traditional	Secano	12*	67	81,2 ± 23,6	6,496	61,2 ± 30,6	1,6 ± 0,8	4 893
	Regadío	12x12	31	162,9 ± 27,9	11,241	96,4 ± 15,6	1,7 ± 0,3	6 652

El rendimiento potencial medio de las plantaciones de regadío fue mayor que en las de secano, variando desde los con 12 172-11 241 kg ha⁻¹ en seto amplio; 10 640 kg ha⁻¹- 5 729 kg ha⁻¹ en intensivo y 6 496-12 960 kg ha⁻¹ en tradicional. Estos valores de producción están en concordancia con los rendimientos que se encuentran en España en nuevas plantaciones, con edades de entre 3 y 7 años, con 408 árboles ha⁻¹ que producen 9 540 kg ha⁻¹, y con 816 árboles ha⁻¹ que producen 13 898 kg ha⁻¹ (Pastor, Vega & Hidalgo, 2015). Otros autores demostraron que el rendimiento medio está influenciado por el sistema de formación, la densidad de plantación y la localización con rangos de 6 380 kg ha⁻¹ y 10 580 kg ha⁻¹ (Lavee Haskal & Avidan, 2012).

Es notable que valores altos de rendimiento potencial de plantación pudieron ser obtenidas en cualquier tipología. Esta falta de diferencias notables indica que la rentabilidad de plantaciones no es debido a su umbral de rendimiento sino a otros factores limitantes como los costes de operación, requerimientos, tamaño de explotación, etc. (Fernández-Escobar, 2012).

La eficiencia de producción (kg m⁻³) fue generalmente mayor para plantaciones con mayor densidad con intervalos de 1,6 a 3,1 kg m⁻³ para plantaciones con 80 árboles ha⁻¹ y 408 árboles ha⁻¹, respectivamente, aunque con excepciones según se observa en la tabla. Otros autores describen niveles más bajos de producción, como por ejemplo entre

1 y 0,26 kg m⁻³, dependiendo de la variedad (Farinelli, Ruffolo, Boco & Tombesi, 2008).

A continuación, se establecen los modelos predictivos que permiten caracterizar el rendimiento potencial de los árboles y plantaciones:

- 1.) El rendimiento potencial basado en la máxima producción de los árboles medidos, pudo ser estimado a través del volumen de copa medido manualmente para todas las categorías planteadas, a través de la siguiente ecuación basada en una regresión lineal:

$$\text{Rend. potencial (kg árbol}^{-1}\text{)} = 15,93 + 1,22 \text{ Vol. decopa manual (m}^3\text{árbol}^{-1}\text{)} \text{ Ec.17}$$

El volumen de copa manual fue un adecuado predictor dentro del modelo que mostró una alta significación ($r^2 = 0,76$, $p \leq 0,01$) con un error estándar de 18,6 kg árbol⁻¹ de estimación media. Sin embargo, las medidas manuales pueden introducir errores graves en la estimación del operario por la observación en las diferentes partes del árbol y el cálculo de volumen, basado en una estimación con la fórmula de elipsoide, puede ser inadecuada para una morfología tan irregular. En este sentido, otros autores ha propuesto métodos alternativos de estimación del volumen que mejoren la eficacia de las medidas (Miranda-Fuentes, Llorens, Gamarra-Diezma, Gil-Ribes & Gil, 2015).

El modelo proporcionado fue altamente significativo y representativo en el área geográfica del sur de España por el amplio rango de plantaciones y localizaciones muestreadas, aunque se necesita mayor experimentación para considerar diferentes restricciones como suelos o clima.

Los resultados confirman lo señalado en otras investigaciones sobre la fuerte relación de la producción con el riego (Moriana, Orgaz, Pastor & Fereres, 2003). Así, el modelo general puede ser separado en dos específicos teniendo en cuenta la influencia de riego. Se encontró una gran dispersión de valores para plantaciones de secano debido a la variabilidad de suelos, mientras que para las de regadío fue similar al modelo general. Para plantaciones de regadío se obtuvo un ajuste alto ($r^2 = 0,89$, $p \leq 0,01$), teniendo 13,1 kg árbol⁻¹ de error medio en la estimación (Figura 74), mientras que para plantaciones de secano es ligeramente peor ($r^2 = 0,62$, $p \leq 0,01$), con 17,1 kg árbol⁻¹ de error en la estimación. Dichos modelos se observan en las siguientes ecuaciones:

-Para plantaciones de regadío:

$$\text{Ren. potencial (kg árbol}^{-1}\text{)} = 10,642 + 1,541 \text{ Vol. de copa manual(m}^3\text{árbol}^{-1}\text{)} \text{ Ec. 18}$$

-Para plantaciones de secano:

$$\text{Ren. potencial (kg árbol}^{-1}\text{)} = 25,932 + 0,781 \text{ Vol. de copa manual (m}^3\text{árbol}^{-1}\text{)} \text{ Ec. 19}$$

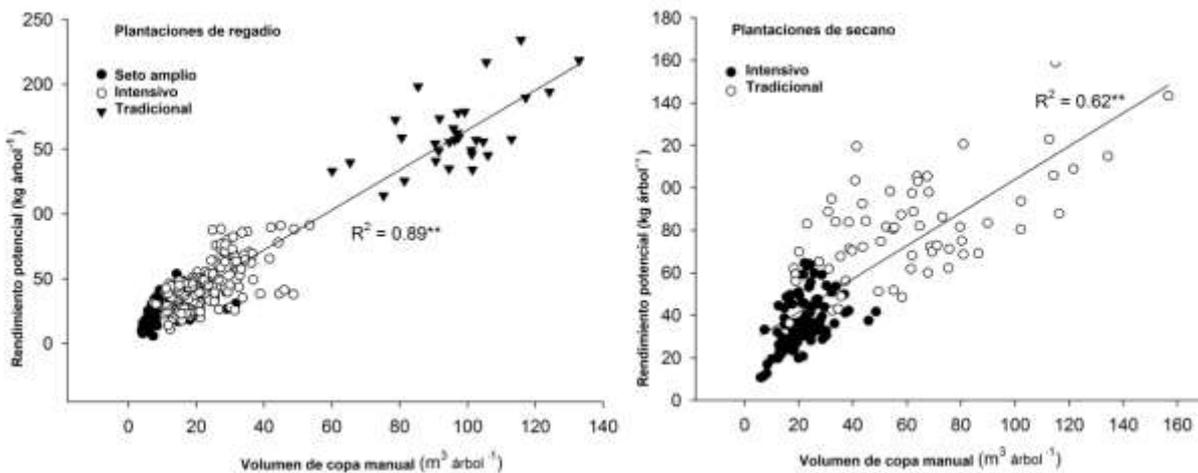


Figura 74. Relación entre la producción medida en año en carga, o su rendimiento potencial, y el volumen de copa medido manualmente en función de su riego y tipo de plantación

Para determinar el rendimiento potencial de plantación basado en el volumen por hectárea se obtuvo una regresión lineal mostrada en la siguiente ecuación, considerando todas las categorías con un buen ajuste ($r^2 = 0,57$, $p \leq 0,01$) y un error medio estimado de $2\,997,45 \text{ kg ha}^{-1}$.

$$\text{Ren. potencial plantacion(kg ha}^{-1}\text{)} = 843,46 + 1,877 \text{ Vol. copa manual(m}^3\text{ha}^{-1}\text{)} \text{ Ec.20}$$

Este modelo podría ser útil en países como España donde las políticas (CAP, 2015) están referenciadas por la producción media obtenidas en el periodo de 1999 to 2005 siendo necesaria su actualización. El rendimiento potencial de plantación debería ser incrementada para mejorar la rentabilidad optimizando el volumen de copa por plantación. De esta manera, es recomendable adaptar la poda para obtener valores óptimos de volumen de copa por árbol (Pastor, Hidalgo, Vega, Fereres, & Humanes-Guillén, 2006), y como consecuencia el volumen de copa por hectárea. Para las plantaciones intensivas estudiadas, este volumen debería ser unos $8\,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para secano y $11\,000$ and $13\,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para regadío (Pastor *et al.*, 2005). Sin embargo, todas las plantaciones ensayadas tuvieron valores de volumen de copa menores, por lo

que la formación de árboles más vigoroso mejoraría el rendimiento perjudicando el rendimiento de las operaciones de recolección (Villalobos, Testi, Hidalgo, Pastor & Orgaz., 2006).

2.) Se obtuvo la relación entre el volumen de copa manual medido y el área aérea del árbol medida mediante ortofotografía obtenida con UAS.

El método para la medición del volumen de copa más ampliamente generalizado es el método manual con jalón. Este método no usa recursos avanzados y tiene bajos niveles de resolución por la precisión del operador o su pericia en la observación. Además, requiere altos tiempos de operación para la toma de medidas que, en este trabajo, rondaron 4 h aproximadamente para la medición de 1 ha (96 árboles) de olivar tradicional suponiendo una media de 2,5 minuto por árbol. Sin embargo, a pesar de estas deficiencias el método puede ser válido para pequeñas explotaciones siendo necesario otro tipo de mediciones para mayores extensiones. En este sentido, las técnicas usadas de fotogrametría con el uso de UASs podrían suponer un gran avance al reducir los tiempos de operación.

La detección de los contornos obtenidos con ortografía ha resultado ser eficiente gracias al uso de modelos digitales de superficie obtenidos del UAS. La resolución del DSM obtenido ha sido de 0,02 m superando a la de actuales sistemas de satélite como Pleiades, WorldView-2 o OrbView, que proporcionan resoluciones de hasta 0,4 m (Gougeon & Leckie, 2006; Brandtberg & Walter, 1998). La evaluación de contornos con la información de los DSM podría ser mejorada con un proceso automático gracias a algoritmos de comparación de espectros (Pouliot, King, Bell & Pitt., 2002), aunque el trabajo de procesado ha sido realizado manualmente en este trabajo.

El área aérea del árbol ha mostrado ser un parámetro adecuado para la estimación de volumen de copa manual, presentándose como alternativa a la determinación del método manual de volumen de copa. En la Tabla 19 se muestran los valores obtenidos de las mediciones en tres tipos de plantaciones, que se han empleado para obtener el ajuste entre los mismos.

Tabla 19. Parámetros de las plantaciones usadas para los modelos de predicción y validación. Valores muestran la media ± desviación típica. Diferentes letras en una misma columna indican diferencias significativas entre categorías (Duncan's post-hoc test, p<0.05)

Plantación	N	Rendimiento potencial (kg árbol ⁻¹)	Volumen de opa manual (m ³ árbol ⁻¹)	Área aérea de contorno del árbol (m ² árbol ⁻¹)
Intensivo regadío	12	38,6 ± 4,3 a	12,1 ± 1,7 a	10,3 ± 1,3 a
Tradicional seco	12	65,8 ± 29,8 b	73,6 ± 27,6 b	24,2 ± 13,4 b
Tradicional regadío	12	155,2 ± 15,0 c	98,0 ± 9,9 c	34,8 ± 3,1 c

Los valores presentados presentan una reducida dispersión en la misma plantación debido a las mínimas diferencias en altura entre árboles de 3,8 ± 0,2 m – 4,2/3,4 m tradicionales de regadío y 3,9 ± 0,4 m – 4,8/3,0 m de seco.

Se determinó la relación entre el volumen de copa manual y su área individual aérea (Figura 75) con un ajuste alto ($r^2 = 0,83$, $p \leq 0,01$) y un error estimado de 17,49 m³ árbol⁻¹. Los datos tuvieron cierta dispersión debido a la diversidad de factores que influyen en los resultados.

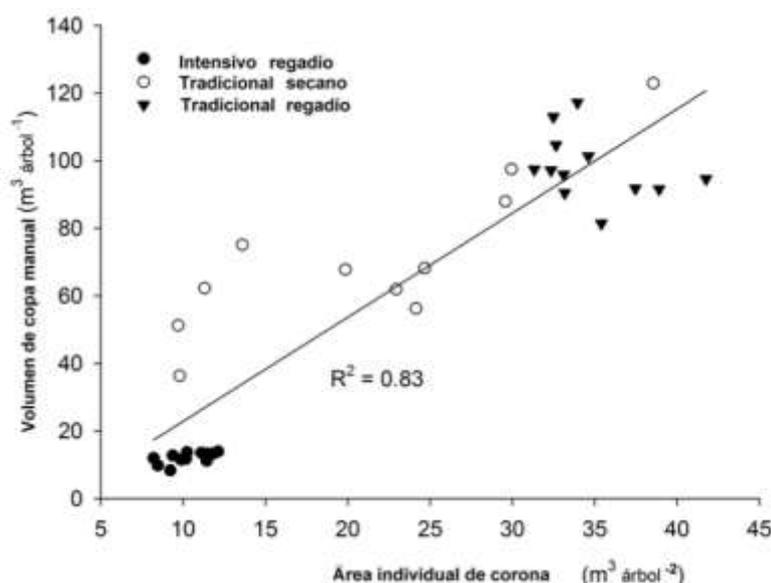


Figura 75. Modelo lineal entre el área aérea del contorno de árbol y el volumen de copa medido para diferentes categorías de plantaciones

La ecuación del modelo, que se muestra a continuación, puede reemplazar el valor de volumen de copa manual en el modelo de rendimiento potencial, que separa el modelo de regadío y seco.

$$\text{Volumen de copa}(\text{m}^3\text{árbol}^{-1}) = -8,373 + 3,182 \text{ Área aérea}(\text{m}^2\text{árbol}^{-1}) \text{ Ec. 21}$$

Usando, esta simplificación, se obtuvo una regresión lineal entre el rendimiento potencial predicho a través de su área individual y calculado con los modelos de secano y regadío (Figura 76) con su producción medida que obtuvo un ajuste satisfactorio.

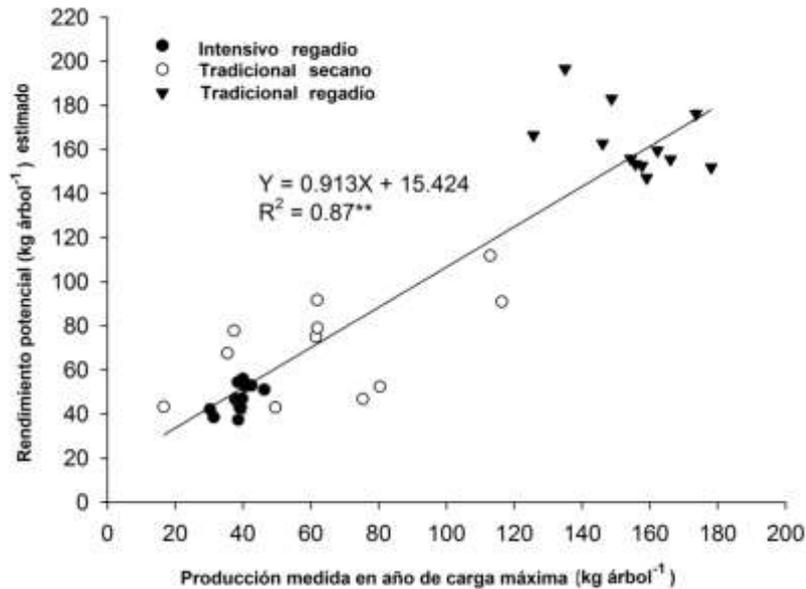


Figura 76. Modelo de predicción y medida del rendimiento potencial de diferentes categorías de plantaciones de olivar

Este método demostró la posibilidad de predecir el rendimiento potencial estimado mediante valores de forma del árbol, suponiendo un avance como valor de cálculo más rápido que el volumen de copa manual y poco costoso. Todo ello, permite la simplificación del cálculo de volumen de copa en grandes áreas. Esto permitiría la aplicación de técnicas de agricultura de precisión con tratamiento variable aplicables a mejorar la productividad de la plantación. Además, la inclusión de sistemas de detección automática de árboles a tiempo real (Turner *et al.*, 2012) podría ser muy útil para labores como aplicación de agroquímicos, o incluso para la determinación de labores específicas de recolección. Por ejemplo, esta herramienta podría tener utilidad en el desarrollo de maquinaria de recolección adaptando parámetros de vibración acorde al volumen de copa para mejorar el derribo de fruto (Castro-García, Castillo-Ruiz, Jiménez-Jiménez, Gil-Ribes & Blanco-Roldán, 2015) e incluso extenderse a otros sistemas como los sacudidores de copa. Todo ello, implementado con sistemas de información geográfica podría ayudar a la creación de mapas temáticos y como medida de actualización de los mismos.

Como resultado, el rendimiento potencial puede ser calculado para cada árbol en función de su área y representado en un mapa. En la Figura 77 se presenta un ejemplo de mapa obtenido para 1 ha de olivar tradicional, que permite predecir el rendimiento potencial por árbol.

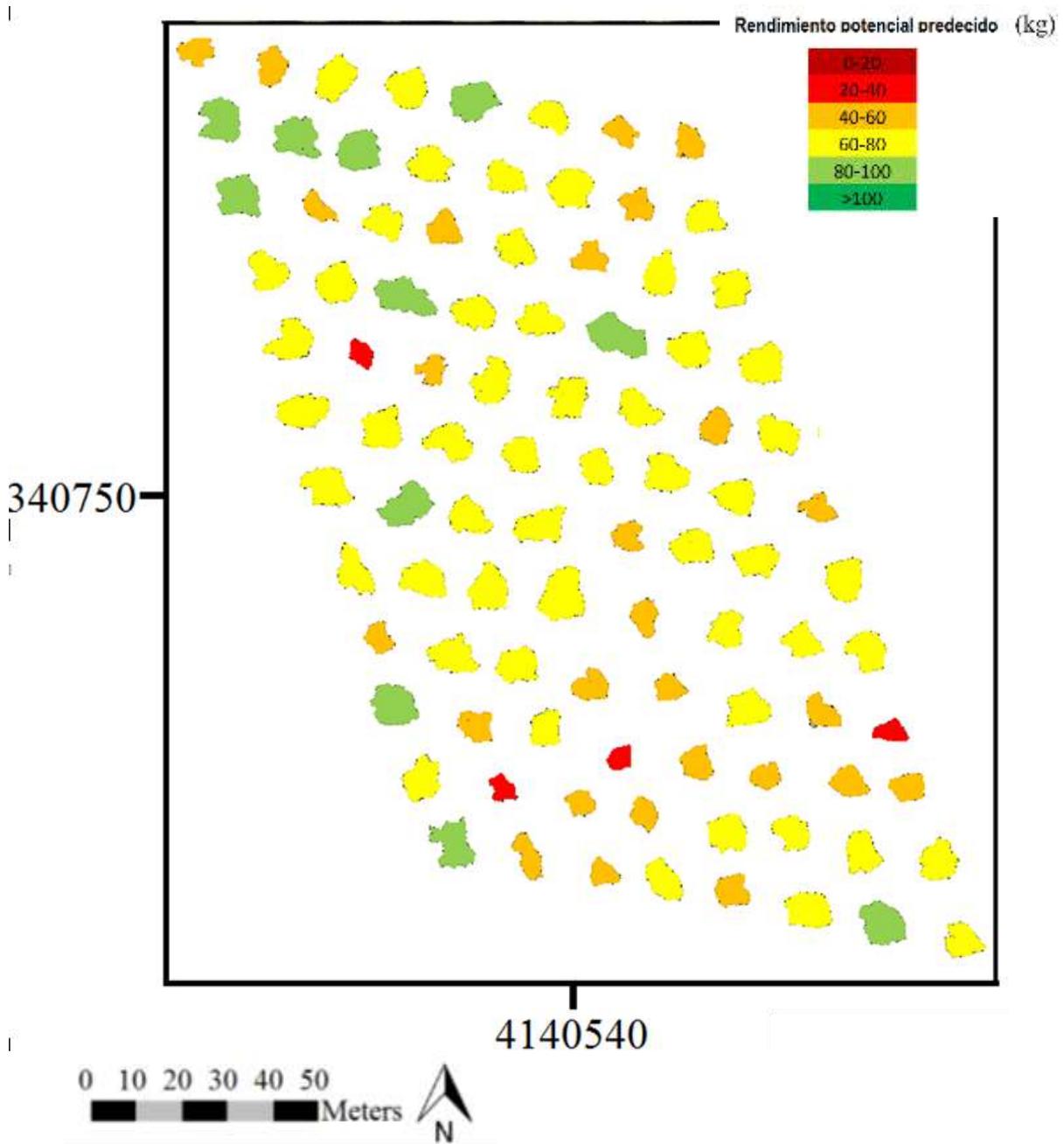


Figura 77. Mapa de variabilidad espacial del rendimiento potencial de producción en función de su área aérea en una plantación de olivar tradicional de secano

1.3 Integración de un dispositivo de gestión de fruto derribado con un sacudidor de copa comercial y estudio de viabilidad de cosecha integral en olivar tradicional.

1.3.1 Fase A. Estudio de la viabilidad del sistema sacudidor y su configuración.

Las pruebas en campo mostraron diferencias significativas en los resultados obtenidos con las diferentes regulaciones de la máquina (Tabla 20).

Tabla 20. Resultados de eficiencia de derribo para diferentes regulaciones del sacudidor de copa trabajando alrededor de la copa del árbol en olivar tradicional. Valores muestran la media± desviación típica

Velocidad avance (km h ⁻¹)	Frecuencia (Hz)	Eficiencia de derribo (%)	Eficiencia de derribo exterior (%)
1	3	37±9	42±9
	4	60±13	71±1
	5	63±15	66,7±9
1.5	3	30±7	30±9
	4	55±9	65±9
	5	63±13	71±1

La velocidad de avance de la máquina ensayada no fue un factor decisivo en alcanzar altas eficiencias de derribo de frutos (Coef. Pearson=-0,095) porque el cabezal estuvo en contacto con la copa permanentemente. Por tanto, no es eficiente que la máquina permanezca un tiempo prolongado sacudiendo la misma parte de la copa a la misma frecuencia de sacudida para aumentar la eficiencia de derribo de frutos, siempre y cuando exista un contacto bueno con la copa. Es recomendable una regulación de los parámetros de sacudida a través de la frecuencia de sacudida (Coef. Pearson=0,728, sig=0,001). La velocidad de 1,5 km h⁻¹ es más interesante para el funcionamiento de la máquina, al aumentar la capacidad de trabajo de la máquina. Sin embargo, es posible que al aumentar la velocidad se vea perjudicada la eficiencia de recolección, por la dificultad de realizar la operación de mantener el contacto con la copa y disminuir la precisión, lo supondría la necesidad estudiar económicamente el perjuicio y provecho de aumentar esta variable.

El incremento de la frecuencia de sacudida ha generado un incremento de la eficiencia de derribo. La frecuencia de sacudida de 3 Hz (180 ciclos minuto⁻¹) es poco interesante para el derribo de frutos, mientras que valores de 5 Hz (300 ciclos) han obtenido los mejores resultados, siendo similares en las dos velocidades de avance de la máquina.

En todos los ensayos, la producción en la zona interior del árbol, presentó valores similares cercanos a 15 kg de aceitunas. Esto es debido a la dificultad de alcanzar la vibración a esta zona

de la copa por las varas. Esta producción interior no es susceptible de ser recogida por este sistema de recolección. Por tanto, el fruto interior representa un 14% de la producción del árbol que no podrá ser derribada. Sin embargo, el empleo de un sistema de poda que minimice la producción interior de la copa facilitaría la producción externa en la copa de frutos, mejorando considerablemente la eficiencia de derribo. Sin considerar este fruto, la máquina en estos ensayos realizó un derribo de hasta un 70 % de los frutos del árbol.

Independientemente de los parámetros de regulación de la máquina, la eficiencia de derribo mayor se alcanzó en los árboles de menor volumen de copa (Coef. Pearson=-0,321, sig=0,038). Por tanto, la penetración de las varas en la copa del olivo y la posibilidad de sacudir la mayor parte de la copa es un factor clave para la mejora de la máquina. El rediseño de las varas de sacudida, en número, longitud y posición es necesario para la adaptación de la máquina al olivar tradicional.

La Fuerza de Retención de Fruto no ha estado correlacionada con la eficiencia de derribo según las diferentes regulaciones de la máquina. De esta forma, los sacudidores de copa pueden presentar ventajas en la recolección temprana de la aceituna, cuando la fuerza del fruto es elevada y los vibradores de troncos son menos eficientes o cuando puede existir alto riesgo de descortezado al utilizar vibrador. De forma similar, no existe relación entre los pesos unitarios y la eficiencia de derribo (Coef. Pearson=-0,167). Esta característica es importante para el ensayo de los sacudidores de copa con variedades de olivar con bajo peso unitario de los frutos y por tanto, poco eficientes a la recolección por vibración.

La regulación del sacudidor de copa ha sido fundamental para el derribo de hojas y brotes de la copa del árbol. Al aumentar la frecuencia de sacudida, la caída de hojas y brotes ha aumentado considerablemente (Tabla 21). Los daños en las ramas del olivo en ramas jóvenes debido a las varas del sacudidor han sido moderados siendo fácilmente recuperables (Figura 78), pero no obstante, el derribo daños debe ser estudiado y reducido para aumentar la frecuencia de sacudida y alcanzar niveles elevados de derribo de frutos. Los posibles daños producidos en los frutos durante el derribo no fueron apreciables en ninguna regulación del sacudidor de copa, aunque tampoco representarían un problema grave debido a su destino para almazara.

Tabla 21. Daños producidos para diferentes regulaciones del sacudidor de copa trabajando alrededor de la copa del árbol

Velocidad avance (km h ⁻¹)	Frecuencia sacudida (Hz)	Daños (kg árbol ⁻¹)	Daños (kg daños.100 kg frutos ⁻¹)
1	3	2,0	5,3
	4	1,6	3,0
	5	3,2	4,8
1,5	3	2,6	8,2
	4	2,5	3,6
	5	6,7	8,4

**Figura 78. Daños leves producidos por las varas del sacudidor de copa en las ramas jóvenes de un olivar tradicional**

Los parámetros de vibración generada por el sacudidor de copa han mostrado variaciones significativas en función de la regulación de la máquina. Se determinó un incremento en la aceleración en la rama cuando aumentó la frecuencia, teniendo esta mayor importancia que la variación de velocidad de trabajo para alcanzar elevadas aceleraciones en la rama (Figura 79).

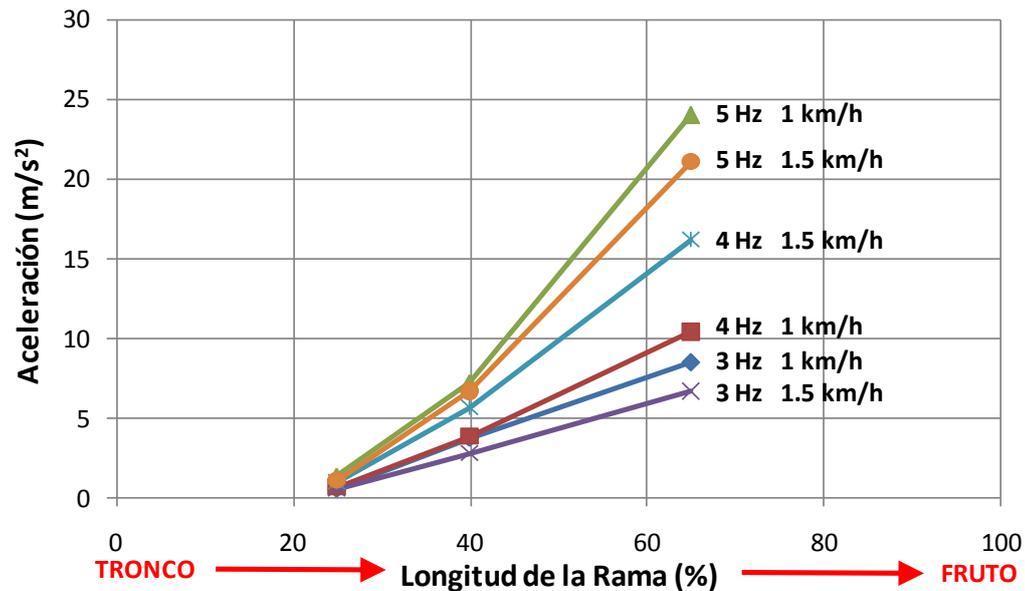


Figura 79. Aceleración en los diferentes puntos de la rama estudiados según las regulaciones ensayadas en el sacudidor de copa

La amplitud de vibración de la rama puede ser estimada a partir de los valores de aceleración máxima y frecuencia, simplificando la señal de vibración a una forma senoidal (frecuencia constante), porque realmente, está implícitamente ligado al movimiento alternativo de la vara del sacudidor. Sin embargo, el movimiento resultante durante su interacción con la copa es más complejo porque depende de la resistencia que presente la rama en el punto de contacto. La amplitud de origen de la oscilación es el radio del cigüeñal del sacudidor, transmitida a las varas a través de una biela, que proporciona amplitud máxima de la oscilación de 160 mm en la posición perpendicular de la vara con la dicha biela. Aunque la amplitud en la zona cercana al fruto es cercana a la excentricidad del tambor de las varas, esta se reduce al transmitirse por la rama.

El sacudidor de copa aplicó una vibración a la rama de baja frecuencia (3 a 5 Hz) y elevada amplitud, de valor doble al vibrador de troncos. Las diferentes regulaciones del sacudidor de copa proporcionaron un amplio intervalo de los valores de la vibración registrados, principalmente en la parte exterior de la copa del árbol, lugar donde se localizan la mayor parte de los frutos en el árbol. Los valores de aceleración en la parte interior de la copa fueron prácticamente similares y muy reducidos, y en todos los casos se redujeron al transmitirse al interior del árbol. La transmisión de la vibración, medida como el cociente entre los valores de aceleración eficaz entre varios puntos, se muestra en la Tabla 22. La vibración producida por el

sacudidor de copa es amortiguada rápidamente por la rama del olivo presentando una baja relación con los parámetros de regulación del sacudidor de copa. La reducción de la vibración es más importante en las partes interiores del árbol, donde las varas de la máquina no penetran y el diámetro de la rama aumenta.

Tabla 22. Valores medios de transmisión de aceleración diferentes puntos de ramas según la regulación de la máquina empleada

Velocidad avance (km h ⁻¹)	Frecuencia (Hz)	Transmisión de la aceleración en rama (%) (punto origen – punto final)	
		Externo-Medio	Externo-Interno
1	3	44	7,1
	4	37,5	6,7
	5	30,4	5,8
1,5	3	41,7	8,9
	4	35,2	6,2
	5	31,7	5,2

Durante la oscilación de la rama fructífera el fruto sigue la misma trayectoria que el ramillete que lo porta y valores similares a la vara que lo mueve (Castro-García *et al.*, 2009). En este caso, los valores de aceleración en fruto registrados en trabajos anteriores han sido muy superiores a los registrados en las ramas cercanas, que junto con los grandes valores de amplitud registrados han permitido un derribo eficaz del fruto.

En resumen, de los resultados obtenidos en la fase A se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La trayectoria de trabajo del sacudidor en círculo alrededor de la copa del árbol permite obtener un potencial de trabajo superior al de los vibradores acoplados al tractor y similar a los vibradores autopropulsados.
- La regulación del sacudidor, principalmente por la frecuencia de sacudida de copa, ha permitido obtener eficiencias de derribo de frutos medias de 63 %. Se deduce que la mejor configuración de este sacudidor para este cultivo y método de trabajo es una frecuencia de sacudida de 5 Hz y una velocidad de avance de 1 km h⁻¹.
- La vibración producida por el sacudidor de copa está muy localizada en la parte exterior del árbol, reduciéndose rápidamente conforme se transmite al interior del árbol. Los frutos interiores de la copa del árbol no son susceptibles de ser derribados. La adaptación del olivar tradicional para el empleo de estas máquinas requiere de eliminar las zonas interiores, dejando el fruto en la parte exterior del árbol.

- La eficiencia de derribo no depende de la producción del árbol, ni de la fuerza de retención del fruto ni de su peso unitario. Por lo que estos sistemas se pueden adaptar mejor que los vibradores de troncos a una recolección temprana del olivar.
- Los daños a las ramas del árbol han sido reducidos durante el derribo de frutos. Sin embargo la caída de hojas y brotes debe ser estudiada y reducida al emplear elevados valores de frecuencia de sacudida.
- Los sistemas sacudidores de copa realizan una oscilación de alta amplitud (7,5 a 20 cm) y baja aceleración en las ramas del árbol cercanas al fruto que no es capaz de ser producida por los vibradores de troncos.

1.3.2 Fase B. Determinación de un dispositivo acoplado al sacudidor de copa para la recepción del fruto derribado.

El trabajo de diseño y montaje determinó la dificultad de incorporar un sistema de recepción de fruto derribado en el sacudidor comercial estudiado, por dos motivos principales: la posición de la rueda del sacudidor cercana a las varas del módulo inferior y la posición relativa del chasis de la máquina con respecto al sistema de varas que varían con la nivelación de la máquina.

Durante los ensayos de campo se determinó la localización del fruto derribado y la superficie de recogida necesaria para que la eficiencia de interceptación fuera lo más altos posible al trabajar alrededor del árbol a una velocidad de 1 km h^{-1} y sin perjudicar en la maniobrabilidad de la máquina al aproximarse al árbol. La mejor configuración de los sectores que posibilitó este equilibrio fue la zona 2 a 1,5 m de extensión y la zona 4, 6, 8 y 9 a 1,8 m de extensión.

La trayectoria de trabajo utilizada en círculo alrededor del árbol, determinó varios aspectos. Por una parte, la aproximación al árbol en función del radio de giro del tractor, hace que la parte posterior de la máquina quede retirada de la copa y que caigan los frutos al suelo. Así las superficies 8 y 9 deben ser más extensas para mejorar la interceptación y las superficies 1 y 2 fueron menos largas que el resto para permitir el giro sin colisiones. Por otra parte, las zonas delanteras próximas al tractor deben ser más pequeñas para permitir mayor aproximación al árbol sin provocar colisiones en tractor cuando este gire.

La disposición de una estructura rígida en la parte cercana al tronco del árbol, conllevó a que el tractorista tuviese tomar muchas precauciones para no colisionar con el tronco del árbol con lo cual en ensayos iniciales la eficiencia del sistema fue menor al requerir una adaptación del

maquinista al método de recolección. No obstante, la incertidumbre y baja visibilidad en la aproximación al tronco debían de ser solventados con algún sistema deformable que permita dar un margen de maniobra mínimo al operario en su trayectoria con la diversidad de geometrías de los troncos de los árboles que se vaya encontrando.

Además, en las pruebas experimentales, se determinó que existía gran cantidad de fruto derribado que es lanzado a la superficie de interceptación con gran velocidad por lo que era necesario amortiguar los golpes (Figura 80) o apantallar las zonas más periféricas para evitar que el fruto saliera despedido fuera de dicha superficie.



Figura 80. . Detalle del fruto retenido por los sectores diseñados en el prototipo construido para el ensayo

Los resultados globales de la eficiencia del dispositivo general en los ensayos realizados se muestran en la Tabla 23. Los datos mostrados fueron obtenidos sin adaptaciones previas de los árboles al trabajo de la máquina, sin experiencia previa del conductor y con las limitaciones propias de un prototipo.

Tabla 23. Eficiencias obtenidas en los ensayos con el prototipo en el sacudidor de copa y dispositivo de recepción en la fase B

Ensayo	Eficiencia de derribo (%)	Eficiencia de cosecha (%)	Eficiencia de interceptación (%)
1	66,9	56,7	84,8
2	62,0	55,8	90,0
3	72,3	61,4	85,0
4	76,1	67,0	88,0
5	80,2	69,7	86,9
6	74,5	65,6	88,1
7	79,9	68,4	85,7
8	73,30	62,5	85,3
9	78,3	67,8	86,6
10	84,3	76,3	90,5
11	81,0	72,8	90,0
12	81,70	74,0	90,6
Promedio	75,9	66,5	87,6
Desv. Típ.	6,5	6,2	2,2

La mayor cantidad de fruto derribado fue interceptado sobre la proyección vertical del sistema sacudidor de copa (Figura 81). Sin embargo, las zonas posteriores registraron importantes cantidades de fruto debido a rebotes en la copa, en la propia estructura y al paso de la máquina, aunque los resultados mostraron una gran posibilidad de recolección integral del fruto derribado.

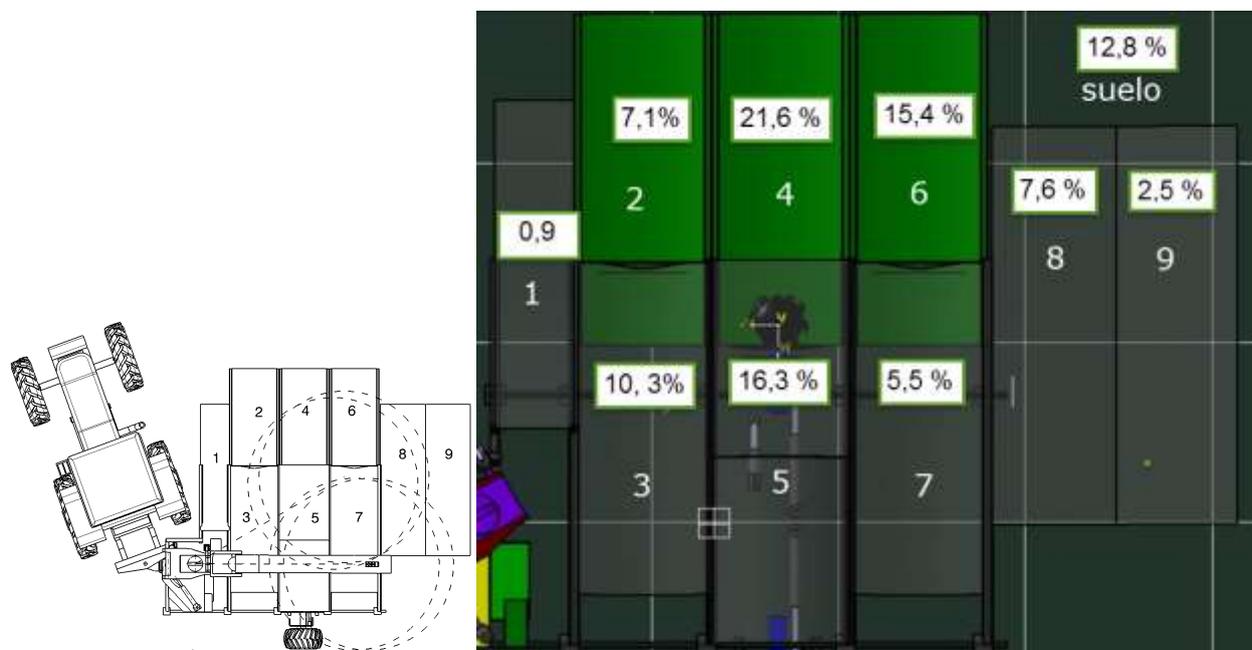


Figura 81. Esquema distribución en porcentaje del fruto derribado en los distintos sectores creados en el prototipo en los ensayos en el porcentaje del total de aceituna derribado por el sacudidor en los sectores

Los ensayos mostraron que durante el proceso de derribo, las aceitunas requieren de un tiempo determinado desde que comienza la sacudida del árbol hasta que llegan a la zona de interceptación. Todo ello, sumando a la velocidad de avance de la máquina, mostró que las zonas traseras de la máquina (zonas 6, 8 y 9) tuvieran una gran importancia pues parte del fruto no interceptado se perdió al no cubrir una mayor extensión. Este proceso, difiere del derribo de cítricos, para el que la máquina ha sido diseñada y en el que las zonas 1, 2 y 3 tienen mayor importancia.

Al considerar exclusivamente los frutos derribados, se obtuvo que para un derribo de 95,82 kg, la eficiencia de interceptación de fruto fue 87 % cayendo un 13% fruto al el suelo (12,4 Kg). En un ensayo auxiliar se cubrió una zona comprendida entre la zona 8 y 9 sobre la que se observó que existía una gran cantidad de fruto que caía al suelo. Con esta y otras mejoras concernientes a la recepción del fruto rebotado, se llegó a alcanzar una eficiencia de interceptación del 93,2%

El sacudidor de copa dejó una gran parte de fruto sin derribar, similar a la ocasionada en la fase A, pero perfectamente localizada en el interior del árbol ya que la penetración de las varas y la transmisión de vibración se limita a la parte exterior del árbol. De esta manera, si se compara la cantidad de fruto que queda en el exterior de la copa sin derribar, se observa que el sacudidor de copa con el dispositivo de recepción se muestra muy eficaz a la hora de derribar el fruto, pero es necesario que este sea accesible a las varas ya sea por modificaciones del árbol (poda) o de la máquina a través de la mejora del sistema de aproximación o su maniobrabilidad. No considerando los 3 primeros árboles recolectados con el sacudidor de copa por la falta de entrenamiento del tractorista ni la producción localizada en el interior del árbol, la eficiencia de derribo para el sacudidor ascendió al 84%. De esta manera se observó la gran viabilidad del sistema integral con las premisas observadas para su diseño en la fase C.

En resumen, de los resultados obtenidos en la fase A se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Existe la posibilidad de realizar un derribo de frutos localizado (en la zona sacudida) en árboles de varios pies que pueda permitir la recogida y carga simultánea de los frutos, aunque el sistema comercial no incorpore ningún sistema de interceptación.

- El diseño de un sistema de recepción del fruto derribado requiere prolongar la superficie de interceptación más allá de la proyección en planta (Figura 82) del sistema sacudidor de copa, para interceptar el fruto proyectado con algún tipo de sistema de pantallas. En la parte delantera (sector 1) hay que reducir la dimensiones del sector para evitar que en la maniobrabilidad del tractor en los giros se produzcan colisiones. En la parte trasera (sectores 8 y 9) hay que extender la superficie de recepción para mejorar la eficiencia de interceptación.



Figura 82. Detalle de las dimensiones estudiadas de la superficie desarrollada en fase B

- El funcionamiento del sacudidor en forma de círculo alrededor de la copa obligaba a crear una superficie cóncava (Figura 83) adaptada al tronco que permita interceptar la mayor cantidad de fruto cuando esté trabajando. Se requiere desarrollar un sistema deformable, en la parte de la plataforma cercana al tronco, para que el tractorista pueda aproximarse al árbol lo máximo posible.



Figura 83. Detalle de la geometría estudiada de la superficie desarrollada en fase B

- Es necesario elevar la plataforma una cierta altura para impedir el contacto de la misma con el suelo en zonas con pendiente, levantando las ramas bajas para que puedan ser sacudidas de forma más eficiente.
- Es necesario que la plataforma esté dotada de algún sistema de plegado, de tal manera, que pueda desplazarse sin dificultad entre las calles de la finca y para el transporte en carretera.
- Gran parte del fruto que queda perfectamente localizado en el interior del árbol tras el pase de la máquina podría ser obviado con una poda que favorezca la producción exterior y reduzca la interior en el árbol (Figura 84).



Figura 84. Detalle de la geometría de árbol requerida para el prototipo según resultados obtenidos en fase B

1.3.3 *Fase C. Desarrollo de un dispositivo que realice todas las tareas necesarias, para que unido al sistema sacudidor de copa, realice la recolección integral del olivar tradicional.*

El diseño y desarrollo de un sistema de interceptación y gestión de fruto fue efectuado con éxito mediante su montaje en los ejes de tractores del sacudidor y limitando la inclinación del sistema. Tras la incorporación de dicho dispositivo al sacudidor (Figura 85) el prototipo fue probado en campo con la obtención de los siguientes resultados:

- ✓ Eficiencia de derribo exterior: $92,4 \pm 3,9\%$
- ✓ Eficiencia de interceptación: $92,2 \pm 3,5\%$
- ✓ Eficiencia de cosecha: $85,3 \pm 4,6\%$.

✓ Daños: $5,6,1 \pm 2,48$ kg daño.kg de fruto⁻¹

Estos resultados muestran la viabilidad de su uso como alternativa a cualquier otro sistema de recolección utilizado en olivar tradicional pero con la gran ventaja que este sistema sólo necesitó de una persona que controle el dispositivo de recolección integral y otra que se ocupe de las tareas de llevar el fruto descargado de la tolva al dispositivo final de almacenamiento.



Figura 85. Dispositivo diseñado para la recepción y gestión de fruto derribado por el sacudidor de copa Oxbo 3210

En resumen, de los resultados obtenidos en la fase A se pueden extraer las siguientes conclusiones en función de los sistemas componentes de los que está formado el dispositivo:

- El bastidor cumplió su función de manera eficiente sin producir deformaciones ni problemas estructurales.
- La suspensión de la máquina actuó de manera efectiva adaptándose a las irregularidades del terreno (Figura 86). La adaptación lateral del sistema que fue limitada con un sistema de silent-block llegó a su tope en algunas ocasiones lo que indica la limitación en la transitabilidad en zonas de gran pendiente.



Figura 86. Detalle del giro del prototipo diseñado

- La dirección del tractor y su posición relativa respecto al dispositivo permitió una buena maniobrabilidad en los giros. Sin embargo, debido a las grandes dimensiones del sistema, se necesitan amplios marcos de plantación para producir estas maniobras y giros.
- El sistema de almacenamiento (Figura 87) formado por una tolva de capacidad 1 m^3 y aproximadamente 800 kg de fruto se mostró eficiente con un llenado uniforme, siendo la basculación hacia un sistema auxiliar de descarga rápida y eficaz. Sin embargo, presentó problemas de espacio lo que aumentó las dimensiones del dispositivo desfavorablemente.



Figura 87. Detalle de la descarga de la tolva en pala mecánica tras un ciclo de trabajo de recolección del prototipo fabricado

- El sistema de limpieza de fruto resultó eficiente aunque dejó de manifiesto la necesidad de colocar un dispositivo de desarramado robusto para desalojar el ramón de mayor tamaño del sistema (Figura 88) y roturas cuando se desalojen ramas de gran tamaño. La despallilladora colocada con tornillos sin fin de sección variable, que conduce el flujo de material hacia el centro, resultó eficiente en la limpieza del resto de brotes sin causar grandes atascos.



Figura 88. Detalle del sistema de limpieza de daños al árbol durante la recolección de un olivo en el ensayo planteado

- El sistema de adaptación al tronco (Figura 89), formado por escamas metálicas de 1 m de longitud en voladizo hacia el tronco, mostró unos resultados muy buenos adaptándose a cualquier geometría y orientaciones de troncos así como distintos grados de la colisión ocasionadas por diferentes trayectorias. El sistema de plegado y replegado fue eficiente, cubriendo los huecos y consiguiendo retener el fruto interceptado gracias a unas pantallas de goma colocadas en sus extremos. Para ello, se

necesitó una longitud de escama de más de 1 m y un ángulo de inclinación de 30° con respecto a su línea donde se ubican.



Figura 89. Detalle del sistema de contacto del prototipo con el tronco del olivo durante su recolección

- La integración del dispositivo general de recepción y manejo con el sacudidor mostró un comportamiento adecuado. Sin embargo, se detectó un grado llamativo de compactación del terreno (Figura 90) tras las distintas pasadas en la recolección de los árboles, resultado del peso del conjunto (12 000 kg sistema tractor más sacudidor + 2 000 kg dispositivo de recepción y gestión + 8 00 kg tolva llena) un gran limitante y principal problema en este aspecto. Aunque las condiciones de trabajo ensayadas fueron en seco, puesto que no se había producido precipitaciones en días anteriores, las condiciones habituales no son las encontradas, por lo que un sistema de tracción independiente sería necesario así como una reducción considerable del peso del conjunto total.



Figura 90. Detalle de la rodadura ocasionada por el prototipo fabricado tras la recolección de un olivo

- El sistema de recepción cubrió perfectamente la superficie de caída del fruto, sin producir excesivos rebotes ni daños en el fruto (Figura 91).



Figura 91. Detalle del sistema de interceptación de fruto tras un árbol recolectado del prototipo desarrollado para la recolección integral con el sacudidor Oxbo 3210

- El sistema de mando y control ubicado en la cabina del tractor, resultó eficiente resultando de fácil conducción al operario y rápido acceso a los principales comandos de la máquina (Figura 92).



Figura 92. Detalle del puesto de conducción en el tractor con el sacudidor Oxbo 3210

- La capacidad de trabajo de la máquina con el seguimiento de un dispositivo incorporado (Figura 30) a la máquina se puede estimar de los resultados mostrados en la Figura 93 según trayectoria de trabajo seguida por el prototipo durante los ensayos en la fase C, y su valor asociado de peso medido cada 4 s, correspondiente a los puntos marcados en la figura.

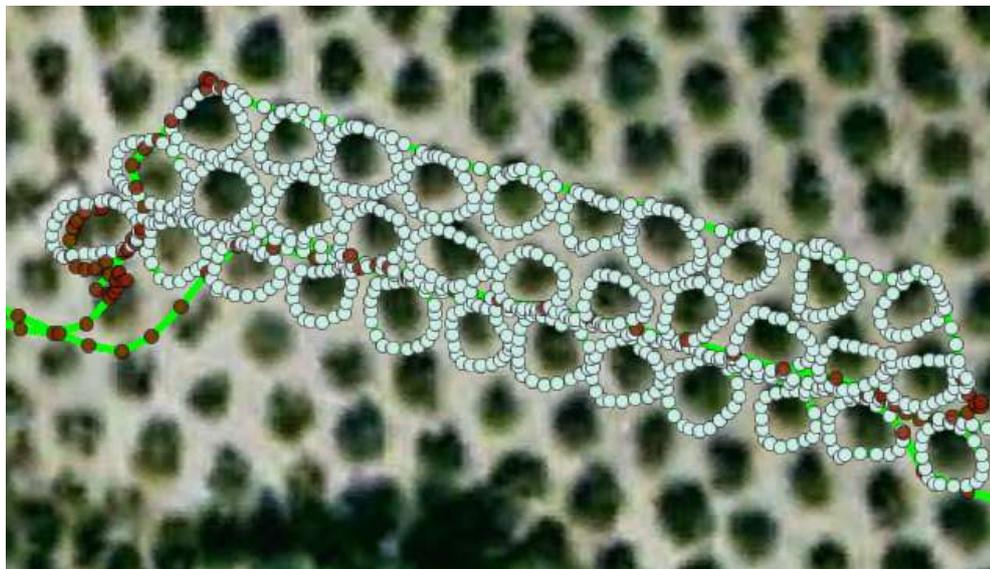


Figura 93. Representación de la trayectoria seguida por el prototipo diseñado en la recolección de los ensayos planteados a través de un dispositivo de georreferenciación

El tiempo medio por ciclo de recolección es el intervalo correspondiente desde que se inicia el proceso de sacudida con la tolva vacía hasta que se completa su llenado más el correspondiente al vaciado de la misma e inicio del nuevo ciclo. Para la estimación de este tiempo medio por ciclo se tienen en cuenta los resultados obtenidos en estos ensayos:

- ❖ La capacidad de la tolva es de 800 kg de aceituna limpia, y la máquina funciona sin interrupciones hasta que la tolva se llena por completo, y entonces el fruto se descarga al suelo sobre una lona. Posteriormente las lonas se cargarán a un remolque mediante la grúa trasera de un tractor. El tiempo que tarda en llenarse una tolva depende de la producción por árbol. En estos ensayos, siendo una producción de los árboles de $62,8 \pm 28,5$ kg, los árboles necesarios para cargar una tolva fueron aproximadamente 13 .
- ❖ Se ha medido que el tiempo medio necesario para descargar la tolva sobre una lona, desde que la máquina interrumpe su funcionamiento hasta que se vuelve a poner en marcha es de 120 segundos.

- ❖ El tiempo medio empleado en darle la vuelta a un árbol desde que se posiciona hasta que sale del mismo para posicionarse en el siguiente árbol, es de 110 segundos (tiempo medio obtenido en los ensayos mostrados). Cabe resaltar que este tiempo no depende de la producción del árbol, sino de la geometría del mismo, que limita o dificulta el giro del tractor entorno al mismo.

Si se emplea un coeficiente corrector de 0,8 que recoge la posible existencia de otros tiempos como tiempos muertos, o en virajes en las cabeceras de la parcela en estos cálculos para aproximarse lo máximo posible a la realidad, el tiempo medio por ciclo de recolección para el prototipo realizado en esta fase es:

$$\text{Tiempo de ciclo} \left(\frac{\text{s}}{\text{ciclo}} \right) = 110 \frac{\text{s}}{\text{árbol}} * \frac{13 \text{ árboles}}{\text{ciclo}} + 120 \frac{\text{s}}{\text{descarga}} * 0,9 = 1\ 240 \left(\frac{\text{s}}{\text{ciclo}} \right)$$

Ec. 22

Es decir cada 35 min aprox. la máquina recoge unos 800 kg aprox. Lo que en una jornada de trabajo de unas 8 horas podría llegar a recoger 10 000 kg aprox. con estos datos de producciones.

1.4 Desarrollo de sistemas de derribo sacudidores de copa específicos para el olivar tradicional

1.4.1 Evolución y diseño de sistemas de derribo

1.4.1.1 Elección de parámetros de diseño

El resultado que muestra la matriz QFD resultante (Figura 94) denota que los factores más importantes desde el punto de vista del usuario final de la máquina (QUÉs) son el rendimiento cosechado, el porcentaje de derribo y el porcentaje de recepción. Los factores de mayor dificultad según las valoraciones realizadas son el movimiento de la máquina en círculo o en línea, el sistema de transmisión de la sacudida, la penetración de la varas, sistema de aproximación al árbol, dimensiones de la estructura de recepción y el aprovisionamiento de proveedores y piezas. Los resultados obtenidos indican que los factores de mayor importancia a la hora de tomar decisiones para la fabricación del sistema de sacudida (CÓMOs) son la trayectoria en círculo o en línea, las dimensiones del sacudidor, el sistema de sacudida específico, la velocidad de trabajo y la fabricación del mismo.

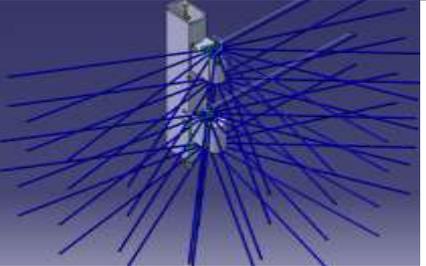
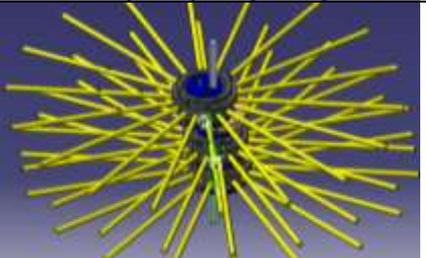
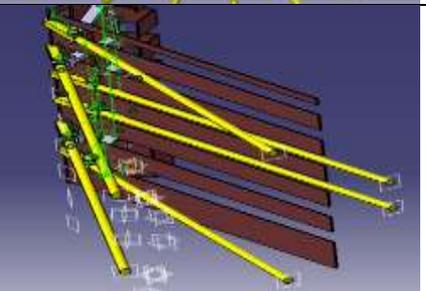
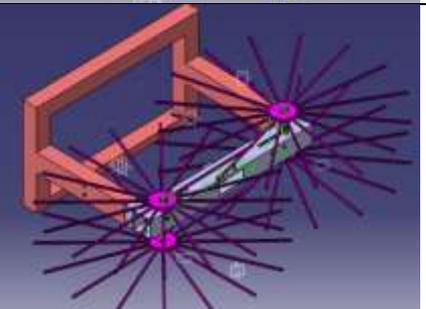
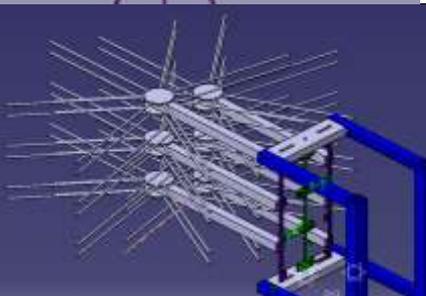
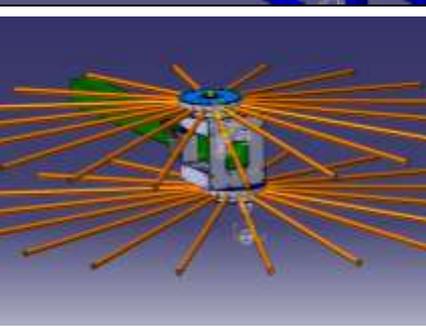
En base a estos resultados se tomaron las siguientes opciones para el diseño de una configuración inicial:

- ✓ Preferencia del movimiento lateral y trayectoria en círculo alrededor del árbol.
- ✓ Penetración de las varas: Se hará penetrar a las varas lo máximo posible, teniendo en cuenta que la estructura del árbol limita esta penetración por el riesgo de rotura al colisionar la vara con las ramas de cierto diámetro.
- ✓ Altura del sistema de sacudida: Para permitir que la vibración del sistema afecte a toda la copa, se requieren al menos 3-3,5 m de altura del sistema de sacudida entre su extremo superior e inferior, para alcanzar las partes más altas de la copa y las ramas bajas levantadas aproximadamente 1 m con respecto al suelo
- ✓ Complejidad del sistema de sacudida: Realización de un diseño del sistema de derribo ligero y simple del que permita una buena adaptación a la copa y evite el aumento de peso de la cosechadora.
- ✓ Sectorización del sistema de sacudida: Para conseguir diferentes actuaciones en función de distintas zonas en altura de la copa.
- ✓ Optimización de las dimensiones sistema de recepción ligadas a las del sistema de sacudida.

1.4.1.2 Diseño de los sistemas de derribo. Pruebas de mecanismos y su funcionamiento.

Los seis diseños del sistema de derribo propuestos y debatidos en gabinete técnico, se muestran a continuación en la tabla 24:

Tabla 24. Representación de diseños propuestos para el sistema de derribo

<p>A: Consta de dos semitambores dobles de varas dispuestas radialmente en un semicírculo con giro libre, aunque limitado a un cierto ángulo, para evitar que golpeen contra la carcasa del sistema de transmisión. Cada conjunto tiene un movimiento alternativo de sobre un pivote, que es empujado en un brazo excéntrico del pivote, por una biela movidas por un cigüeñal.</p>	
<p>B: Consta de tres tambores de varas dispuestos excéntricamente desfasados 120°, superpuestos verticalmente y unidos por un eje común eje vertical a través de unos platos. Cada tambor gira libremente con respecto al plato que mueve el eje común, provocando en las varas un movimiento de vaivén alternativo cuando el eje gira.</p>	
<p>C: Consta de un grupo de varas dispuestas de forma lineal en altura, y sujetas a un eje común vertical sobre el que pivotan. En un punto intermedio de la vara se unen a unas bielas que son movidas por un cigüeñal vertical, de tal manera que provocan un movimiento de alternativo sobre su pivote y desfasado en función del desfase de dicho cigüeñal.</p>	
<p>D: Compuesto por conjuntos de dobles tambores de varas unidas por un eje vertical. Dicho eje se mueve linealmente por una corredera horizontal al ser empujado por dos dobles bielas desfasadas dispuestas entre los conjuntos. Las bielas son movidas por un cigüeñal central.</p>	
<p>E: Consta de tres grupos dobles de unos brazos que pivotan en un extremo sobre un eje vertical y que tienen sobre su otro extremo un tambor de varas. En un punto intermedio del brazo se unen unas bielas que los empujan alternativamente movidas por un cigüeñal central común. De esta manera los brazos producen un movimiento de tijera alternativo cruzado entre tambores de varas.</p>	
<p>F: Consta de dos tambores de varas que están colocados sobre unas placas que discurren por unas correderas horizontales a modo de rail. Dichas placas son empujadas por dos platos excéntricos y desfasados 180° entre ellos y movidos rotacionalmente por un eje motriz común. El empuje se produce por un tetón con giro libre dispuesto excéntricamente en los platos, que se mueve entre una ranura de la placa empujándola alternativamente, provocando un movimiento lineal alternativo en los tambores.</p>	

.1.4.1.2.1 PROTOTIPO SAOLIV 1

De las propuestas planteadas se eligió la propuesta F por tener más afinidades a los requerimientos de partida. El diseño propuesto, denominado SAOLIV 1 (Figura 95), disponía de una densidad de varas inicial de 18 varas por tambor con inclinación de 5° sobre la horizontal, una separación entre ellas de 460 mm y una amplitud de movimiento lineal de 140 mm.

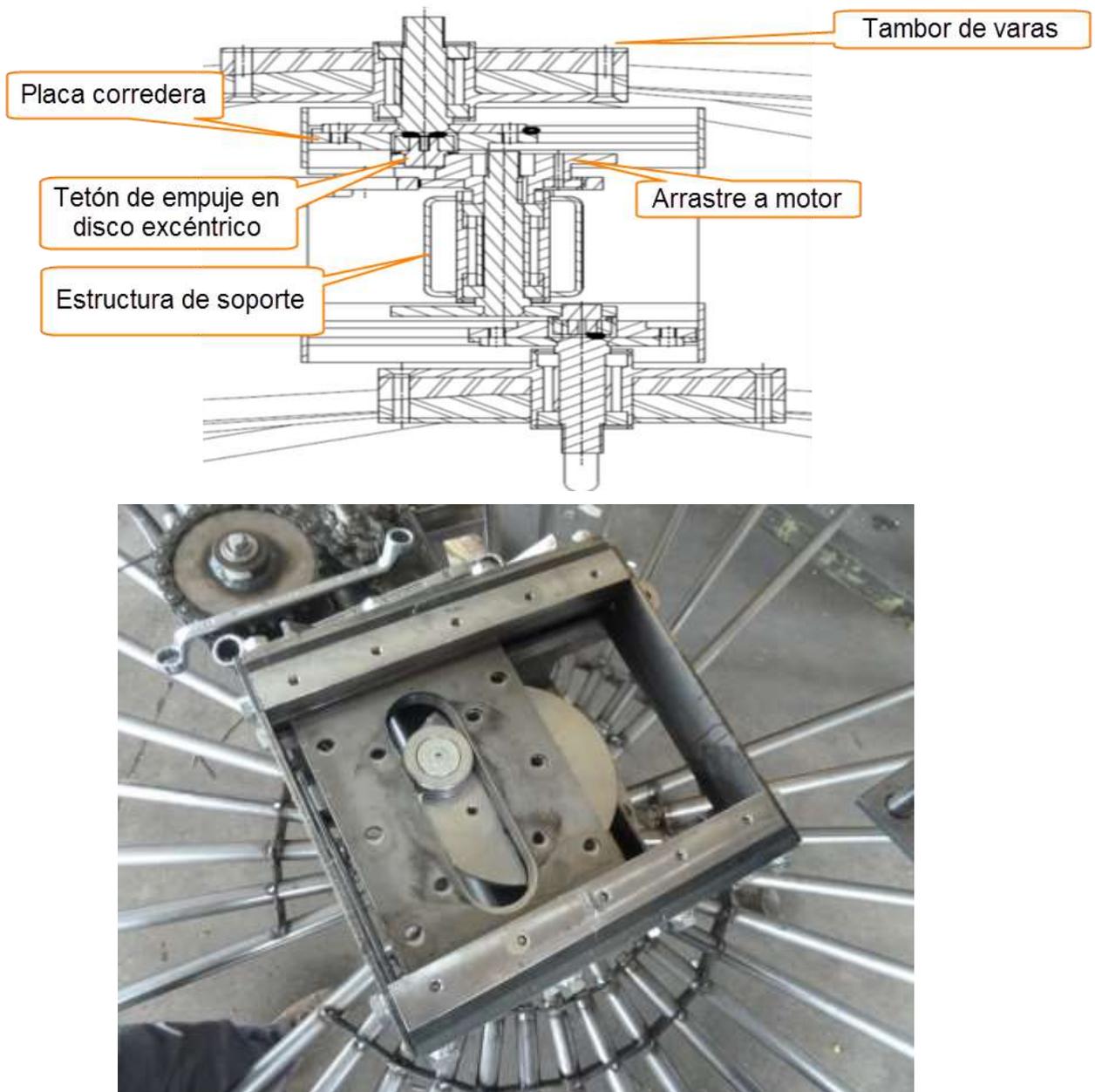


Figura 95. Prototipo SAOLIV 1. Vista en sección por un plano vertical que pasa por su centro de rotación (arriba) y vista de la placa corredera (abajo)

El prototipo fue fabricado y ensayado (Figura 96) para determinar la aceleración aplicada en las ramas en función de la densidad, inclinación y rigidez de las varas de sacudida, el giro controlado del tambor de sacudida y el funcionamiento general del mecanismo.



Figura 96. Prototipo SAOLIV 1 en distintas configuraciones de ensayo trabajando en olivar

Tomando como referencia los valores obtenidos con el sacudidor de copa comercial usado en una fase anterior (Oxbo 3210), uno de los principales limitantes del prototipo fueron las altas vibraciones generadas por el sistema de sacudida en el mecanismo lo que limitaban la fiabilidad y durabilidad. Además, al no existir masas desfasadas en una distancia vertical, se produjeron desequilibrios mecánicos. Como ventajas, este mecanismo proporcionaba sencillez de diseño, menores requerimientos de potencia mecánica, un acceso a la copa relativamente sencillo con posibilidad de penetración por zonas, y la reducción de peso del orden de 4 veces menos.

Los niveles de aceleración en vacío en las varas, a una frecuencia de 4,2 Hz, fueron mayores en la cosechadora Oxbo 3210 ($47,13 \pm 6,14 \text{ m s}^{-2}$), que en el prototipo SAOLIV 1 ($29,66 \pm 10,62 \text{ m s}^{-2}$) (Figura 97). De manera análoga, las aceleraciones registradas en el árbol cuando se aplicaron los sacudidores mantuvieron similares diferencias, con valores de $6,58 \pm 15,15 \text{ m s}^{-2}$ con la cosechadora Oxbo y $13,77 \pm 6,34 \text{ m s}^{-2}$ con SAOLIV 1. Esto significó una transmisión de la vibración desde el tambor a la copa de 77 % con Oxbo frente al 46 % del SAOLIV 1, debida posiblemente a factores como la inercia al giro de los tambores, amplitud del movimiento la aplicación de varios módulos de derribo. Además, los tiempos en que la aceleración efectiva superó niveles de aceleración de 50 m s^{-2} en las ramas fue de $3,57 \pm 1,51 \text{ s}$ con Oxbo y $1,28 \pm 1,06 \text{ s}$ con SAOLIV 1 con un tiempo total de vibración de 6 s.

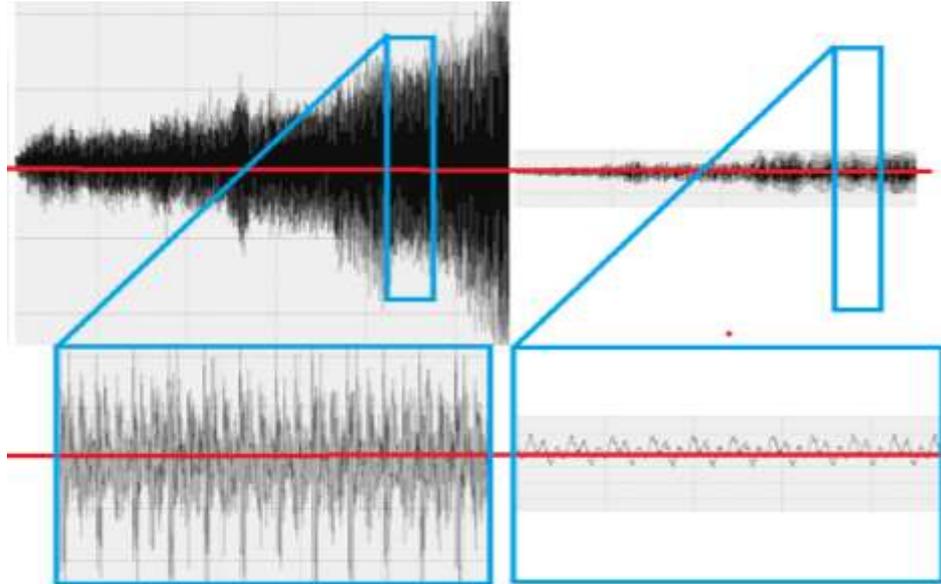


Figura 97. Visualización de las vibraciones y ruido entre la señal generada en un lugar cercano al tambor por el sacudidor Oxbo 3210 (derecha) y el SAOLIV 1 (izquierda) en un ensayo de aumento de la frecuencia de sacudida en el tiempo

La influencia sobre la aceleración eficaz y el tiempo acumulado con valores de aceleración por encima de 150 ms^{-2} sobre el efecto de modificar la frecuencia, el material de las varas y de colocar un sistema de frenado en el tambor de sacudida se muestra en la Figura 98. El efecto de cada uno de los factores modificados en el prototipo se observa en la Tabla 25 como estudiada mediante un análisis univariante.

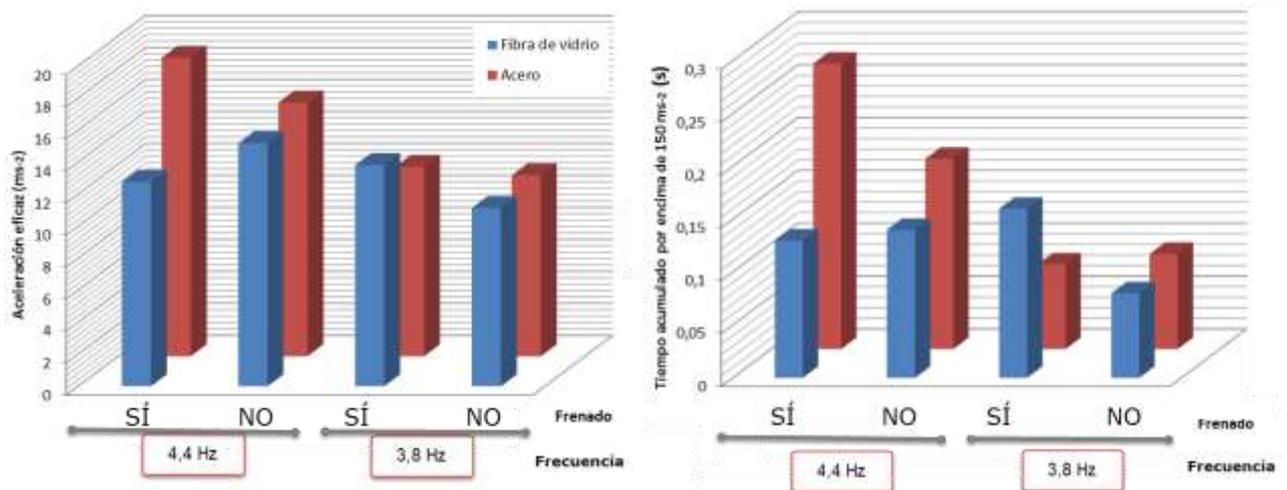


Figura 98. Influencia de la modificación de material de varas, frecuencia y freno en tambor sobre la aceleración eficaz (izquierda) y el tiempo acumulado por encima de 150 m s^{-2} (Derecha)

Tabla 25. Parámetros de la vibración registrados durante los ensayos realizados con el prototipo SAOLIV 1 en diferentes configuraciones para los dos tratamientos con poblaciones pareadas. Letras diferentes indican diferencias significativas ($\rho < 0.05$) según la prueba de rangos con signos de Wilcoxon. Valores muestran la media \pm desviación típica

Freno	Aceleración eficaz ($m s^{-2}$)	Tiempo acumulado (s) con ac superior a $150 m s^{-2}$
Con freno	14,27 \pm 6,55 a	0,16 \pm 0,28 a
Sin freno	14,39 \pm 6,1 a	0,12 \pm 0,14 a

Frecuencia(Hz)	Aceleración eficaz ($m s^{-2}$)	Tiempo acumulado (s) con ac superior a $150 m s^{-2}$
3.8	16,43 \pm 7,66 b	0,18 \pm 0,25 a
4.4 l	12,23 \pm 3,48 a	0,1 \pm 0,17 a

Material de varas	Aceleración ($m s^{-2}$)	Tiempo acumulado (s) con ac superior a $150 m s^{-2}$
Fibra de vidrio	14.24 \pm 6.04 a	0.13 \pm 0.17 a
Acero	14.4 \pm 6.74 a	0.14 \pm 0.26 a

No existen diferencias significativas en ninguno de los parámetros aunque variaron levemente en las distintas configuraciones con un comportamiento diferente en las señales (Figura 98) en diferentes configuraciones cuando se aplica la vibración en ramas. El sistema de derribo de Oxbo 3210 transmite aceleraciones a las ramas del árbol con frecuentes picos de su valor superiores a $500 m s^{-2}$, mientras que el prototipo SAOLIV 1 sólo produce algún pico de aceleración en torno a ese valor. Por otro lado, se observa que el efecto de colocar un freno que limite el giro en el tambor, para simular el aumento de inercia en el mismo, produce algún efecto positivo en la generación de esos impactos.

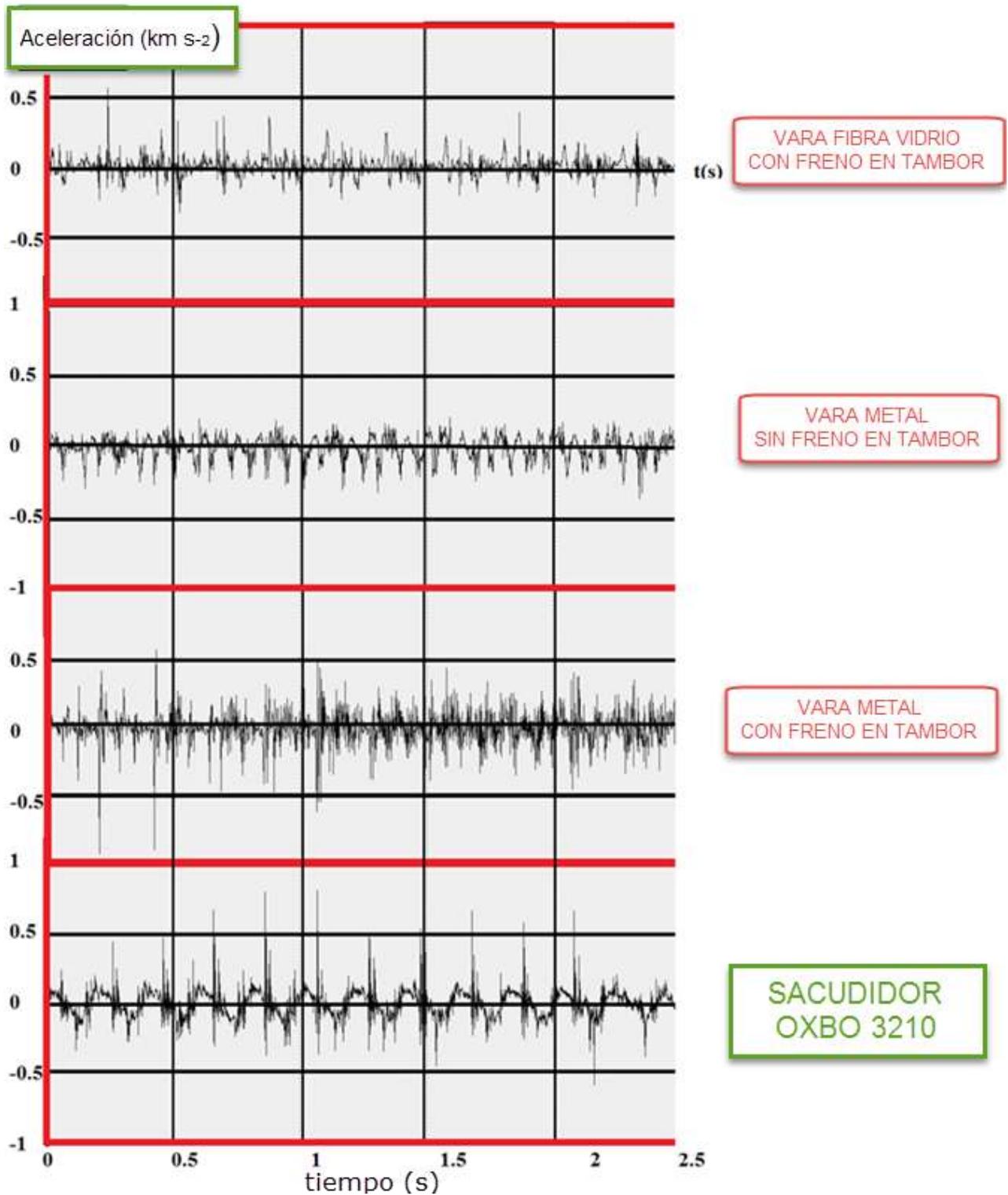


Figura 99. Señales de aceleración temporal registradas en ramas por diferentes configuraciones utilizadas con el prototipo SAOLIV 1 con la misma escala en comparación con Oxbo 310

En el estudio de la influencia de la inclinación del módulo de sacudida de 0 a 15° y de aumentar la densidad de varas de 18 a 30 no se apreció ningún efecto significativo respecto a las configuraciones anteriores, sin bien aumentaron el número de daños con la densidad de varas. Por tanto, producir estas modificaciones no resulta recomendable para este sistema.

Finalmente, se pueden obtener las siguientes conclusiones del estudio del prototipo SAOLIV

- Es necesario aumentar la masa o la inercia del tambor y varas para conseguir mayores valores de aceleración en ramas. Por otro lado, se requiere aumentar en número de módulos para que el nivel de aceleración aumente por la aplicación de mayor número de elementos de golpeo a la estructura rígida del árbol.
- Es necesario eliminar los elementos de contacto que generan fricción y vibraciones indeseables que puedan generar problemas de durabilidad y fiabilidad del mecanismo.
- Los materiales de las varas usados han transmitido valores de aceleración similares, por lo que su elección final dependerá de otros parámetros como la durabilidad en campo o los daños ocasionados a los árboles. En este sentido, ha destacado la fibra de vidrio ha conseguido una buena de adaptación a la copa, flexionándose el material sin romperse ni romper ramas cuando encuentra algún obstáculo, aunque resulta frágil, cara y presenta muchas oscilaciones en su movimiento de sacudida que ocasionan colisiones con elementos propios del prototipo.

.1.4.1.2.2 *PROTOTIPO SAOLIV 2 Y 2.1*

Para eliminar algunos problemas detectados en SAOLIV 1, principalmente en el campo de las vibraciones por fricción entre componentes, se diseñó otro prototipo de ensayo, SAOLIV 2 (Figura 100), con un mecanismo distinto al anterior que evitara las correderas y las zonas de contactos entre piezas del prototipo anterior, y entre el tetón de empuje con la placa corredera. Para conseguir un movimiento lineal alternativo similar, se diseñó un sistema con dos excéntricas conectadas a dos bielas que empujaban a dos mecanismos opuestos e iguales sobre los que iban montados dos tambores de varas. Dichos mecanismos oscilaban sobre un par de balancines de tal manera que en el punto central del soporte, donde se situaba el tambor, adquiriría un movimiento lineal (Figura 101).

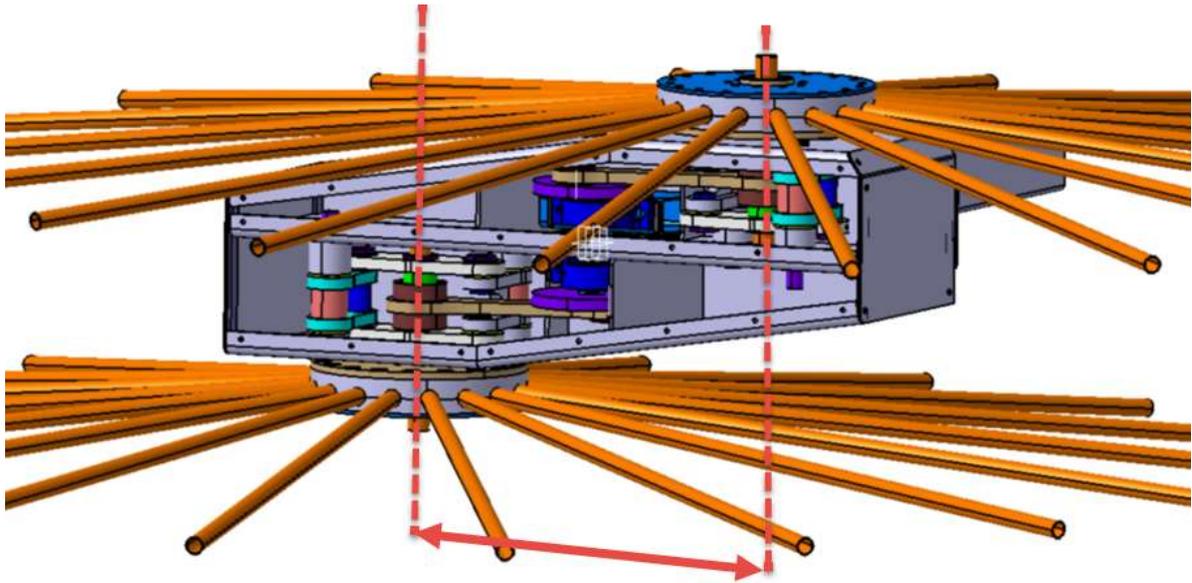


Figura 100. Prototipo SAOLIV 2. Representación del mecanismo contemplando la separación excesiva de los tambores de vasas

Este diseño no se materializó puesto que la separación exigida entre tambores en un plano vertical era demasiado grande (650 mm) y podía ser excesiva para un derribo eficiente. Así, para solucionar el problema se decidió simplificar dicho prototipo con un mecanismo similar pero con una sola de las excéntricas, una biela y un par de balancines, colocando los dos tambores en los extremos de un eje común vertical que empuja la cabeza de la biela. De esta manera, se pierde el movimiento de cruce entre los tambores y se aumenta la compensación de masas, pero se simplifica el mecanismo y reducen las distancias, evitando elementos de fricción entre componentes, dilataciones por excesos de temperatura y desgastes prematuros. El prototipo fabricado fue denominado SAOLIV 2.1 (Figura 101, 102).

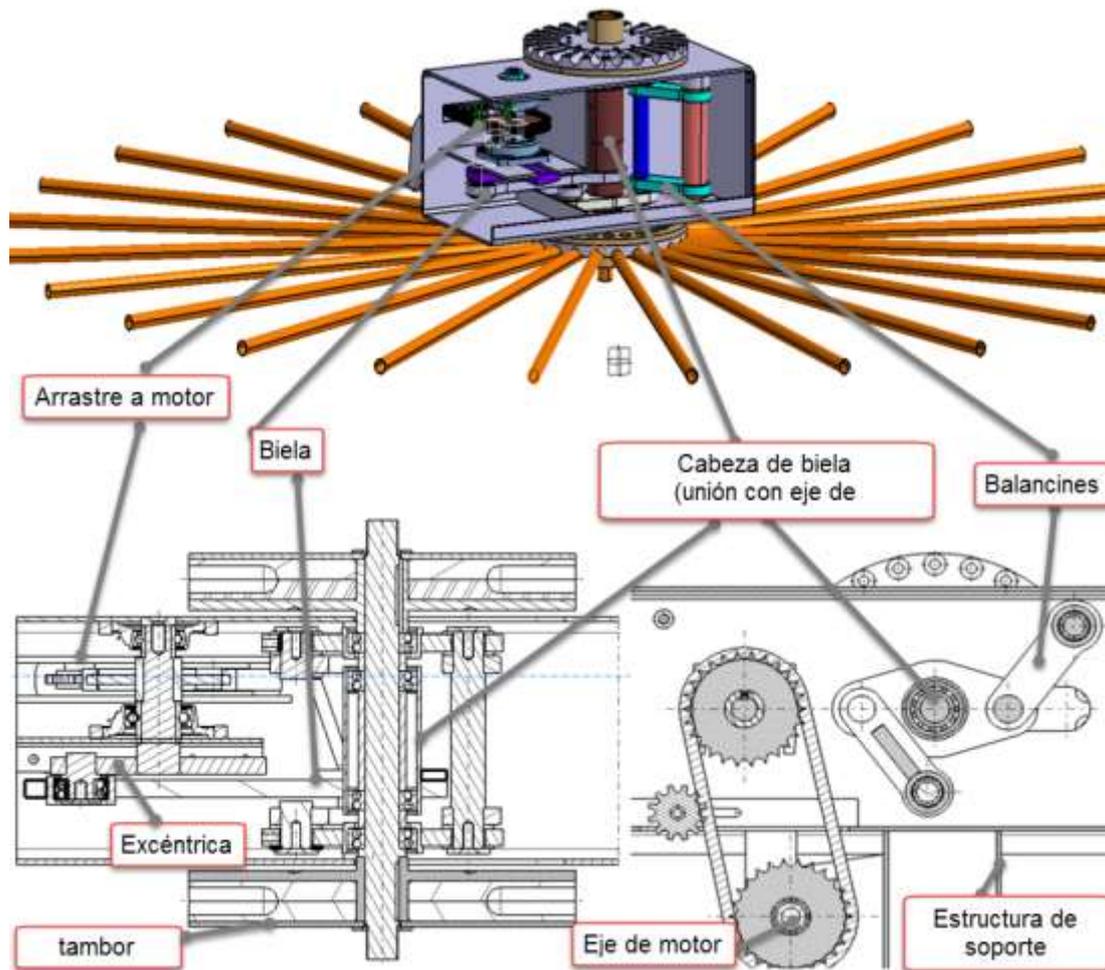


Figura 101. Prototipo SAOLIV 2.1. Representación del mecanismo (Arriba). Corte con plano vertical por su centro de rotación (abajo izquierda). Corte con plano horizontal por su centro el plano de arrastre del motor (abajo derecha)



Figura 102. Prototipo SAOLIV 2.1 suspendido en el tripuntal de un tractor

En los ensayos realizados y tomando como referencia a SAOLIV 0, el prototipo SAOLIV 2.1, mostró una alta durabilidad en su funcionamiento con un mantenimiento nulo sin necesidad de engrase regular, ni fricciones, que no ocasionaban vibraciones indeseadas. Por otro lado, al aumentar la masa del mecanismo se alcanzaron niveles de energía y aceleraciones similares a la cosechadora Oxbo en las mismas condiciones de trabajo. Todo ello, con la ventaja de que los módulos podían producir una aproximación diferencial (módulos independientes) a distintas partes de la copa con distinta penetración en función de la morfología del árbol. Sin embargo, se observaban grandes descompensaciones mecánicas debido al diseño asimétrico del prototipo. Esto fue debido a que la cabeza de la biela alberga el peso de los dos tambores con sus varas, y no existe ningún volante de inercia, ni elemento similar que permita absorber la energía e inercia que obtiene el conjunto en su movimiento alternativo. Para minimizar estas oscilaciones se colocaron dos nuevas cogidas del prototipo, con configuración en cruz y se colocaron silent-block en las cogidas a un chasis diseñado para las pruebas (Figura 103).



Figura 103. Prototipo SAOLIV 2.1 montado sobre un chasis experimental y arrastrado por un tractor

.1.4.1.2.3 PROTOTIPO SAOLIV 2.1 DOBLE

Según los principales problemas detectados en SOALIV 2.1, principalmente por las grandes descompensaciones dinámicas del prototipo, se plantearon una serie de modificaciones para

poder conectar dos unidades sincronizadas por una transmisión mecánica con un desfase entre tambores de 180°. Dicha transmisión está formada por tres grupos de engranajes de 2 ejes a 90° con relación 1:1, 1 grupo de eje doble para el arrastre del motor unidos por barras con “tubo limón” (Figura 104).

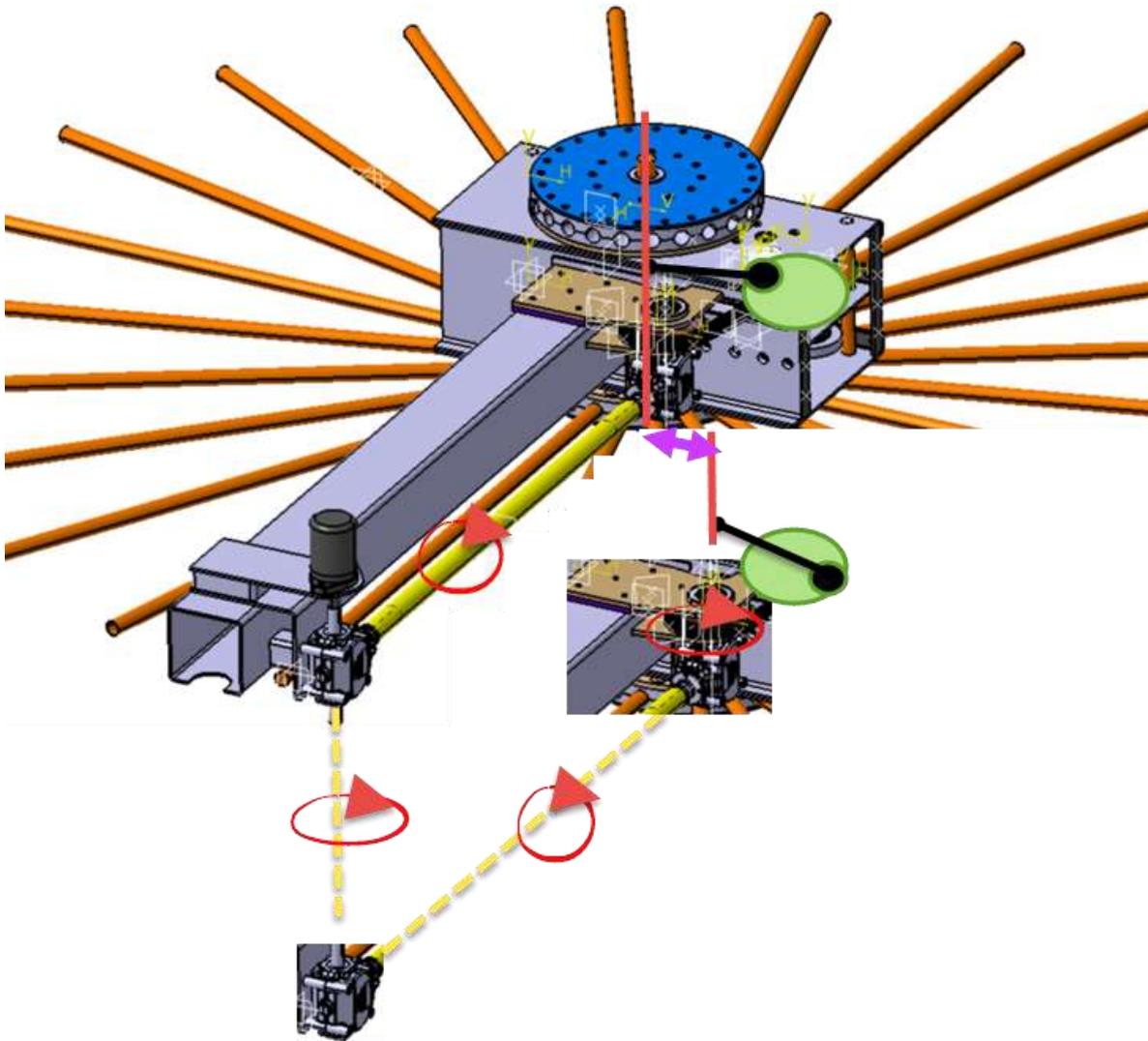


Figura 104. Prototipo SAOLIV 2.1. Representación del mecanismo con mostrando en la parte trasera la transmisión de movimiento entre módulos desfasados 180°según las posiciones de la excéntricas que empujan sus bielas en su movimiento

En las pruebas de SAOLIV 2.1 doble, se obtuvieron considerables mejoras en cuanto a la compensación de movimiento. Además, se recuperó el movimiento cruzado de módulos, factor importante para el derribo localizado del fruto. Sin embargo, se detectó que el movimiento de los tambores se mostró irregular existiendo puntos muertos en los extremos de la carrera máxima y

mínima del mecanismo. Estos desequilibrios, podrían estar ocasionados por la pequeña relación de biela-manivela que ocasionaban una cinemática perjudicial para el mecanismo.

Del estudio del comportamiento del prototipo SALIV 2.1 doble, se concluye que es necesario paliar los efectos indeseables con la incorporación de un sistema alternativo compensado con una relación de biela-manivela adecuada y con la masa e inercia necesaria para conseguir la energía requerida en la compensación del mecanismo.

.1.4.1.2.4 *PROTOTIPO SAOLIV 2.1.1*

Para reducir los efectos de la cinemática del prototipo SAOLIV 2.1 se requirió aumentar la longitud de la biela impulsora (Figura 105). Este efecto, tiene su explicación en el modelo matemático del movimiento de un sistema biela-manivela estudiado según el desplazamiento en centro del tambor:

$$\text{Desplazamiento} = l + r (\cos\theta - \frac{1}{2}\lambda \sin^2\theta) \quad \text{Ec. 23}$$

Donde r es el radio de la manivela, l es la longitud de biela, θ es la posición angular de la manivela y λ es la relación entre la manivela y la biela. Si se deriva doblemente este desplazamiento con el tiempo y asumiendo ω como la velocidad angular, se obtiene la aceleración del tambor.

$$\text{Aceleración} = -r\omega^2 (\cos\theta - \lambda \cos 2\theta) \quad \text{Ec. 24}$$

Se observa que la relación biela-manivela (λ). Por ello, se requiere una relación adecuada para que conseguir una aceleración en el tambor más cercana a una señal senoidal. Según los valores de manivela mantenidos en este trabajo, que coinciden con la amplitud del movimiento del mecanismo (120-170 mm), el efecto de una biela de 0,35 mm como en el prototipo SAOLIV 2.1 o una biela de cuatro veces más de longitud, en una señal de aceleración en el tambor se observa en la Figura 105. Los valores de aceleración obtenidos con el modelo teórico del comportamiento biela-manivela (Ec. 24) en función de la frecuencia de vibración y los valores de aceleración medidos en el tambor de varas, han sido similares (Figura 115).

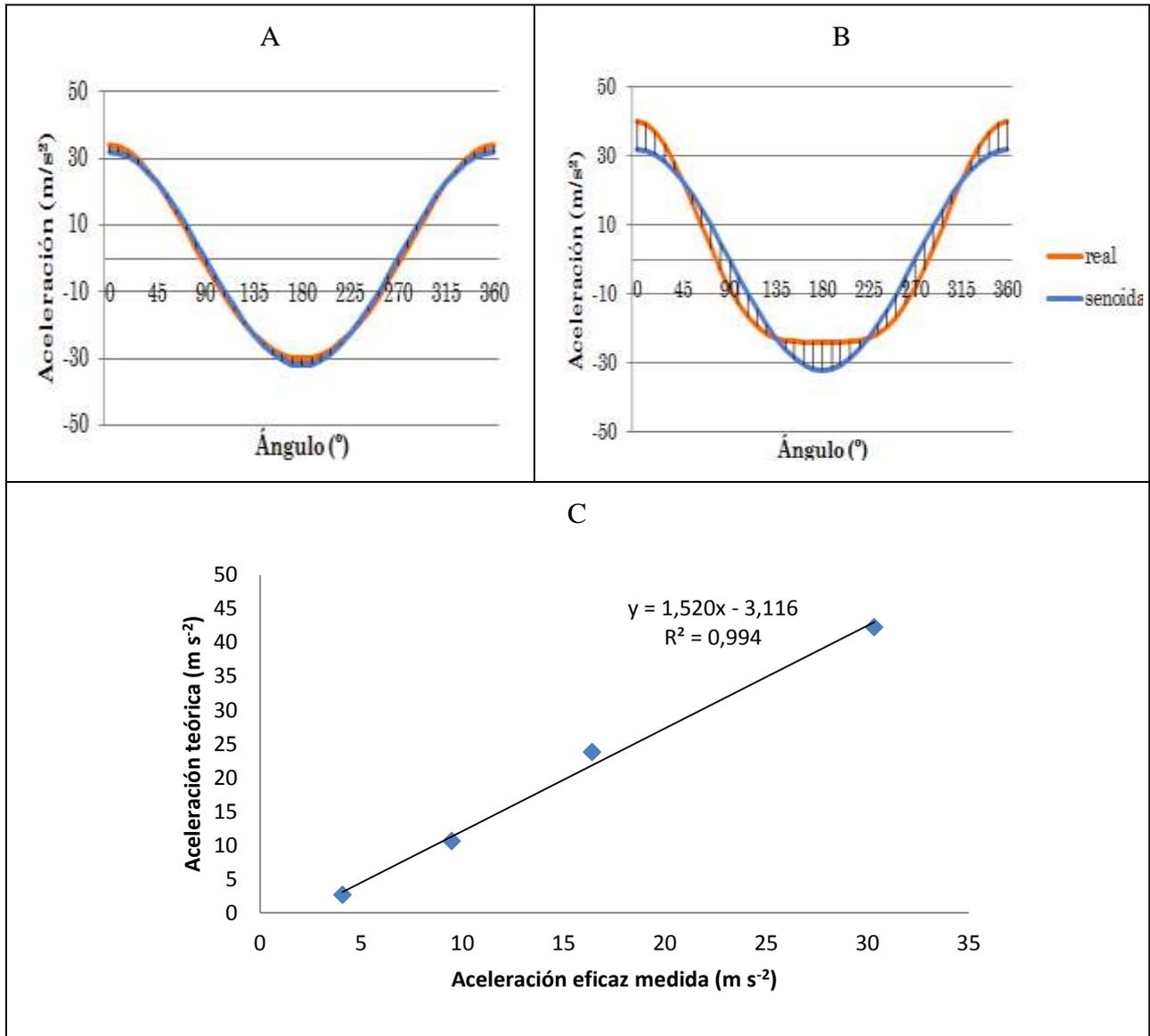
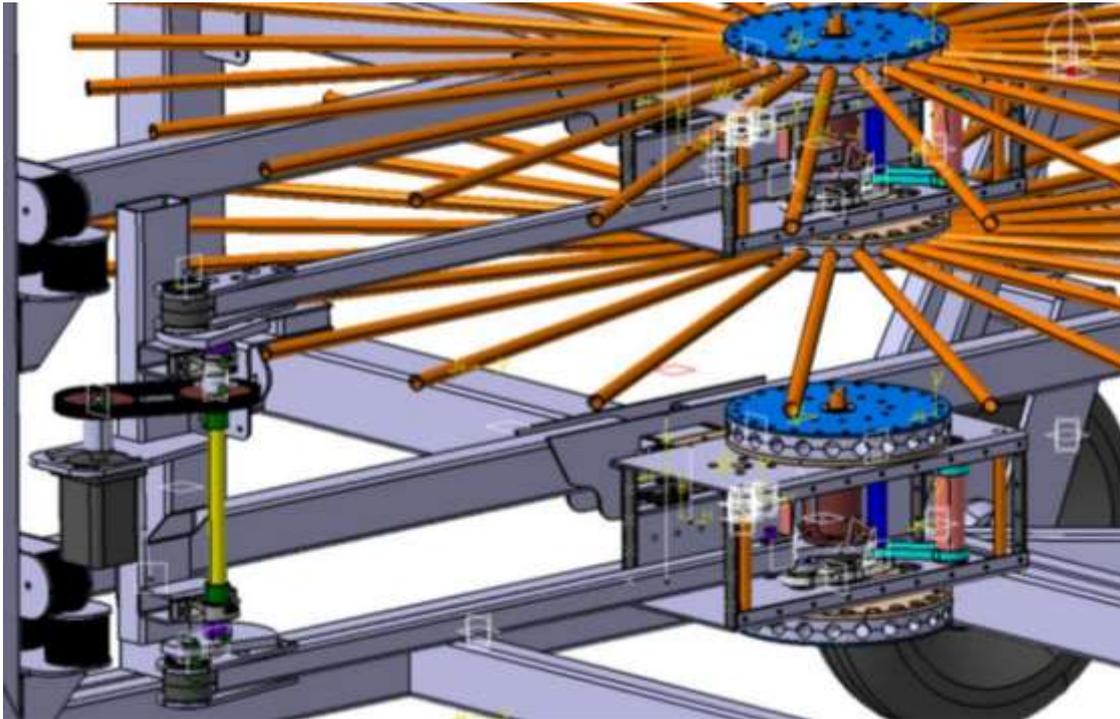


Figura 105. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Esquema de aceleración teórica obtenida en el tambor con el modelo biela-manivela en función de las diferentes longitudes de biela: A (biela de 1,5 m) y B (biela de 0,35 m) y su correlación con la biela de 1,5 m en función de varias frecuencias

Según este estudio, se cambió la configuración del diseño del prototipo SAOLIV 2.1, para introducir una biela más larga. La biela es movida por un cigüeñal con dos excéntricas desfasadas 180° que conecta una pareja de módulos con otra biela. De esta manera, se elimina la aproximación independiente de módulos consiguiendo un mecanismo rígido SAOLIV 2.1.1 (Figura 106).



A



B

Figura 106. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Representación (A) y Mecanismo (B) con dos módulos movidos por bielas largas, conectados con 180° de desfase en el cigüeñal y montado sobre un chasis de ensayos a través tres puntos en cruz aislados por silent-blocks

El comportamiento del mecanismo final mediante su aplicación en árboles fue bastante satisfactorio, alcanzando altos impactos y valores de aceleración en ramas que sobrepasaban los 500 m s^{-2} (Figura 107), al igual que la cosechadora de referencia Oxbo 3210.

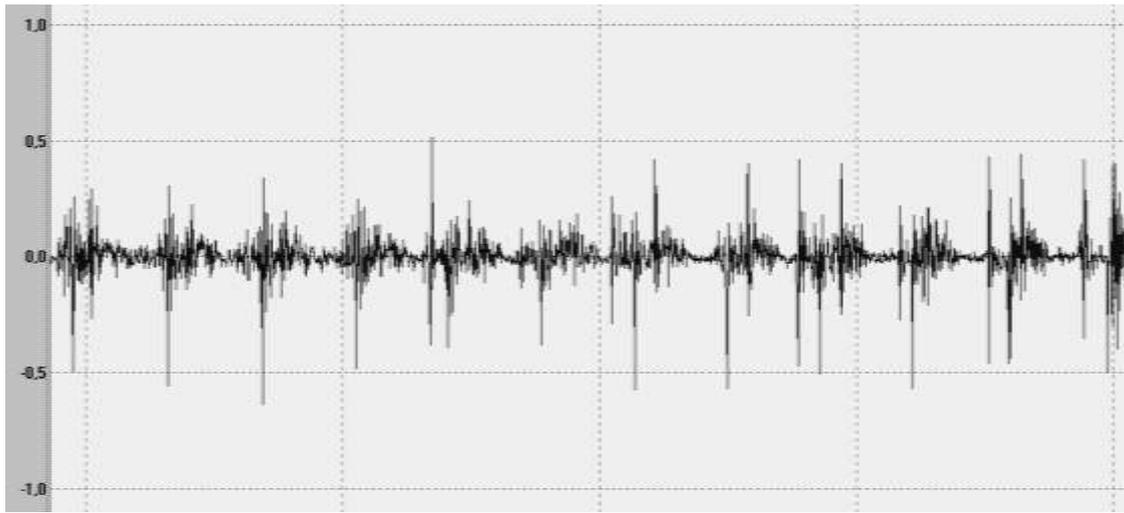


Figura 107. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Señal de aceleración temporal registrada en las ramas exteriores

Del estudio del prototipo SAOLIV 2.1.1 se extrae la importancia de conseguir un sistema compensado mecánicamente para obtener estabilidad y reducción de vibraciones indeseables. La compensación podría ser mejorada introduciendo mayor número de módulos con una configuración más simétrica con un mejor equilibrio mecánico, e introduciendo componentes que doten de inercia mecánica al sistema. Por otro lado, el nivel de aceleración resultó adecuado consiguiendo impactos elevados que pueden resultar satisfactorios para el derribo de fruto. Además, el mecanismo no necesitó un nivel de mantenimiento elevado aunque esto fue a cambio de aumentar la mayor complejidad mecánica el peso del sistema y reduciendo la aproximación diferencial por módulos del mecanismo al árbol.

1.4.2 *Evaluación de prototipos de derribo modular y completo*

Con los resultados obtenidos a través de los mecanismos estudiados, se realizaron dos prototipos con la gran diferencia de su modo de aproximación: modular (módulos con mecanismos independientes) o completa (mecanismo común para todos los módulos).

1.4.2.1 **PROTOTIPO DE DERRIBO MODULAR (SAMOLIV)**

.1.4.2.1.1 Diseño

Para el estudio de un sistema de derribo modular se diseñó un dispositivo experimental basado en el sistema SAOLIV 1, con un mecanismo basado en dos masas con una excentricidad de 80 mm, desfasadas 180° y separadas verticalmente 360 mm (Figura 108, 109). El sistema está

movido por un motor orbital de 80 cm^3 (Danfoss, OMP 80) capaz de trabajar en frecuencias de excitación comprendidas entre 0,5 y 8 Hz, derivadas de su régimen de giro máximo que obtiene la potencia hidráulica de las tomas remotas de un tractor. Gracias a la excentricidad, cada tambor desarrolla un movimiento circular y cruzado con su tambor opuesto. Esta configuración provoca que las varas tengan un movimiento de vaivén y cruce entre las varas del árbol, pero sin llegar a girar libremente debido a la inercia externa del conjunto tambor-varas y a su acople con giro libre en la unión del eje al tambor.

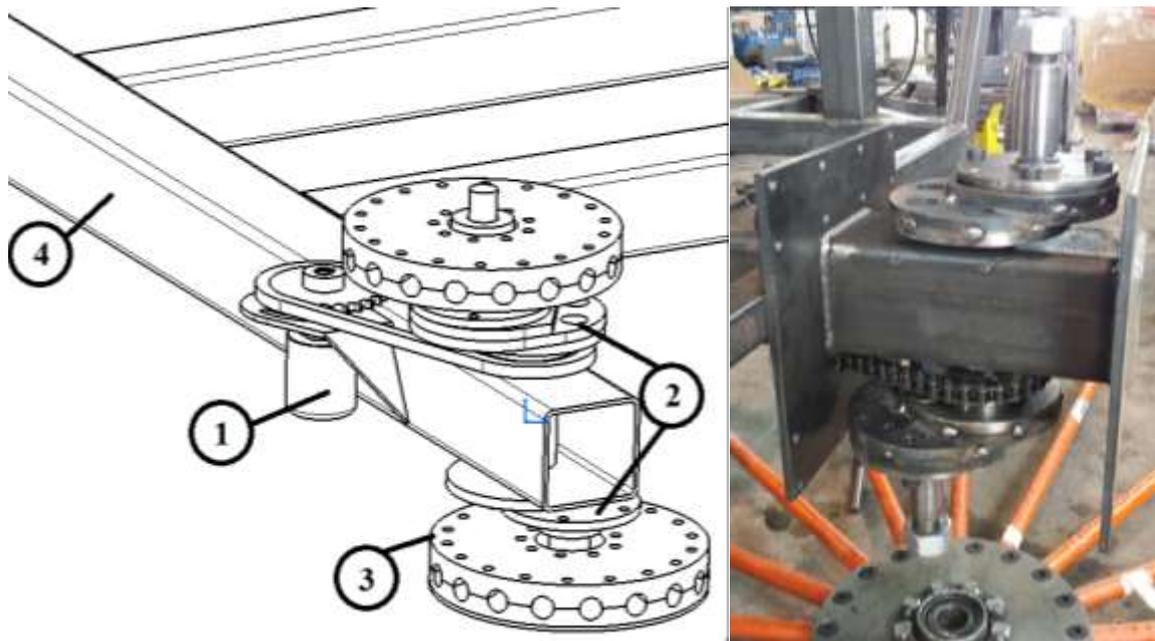


Figura 108. Prototipo SAMOLIV. Representación del mecanismo de derribo SAMOLIV y elementos del sistema: Motor de accionamiento (1), excéntricas (2), tambores portavaras (3), estructura portante en voladizo (4)



Figura 109. Prototipo SAMOLIV con varas de fibra de vidrio

.1.4.2.1.2 Evaluación

La evaluación del prototipo se realizó a través de los parámetros de eficiencia de derribo, daños al árbol y aceleraciones registradas en el árbol, en función de los factores frecuencia (3, 4 y 5 Hz), material de varas (fibra de vidrio y metal) y velocidad de avance ($0,75$ y $1,5 \text{ km h}^{-1}$). Los factores ensayados consiguieron altos valores de eficiencia de derribo y bajos de daños en la zona del árbol aplicada con el sistema SAMOLIV (Figura 110). La eficiencia de derribo obtenida en función de la frecuencia de sacudida ha resultado estadísticamente significativa y mejora en función del aumento de la frecuencia hasta 5 Hz debido al aumento de la aceleración que transmite a las ramas. Sin embargo, no se ha encontrado ningún efecto significativo con respecto a los daños ocasionados por el proceso de sacudida aunque existe una tendencia al aumento de los mismos con el aumento de la frecuencia.

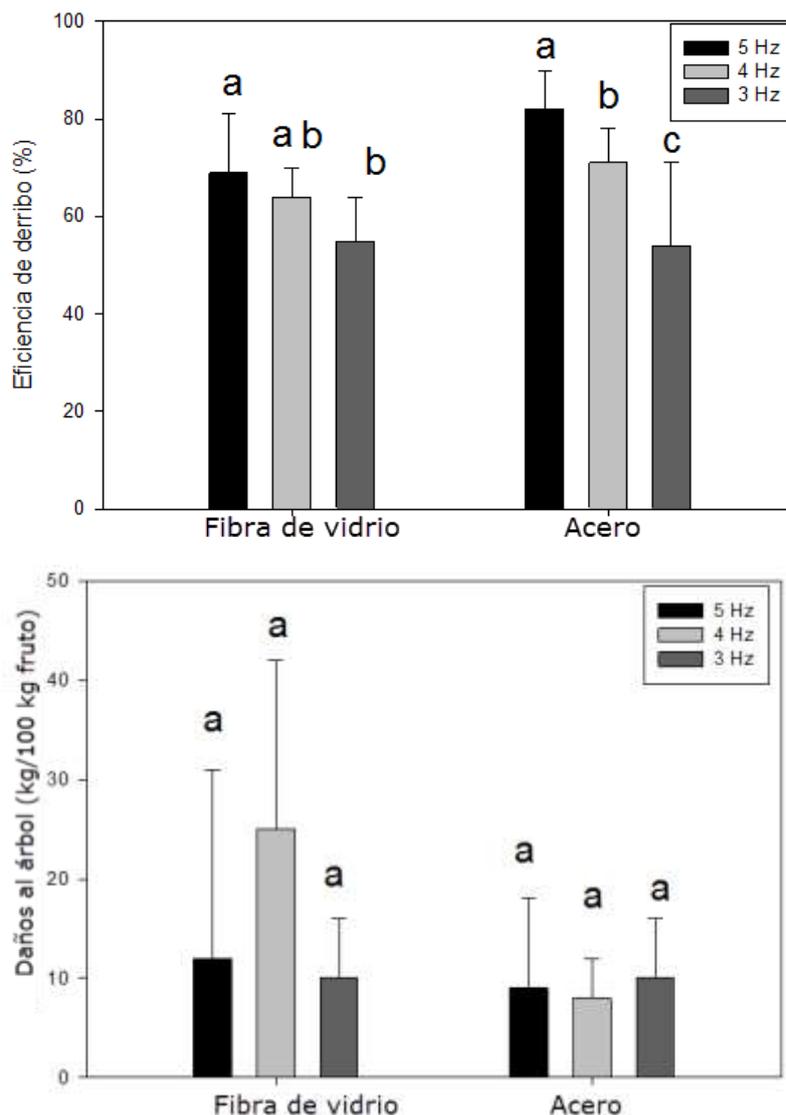


Figura 110. Prototipo SAMOLIV 0. Evaluación de daños y eficiencia de derribo en función de la frecuencia de sacudida y material de varas. Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las frecuencias ensayadas según la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis

El análisis univariante de los factores de material de varas y velocidad de avance se muestra en la Tabla 26 y 27. No se ha conseguido obtener resultados significativamente diferentes en función del material de las varas empleado, a pesar de que el derribo obtenido con las varas de acero es superior al obtenido con las varas de fibra. Tampoco se han obtenido resultados significativamente diferentes en función de la velocidad de avance de la máquina. Este hecho puede deberse, aparte de a los factores mencionados para el material de las varas, al reducido intervalo de velocidades empleado, si se aumentase la diferencia entre las velocidades ensayadas, podrían observarse algunas diferencias. No ha sido posible ensayar velocidades de avance más altas, ya que el poco espacio disponible para la circulación de la máquina limitaba este

parámetro. Por otra parte, una velocidad de avance más lenta limitaría en gran medida la capacidad de trabajo de la cosechadora, por lo tanto tampoco resulta interesante.

Tabla 26. Prototipo SAMOLIV Evaluación de daños y eficiencia de derribo en función del material de varas. Valores muestran la media± desviación típica. Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba U de Mann-Whitney

Factor		Eficiencia de derribo (%)	Daños (kg daños 100 kg fruto ⁻¹)
Material	Fibra de vidrio	60 ± 17 a	18 ± 15 a
	Acero	69 ± 16 a	9 ± 7 a

Tabla 27. Prototipo SAMOLIV Evaluación de daños y eficiencia de derribo en función de la velocidad de avance. Valores muestran la media± desviación típica. Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba U de Mann-Whitney

Factor		Eficiencia de derribo (%)	Daños (kg daños 100 kg fruto ⁻¹)
Velocidad de	0,75	70 ± 20 a	9 ± 7 a
avance(km h ⁻¹)	1,5	67 ± 12 a	9 ± 7 a

Los valores de eficiencias de son relativamente bajos en relación con otros sistemas de recolección, pero hay que tener en cuenta la dificultad de derribo de la aceituna en el momento del ensayo, con una relación FRF/peso de 2 N g⁻¹, y un índice de madurez de 3,92. También es necesario reseñar que la actuación de un único módulo sobre la estructura del árbol genera una sacudida de menor energía que la actuación de un sacudidor de copa completo, por lo que los valores de eficiencia de derribo son inferiores a los que podrían obtenerse con una máquina con más módulos. Existe margen de mejora en la máquina, debido a la separación entre los conjuntos de varas, que es posible reducir debido a la simplificación alcanzada en el diseño.

No se han encontrado diferencias entre los daños producidos al árbol en función de la frecuencia de funcionamiento ni en función del material de las varas. Este parámetro depende más de la trayectoria de la máquina, la adaptación de los árboles a la sacudida y penetración del tambor en el follaje del árbol. Los daños son superiores a los que realiza un vibrador de troncos sin vareo complementario, que puede oscilar entre 1 y 5 kg por cada 100 kg de fruto derribado, ya que los árboles no están adaptados por medio de la poda a la recolección mecánica con sacudidores de copa. Sin embargo, son inferiores a los que se producen con el empleo de un vibrador de troncos acompañado de vareo, que suelen oscilar entre 15 y 30 kg por cada 100 kg de fruto derribado.

En la Tabla 28 y 29 se muestra el análisis de aceleraciones registradas en el árbol según el tiempo total y acumulado por encima de ciertos umbrales, conjuntamente con el número de picos o impactos de la señal, para el material de varas y bajo el resto de factores estudiados.

Tabla 28. Prototipo SAMOLIV. Análisis de señales de aceleración registrados en ramas para el material de varas acero. Valores muestran la media± desviación típica

Vel.	Frec. (Hz)	Tiempo total (s)	Número de picos de aceleración de aceleraciones			Tiempo acumulado(ms) con valores de aceleración		
			> 200 m s ⁻²	> 400 m s ⁻²	> 600 m s ⁻²	> 200 m s ⁻²	> 400 m s ⁻²	> 600 m s ⁻²
0,75 km h ⁻¹	3	13 ± 3	68 ± 63	9 ± 8	5 ± 4	28 ± 29	4 ± 4	2 ± 2
	4	17 ± 3	82 ± 63	18 ± 21	6 ± 8	27 ± 20	6 ± 7	2 ± 3
	5	19 ± 8	482 ± 399	100 ± 89	33 ± 31	161 ± 133	33 ± 30	11 ± 10
1,5 km h ⁻¹	3	13 ± 1	191 ± 102	22 ± 15	5 ± 6	64 ± 34	7 ± 5	2 ± 3
	4	10 ± 0	86 ± 28	27 ± 18	11 ± 9	29 ± 9	9 ± 6	4 ± 3
	5	13 ± 2	294 ± 268	62 ± 56	32 ± 40	98 ± 89	21 ± 19	11 ± 13

Tabla 29. Prototipo SAMOLIV. Análisis de señales de aceleración registrados en ramas para el material de varas fibra de vidrio. Valores muestran la media± desviación típica

Vel.	Frec. (Hz)	Tiempo total (s)	Número de picos de aceleración de aceleraciones			Tiempo acumulado(ms) con valores de aceleración		
			> 200 m s ⁻²	> 400 m s ⁻²	> 200 m s ⁻²	> 400 m s ⁻²	> 200 m s ⁻²	> 400 m s ⁻²
0,75 km h ⁻¹	3	13 ± 6	86 ± 92	19 ± 19	5 ± 5	187 ± 176	41 ± 36	12 ± 10
	4	13 ± 3	24 ± 22	6 ± 9	3 ± 4	71 ± 64	18 ± 25	9 ± 13
	5	14 ± 1	184 ± 216	45 ± 59	16 ± 22	552 ± 650	134 ± 178	47 ± 66
1,5 km h ⁻¹	3	15 ± 6	51 ± 83	10 ± 18	4 ± 6	152 ± 252	32 ± 56	10 ± 18
	4	18 ± 1	28 ± 7	5 ± 2	1 ± 1	84 ± 21	13 ± 7	3 ± 3
	5	21 ± 3	104 ± 58	16 ± 16	3 ± 3	295 ± 197	41 ± 49	8 ± 9

El tiempo de vibración medio para una velocidad de 0,75 km h⁻¹ ha sido de 16 s frente a los 12 s para una velocidad de 1,5 km h⁻¹. El aumento de frecuencia ha implicado mayores niveles de aceleración y durante un tiempo mayor. Se observa un número de picos muy reducido a partir de valores de aceleración por encima de 400 m s⁻², lo que ocasiona un tiempo acumulado asociado a su valor muy reducido. Existe un mayor tiempo de vibración con velocidad baja. El número de picos en que la aceleración está por encima de los umbrales de estudio (200, 400 y 600 m s⁻²) es mucho mayor con el material de acero, lo que aconseja utilizar materiales rígidos

para conseguir mayores tiempos acumulados de aceleraciones altas junto con impactos con elevados niveles de aceleración.

1.4.2.2 PROTOTIPO DE DERRIBO COMPLETO (SACOLIV)

1.4.2.2.1 Diseño

Para el estudio de un sistema de derribo completo se diseñó un dispositivo experimental con un mecanismo (Figura 111) basado en SAOLIV 2.1.1 que conecta a 6 tambores de derribo, con un sistema biela-manivela y un único cigüeñal. El mecanismo permite que los tambores se muevan con un movimiento lineal alternativo con una amplitud desde 120 a 170 mm (en función de la regulación del cigüeñal). Para conseguir un movimiento alternativo de los tambores suave, con aceleraciones en vacío con forma senoidal, se ha dimensionado la relación biela-manivela (λ) de tal manera que minimice el segundo término de la Ec.24 (Rajbarkohan, Rasekh, Hosani & Asadi, 2011) con una longitud de la biela de 1,715 m y una amplitud de 0,017m. Dicha configuración consigue un ajuste cuadrático 0,998 con respecto a una señal senoidal.

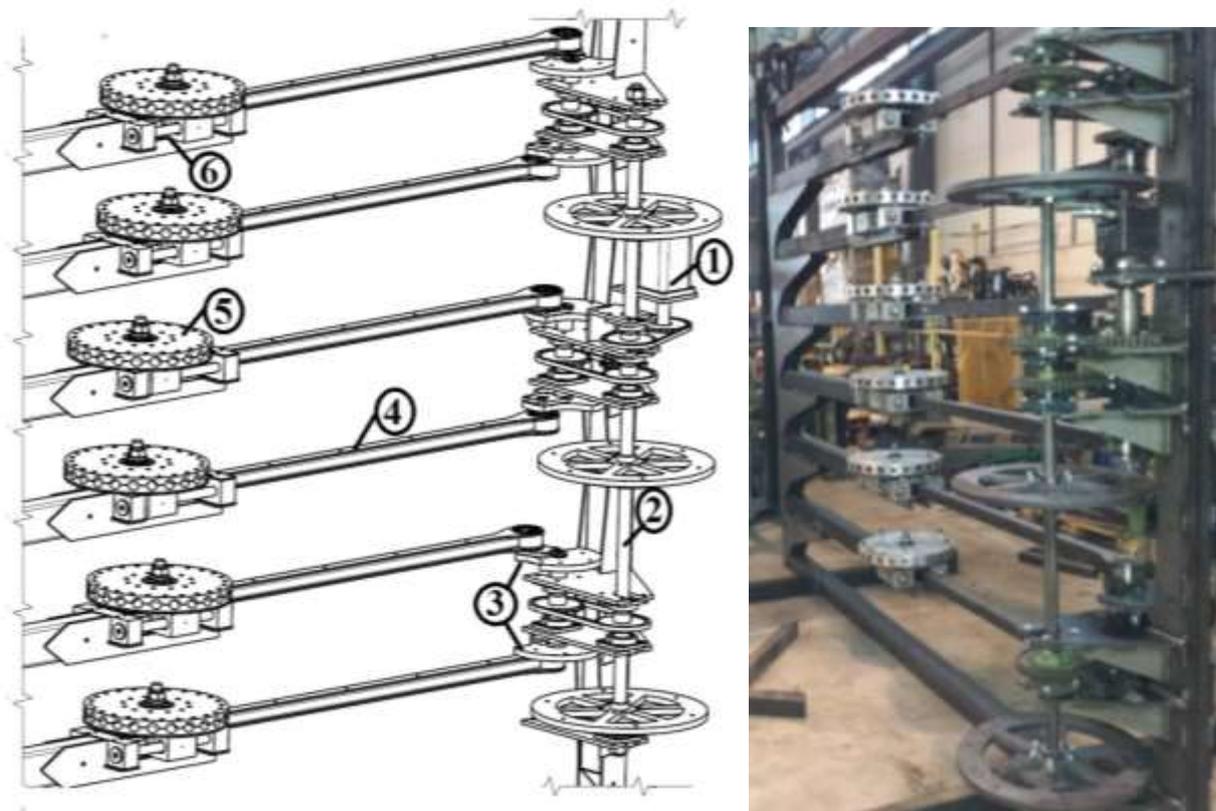


Figura 111. Prototipo SACOLIV. Representación del mecanismo y sus distintas partes: Motor de accionamiento (1), cigüeñal de transmisión (2), grupos de manivelas conectadas (3), biela de gran longitud (4), tambores de varas (5), correderas lineales (6)

El cigüeñal está constituido por seis manivelas desfasadas 120° unidas a un eje principal dotado de tres volantes de inercia. El cigüeñal está movido por un motor orbital de 200 cm^{-3} (Danfoss, OMS 200) capaz de trabajar en frecuencias de excitación comprendidas entre 0,5 y 8 Hz, derivadas de su régimen de giro máximo que obtiene la potencia hidráulica de las tomas remotas de un tractor. Cada una de las manivelas se conecta a una biela. En los extremos o cabezas de la biela se encuentran unos tambores que deslizan sobre unas correderas lineales. Los tambores pueden albergar hasta 24 varas, colocadas en una disposición radial, encargadas de transmitir el movimiento a las ramas. Las varas utilizadas fueron metálicas con un perfil cilíndrico de 32 mm de diámetro y 2 mm de espesor que aportan la suficiente rigidez y frecuencia natural elevada para transmitir las aceleraciones de manera efectiva. La longitud de las varas fue de 1,4 m para alcanzar la mayoría del fruto localizado mayoritariamente en la parte exterior de la copa del árbol. Para permitir una recolección en continuo con una correcta velocidad de avance sin producir importantes daños en ramas (Figura 112), los tambores portavaras disponían de un movimiento de giro libre. Cada tambor, estaba colocado uno sobre otro en un mismo plano vertical y separados 0,4 m consiguiendo alcanzar una gran superficie de contacto para grandes copas, situando el tambor más inferior a 1m del suelo para llegar a las ramas más bajas del árbol y permitir alojar una estructura de recepción. El mecanismo de derribo estuvo alojado sobre un chasis o plataforma de ensayos con cuatro ruedas autogiratorias y arrastrada por un tractor (Figura 112).



Figura 112. Prototipo SACOLIV recolectando de un olivo tradicional

.1.4.2.2.2 Evaluación

La evaluación del prototipo se realizó a través de su eficiencia de derribo, índice de daños al árbol, localización del fruto derribado y aceleraciones registradas en el árbol, en función de los factores amplitud (A) (120 y 170 mm), frecuencia (F) (4 y 5 Hz), densidad de varas (D) (12 y 24) y velocidad de avance (S) (0,5 y 1 km h⁻¹), comparando de manera independiente los valores altos (high) de cada factor con respecto a una configuración con todos los factores en su nivel más bajo (low) (A0F0D0S0). Los resultados de eficiencia de derribo e índice de daños se muestran en la Figura 113.

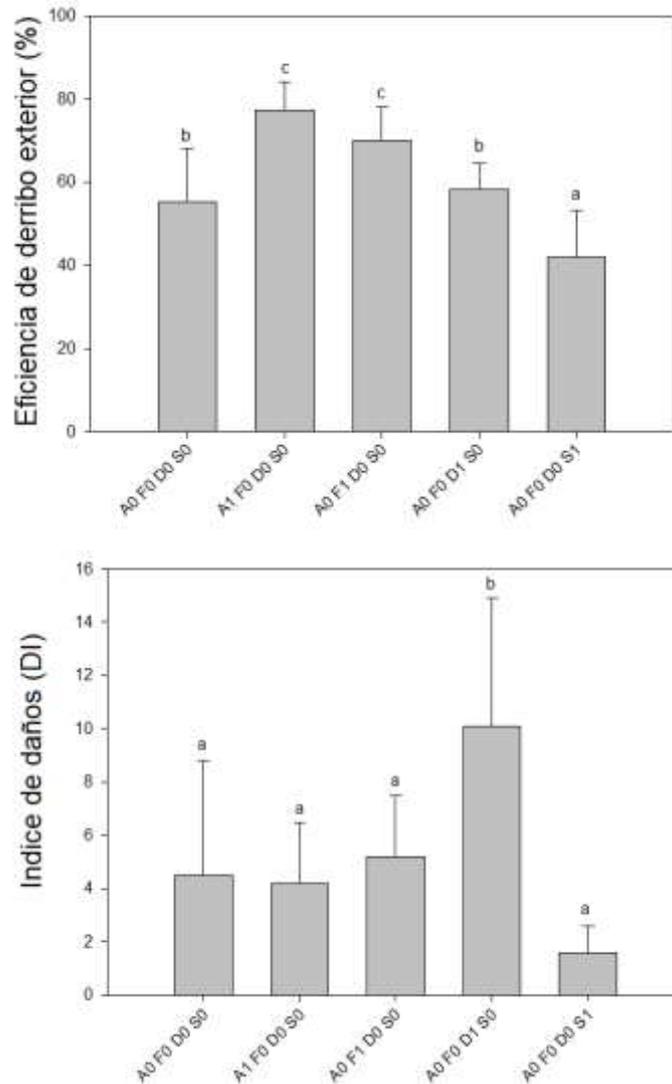


Figura 113. Prototipo SACOLIV. Evaluación de la eficiencia de derribo exterior (arriba) e índice de daños (abajo) con los diferentes configuraciones ensayadas. Letras similares muestran diferencias no significativas (Duncan's post-hoc test, $p < 0.05$). A: Amplitud, D: Densidad de varas, F: Frecuencia, S: Velocidad de avance. 0 (valor en nivel low) and 1 (valor en nivel high). A0F0D0S0 es la configuración de referencia

Los factores más influyentes en la eficiencia de derribo fueron la amplitud y la frecuencia. El incremento de frecuencia y amplitud fue significativo obteniendo valores de 70,0 a 77,3% respectivamente. Esta variación se produjo sin incrementar significativamente los daños ocasionados por rotura de ramas. El nivel de amplitud high ocasionó mayores niveles de derribo exterior. Otros sistemas como vibradores de troncos o ramas operan en rangos de frecuencia alta y desplazamientos bajos (Parameswarakumar & Gupta, 1991) para obtener el máximo derribo con los mínimos daños, mientras que el sistema de sacudida de copa lo hace en rangos de frecuencia bajo y desplazamientos mayores (Torregrosa, Cuenca & Ortiz, (2012). En este sentido, la aplicación directa de la vibración en las ramas es más favorable frente a su aplicación

en el tronco pues es difícil transmitir la energía de derribo lejos de la fuente de excitación. Además, la respuesta del árbol para el derribo de los frutos depende de la ubicación de estos y su distancia a la aplicación de la vibración (Bora, Ehsani, Hebel & Lee, 2007; Zhou, He, Zahng & Karkee, 2014).

La modificación de la densidad de varas no consiguió incrementar los valores de eficiencia de derribo respecto de los valores de referencia, pero el índice de daños se incrementó significativamente ($p < 0.05$) de 4,5 a 10,1 (Figura 113). Esto puede ser debido a que al tener menor distancia entre varas, existe menos espacio para que las ramas tengan desplazamientos libres que no produzcan su rotura.

Un número de varas reducido resultó eficaz para transmitir aceleraciones e impactos a la copa de árboles de secano aunque este fenómeno es complejo porque depende de varios factores como la geometría, la cantidad, localización y resistencia de las ramas (Upadhyaya & Cooke, 1981), donde los frutos sufren proceso de torsión, tracción y fatiga (Ruiz-Altisent & Ortiz-Canavate, 1999). El incremento en el número de varas no implica mayor derribo del fruto porque produzca por el contacto directo vara-fruto (Castro-García *et al.*, 2009), sino que puede ser explicado por la naturaleza y dirección de las fuerzas resultantes en las ramas (Savary, Ehsani, Salyani, Hebel & Bora, 2011). Sin embargo, la probabilidad de impactar los frutos con las varas durante el proceso de sacudida y caída libre puede ser causa del aumento de daños en los frutos recogidos con especial importancia en la reducción de la calidad de la aceituna de mesa (Jiménez-Jiménez, Castro-García, Blanco-Roldán, Gonzáles-Sánchez & Gil-Ribes, 2013).

El incremento de la velocidad de avance, mostró un efecto negativo y de gran importancia en la eficiencia de derribo ocasionando una caída de los valores a 42,0% respecto a los valores de referencia. El menor tiempo de sacudida de la copa del árbol produjo que quedaran mayor número de frutos sin derribar. Sin embargo, al aumentar la velocidad de avance se redujo el número de daños aunque esta cantidad no fue significativa. Sin embargo, la reducción de reducción de la velocidad de avance tiene un efecto negativo sobre la capacidad de trabajo del prototipo y puede ocasionar que la recolección mecanizada tenga menor interés económico (Shamshiri, Ehsani, Maja & Roka, 2013)

Por tanto, los resultados sugieren que diferentes combinaciones de alta frecuencia, alta amplitud y baja velocidad de avance, incrementan la eficiencia de derribo manteniendo niveles de daños similares. No obstante, la existencia de otros factores que afectan la recolección

mecanizada como la estructura del árbol y fruto (El-Awady, Genaidy, Rashowan & El-Attar, 2008), conlleva a que se necesiten ajustar dichos valores en función de los parámetros de la plantación.

Con la configuración de referencia, hubo una gran cantidad de fruto ($44,8 \pm 12,8\%$) que no fue derribado en la parte exterior del árbol con respecto a la producción en la parte exterior de la copa. Esta cantidad varió en función del factor modificado aunque permaneció en valores altos debido a la falta de contacto del dispositivo de derribo con la copa por la trayectoria de trabajo y por la carencia de un sistema que permitiera aproximar el mecanismo de excitación a las irregularidades de las grandes copas de los árboles (Tombesi, Boco, Pilli & Farinelli, 2002). Esta dificultad podría ser superada al incluir un sistema de aproximación del mecanismo de excitación al árbol que asegure el contacto permanente de las varas con las ramas fructíferas durante el movimiento del sacudidor de copa (Ferguson *et al.*, 2012) o mediante la adaptación de la forma del árbol (Roka & Rouse, 2004).

La cantidad de fruto ($13,2 \pm 6,7\%$) que quedó en el interior de los árboles con respecto a la producción después de la sacudida en la configuración de referencia fue debida a que las varas del sistema no pudieron penetrar más profundamente en la copa influenciado en gran parte por la falta de adaptación de la estructura del árbol por sistemas de poda. Este porcentaje permaneció constante ($\pm 4\%$) durante la modificación los factores de ensayo debido a la gran amortiguación de aceleración existente en las ramas de los árboles (Savary, Ehsani, Maja & Roka, 2010).

El sistema de derribo permitió que el $65,5 \pm 6,8\%$ de los frutos derribados tuvieran una caída vertical localizándose en el área cubierta por las varas (zona 1). La transmisión de la vibración en la copa del árbol junto con la interacción de los frutos con las ramas y la proyección de los mismos produjo que un $10,3 \pm 3,7\%$ de los frutos se recogieran, en la parte delantera de la superficie de interceptación (zona 2). La elevada cantidad de fruto recogido en la zona 2 puede deberse a aquellos frutos con reducidas fuerzas de retención que son más fácilmente desprendibles y a la baja densidad de la copa de cultivos de secano que permiten elevadas distancias de rebote en la caída de frutos de reducido tamaño. La parte posterior del mecanismo de excitación (zona 3), recogió un $4,9 \pm 2,4\%$ de los frutos, consecuencia del tiempo requerido durante la caída e interacción de los frutos con la copa del árbol (Kouraba, Gil-Ribes, Blanco-Roldán, Jaime-Revuelta & Barranco-Navero, 2004). La zona situada entre el mecanismo de excitación y el tronco del árbol (zona 4), interceptó $19,3 \pm 10,5\%$ de los frutos que, proceden de los derribados por transmisiones de la vibración en las ramas, por procesos rebote en la caída y

por la proyección de los frutos por las varas de sacudida. La cantidad de fruto derribado y no interceptado por la superficie de interceptación fue medido y resultó despreciable.

Un valor importante para la recolección integral de un sacudidor de copa es la capacidad de interceptación del fruto derribado por una superficie de tamaño apropiado al sistema de recolección, para conseguir elevados valores de derribo en cantidad y calidad del producto final reduciendo costes (Ferguson, 2006). Los resultados muestran que el sistema de derribo SACOLIV sería válido como sistema integral añadiendo una superficie de interceptación. La trayectoria del fruto derribado fue vertical evitando proyecciones excesivas y fue debida al movimiento del sistema lineal alternativo y cruzado entre las distintas varas, que ocasionó un proceso de fatiga. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en la localización del fruto derribado.

Durante el proceso de sacudida, el árbol responde de manera diferente a excitaciones en el árbol, y el derribo del fruto sucede cuando las fuerzas exceden de la retención del fruto en el pedúnculo. Diversos autores muestran la importancia de otros factores diferentes a la aceleración resultante. En este sentido, los sacudidores de copa muestran patrones de vibración singulares (Sola-Guirado *et al.*, 2014). La Tabla 30 muestra los resultados del análisis de las señales temporales de aceleración registradas en ramas en función de las diferentes configuraciones ensayadas en SACOLIV.

Tabla 30. Prototipo SACOLIV. Análisis de señales de aceleración registrados en ramas para diferentes configuraciones. A: Amplitud, D: Densidad de varas, F: Frecuencia, S: Velocidad de avance. 0 (valor en nivel low) and 1 (valor en nivel high). A0F0D0S0 es la configuración de referencia. Valores muestran la media± desviación típica. Letras similares en la misma columna muestran diferencias no significativas (Duncan's post-hoc test, $p < 0.05$)

Configuración	Tiempo de sacudida (s)	Tiempo acumulado de sacudida por encima de valores de aceleración		Número de impactos con Aceleración $\geq 200 \text{ m s}^{-2}$
		$\geq 40 \text{ m s}^{-2}$	$\geq 200 \text{ m s}^{-2}$	
A0F0 D0 S0	32,67 ± 7,02 a	4,60 ± 2,44 ab	0,21 ± 0,26 a	32,29 ± 28,94 a
A1 F0 D0 S0	28,22 ± 6,52 a	4,71 ± 2,31 ab	0,26 ± 0,17 a	35,67 ± 13,65 a
A0 F1 D0 S0	36,63 ± 8,99 a	7,33 ± 3,05 b	0,41 ± 0,49 a	43,00 ± 20,03 a
A0 F0 D1 S0	28,41 ± 6,64 a	6,02 ± 3,11 b	0,37 ± 0,29 a	42,44 ± 17,10 a
A0 F0 D0 S1	16,14 ± 1,24 b	1,77 ± 1,43 a	0,05 ± 0,03 a	20,33 ± 15,50 a

El análisis de aceleraciones efectuado podría ayudar a describir parte del proceso de derribo. Se encontraron correlaciones significativas entre la eficiencia de derribo de fruto y el tiempo total de vibración junto con el tiempo acumulado de aceleración por encima de 40 m s^{-2} con un coeficiente de Pearson de 0,342 y 0,321 respectivamente. El resto de valores expresados en el análisis de la Tabla 30 no pudieron explicar su influencia en el proceso de sacudida debido a la alta dispersión en los resultados. Esta dispersión podría estar ocasionada por la variabilidad de otros parámetros inherentes a la plantación como la estructura de las ramas de los árboles o las irregularidades de la copa (Camposeo, Vivaldi & Gattullo, 2013) y la falta de contacto debido a la inexistencia de un sistema de aproximación en el mecanismo.

Los impactos con valores de aceleración superiores a 200 m s^{-2} fueron similares entre las diferentes modificaciones de los factores ensayados. Esto parece indicar que la eficiencia de derribo y los daños no aumentan por valores puntuales o instantáneos de aceleración resultante en las ramas. Sin embargo, aunque las diferencias no fueron significativas debido a la alta dispersión de los resultados, es notable que el número de impactos en las ramas fue mayor al aumentar la densidad de varas, elevar la frecuencia y disminuir la velocidad de avance. Los valores más altos de tiempo acumulado en que la aceleración supera los umbrales de aceleración establecidos, fueron obtenidos cuando se incrementó la frecuencia, aunque no se encontraron diferencias significativas entre cada tratamiento debido a la alta dispersión de los resultados.

Las señales registradas en las ramas reflejan un patrón de sacudida con aceleraciones muy altas o impactos con una duración muy breve (Figura 114). La importancia de los impactos en las ramas y en frutos maduros fue es muy importante en el proceso (Abounajmi, 2000). El factor de la velocidad de avance está altamente relacionado con el tiempo acumulado en que las ramas están vibrando. Según Kouraba *et al.* (2004) el tiempo de sacudida es uno de los principales parámetros para conseguir altas eficiencias de derribo. La cantidad de frutos no recolectados del árbol y la probabilidad de una insuficiente duración para recolectarlos crece exponencialmente cuando los impactos en el árbol decrecen (Mateev & Kostadinov, 2004). Sin embargo, la reducción en la velocidad de avance perjudica a la capacidad de trabajo (Castillo-Ruiz, Pérez-Ruiz, Blanco-Roldán, Gil-Ribes & Agüera-Vega, 2015) por lo que incrementa los costes de recolección. Estos resultados sugieren un mayor derribo de fruto con más impactos reduciendo la velocidad de avance o incrementando la frecuencia de sacudida.

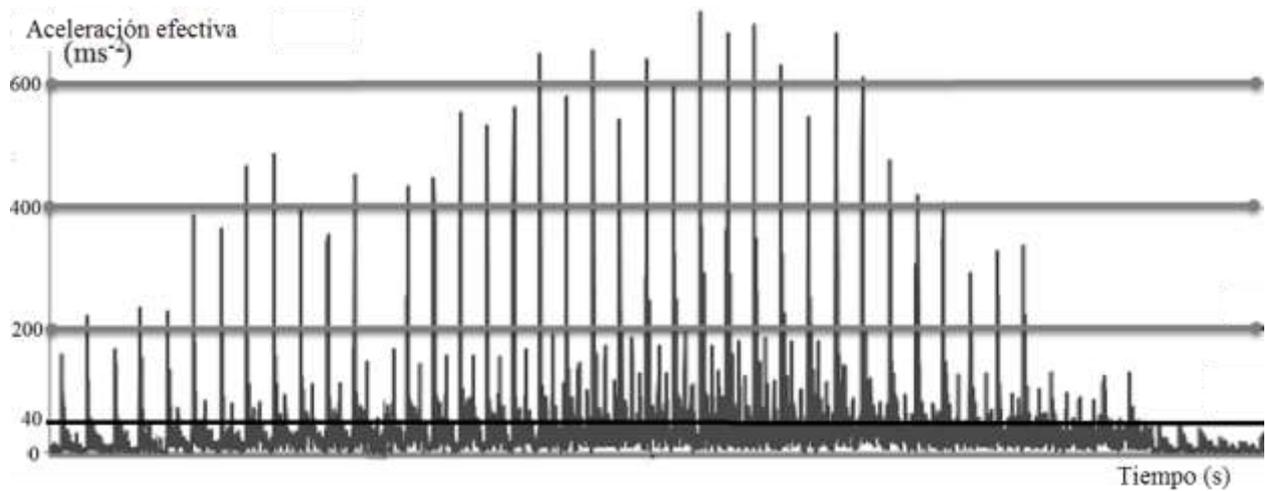


Figura 114. Prototipo SACOLIV. Señal temporal de aceleración eficaz (valores absolutos) en ramas

Del estudio del prototipo SACOLIV se puede extraer la conclusión de que la recolección mecanizada solo será realizada de manera satisfactoria cuando las características de los árboles y la plantación junto con el diseño y parámetros de la máquina sean integrados en un sistema. En este sentido, es necesario mantener un alto contacto entre la copa del árbol y el sistema de derribo mejorando la adaptación de la máquina mediante sistemas modulares o un sistema de aproximación.

1.4.3 Estudio de los elementos de sacudida del sistema de derribo.

1.4.3.1 Momento de inercia y control del giro.

Los resultados obtenidos en el ensayo mostraron diferencias en las aceleraciones eficaces en vacío en el tambor de varas del prototipo SAOLIV 2.1.1 a medida que aumenta la frecuencia del sistema, aunque no existen diferencias significativas en el aumento de la masa del elemento de golpeo o en el aumento del momento de inercia (Tabla 31).

Tabla 31. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Valores medios de aceleración eficaz medidos en el tambor en diferentes frecuencias

	Frecuencia (Hz)	1	2	3	4
Aceleración eficaz ($m\ s^{-2}$) en	tambor sin varas	4,08	9,48	16,41	30,34
	tambor con varas	5,20	8,97	13,22	-

En la Figura 115 se muestran los valores de fuerza de impacto en función de la frecuencia y el sistema de frenado. El aumento de la frecuencia del sacudidor supone un incremento de la fuerza de impacto de las varas. No existen diferencias significativas entre el sistema con freno o sin freno, aunque los mayores niveles de fuerza se registraron con el sistema sin frenar.

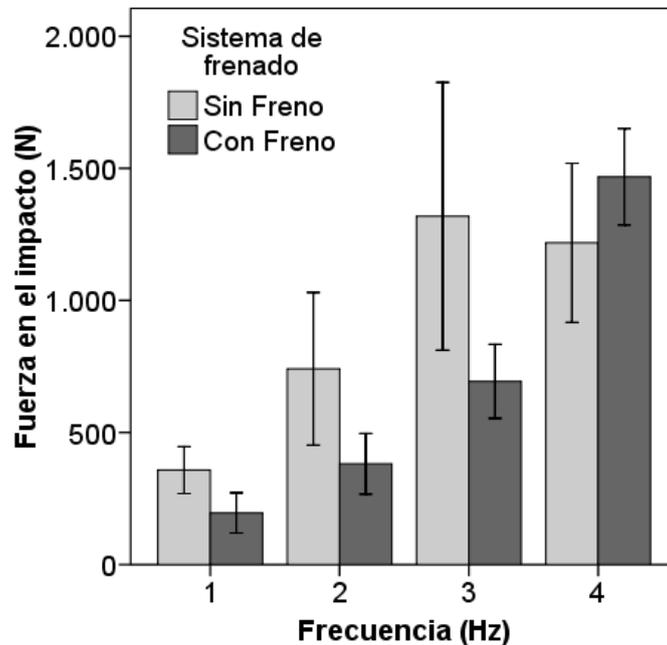


Figura 115. Prototipo SAOLIV 2.1.1 Fuerza de impacto de las varas del en función de la frecuencia y sistema de frenado usado

La gran dispersión de valores de fuerza registrados por el martillo puede deberse a diferencias en el modo de impacto con la configuración de frenado y giro libre del tambor. En el caso del tambor frenado, los impactos se producían en una posición determinada de la vara con respecto al martillo y vinculada a un punto de la carrera del cigüeñal, mientras que en el caso del giro libre, la posición de la vara estaba desvinculada de la carrera del cigüeñal y variaba a medida que impactaba con el martillo. Todo esto, es debido a que en el ensayo usando freno, el tambor no retrocedía cuando la vara impactaba en el martillo siendo la energía del impacto absorbida en forma de deformación elástica de la vara (Figura 116), mientras que en el ensayo usando giro libre, el tambor retrocedía considerablemente transformando la energía del impacto en una menor deformación elástica junto con una rotación del tambor (Figura 117).

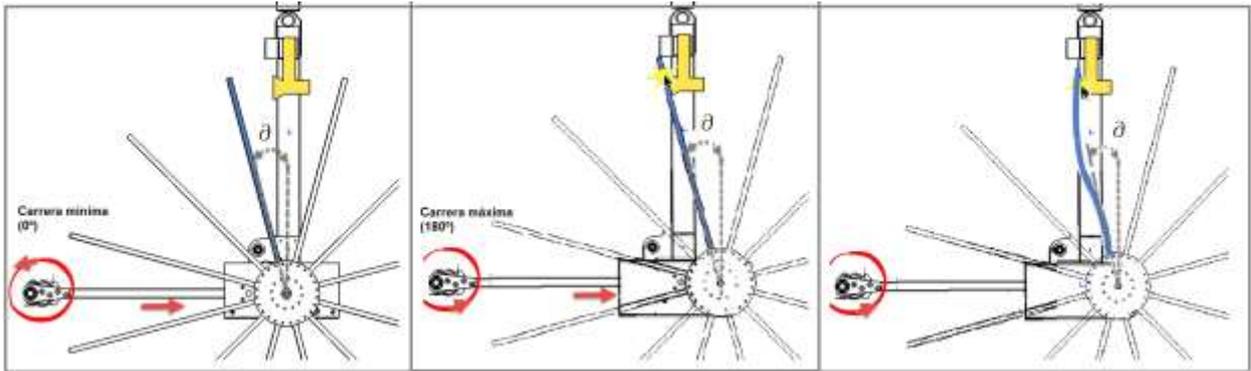


Figura 116. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Simulación del impacto de vara con martillo de impacto en diferentes instantes de tiempo con freno en el tambor

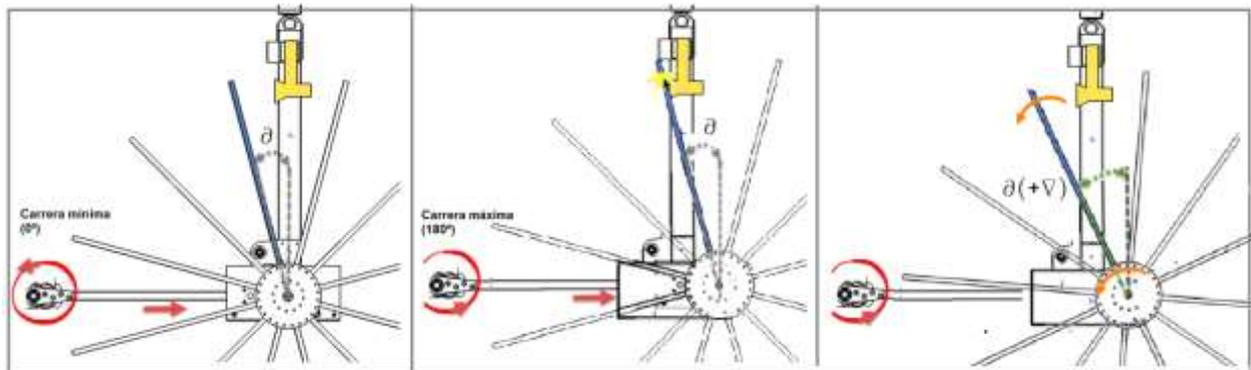


Figura 117. Prototipo SAOLIV 2.1.1. Simulación del impacto de vara con martillo de impacto en diferentes instantes de tiempo giro libre en el tambor

En la Figura 118 se muestran los valores de fuerza de impacto en función de la frecuencia y el número de varas del tambor (relacionado con la masa y momento de inercia del conjunto).

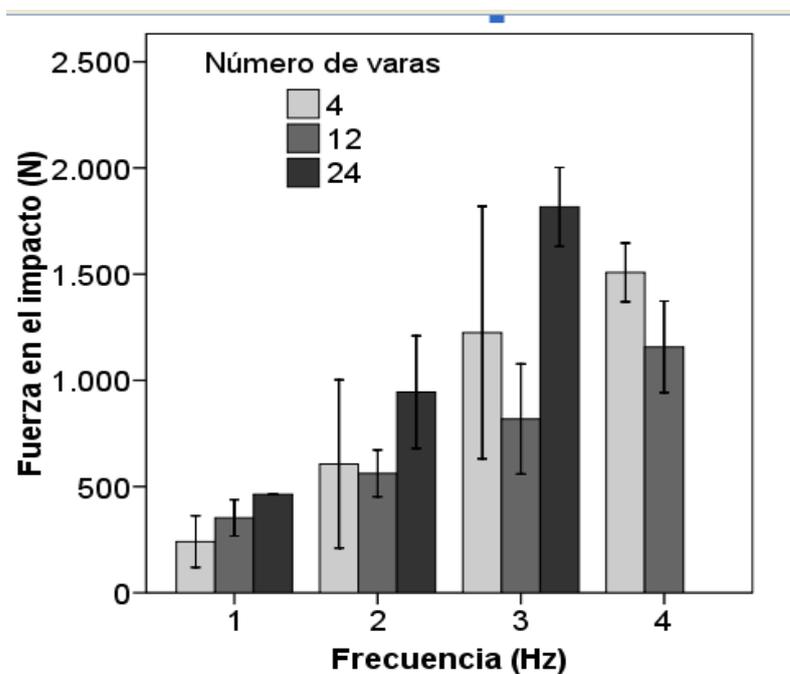


Figura 118. Prototipo SAOLIV 2.1.1 Fuerza de impacto de las varas del en función de la frecuencia y número de varas usados

Se puede intuir que el hecho de sacudir la copa con un tambor que permite el giro libre del tambor de varas con un hipotético momento de inercia nulo, daría como resultado una acción muy pequeña sobre las ramas de la copa del árbol, pero realmente no ocurre así por la masa e inercia del tambor y varas, que le confieren un momento resistente que impide que toda la energía se disipe en el giro libre del tambor.

Este fenómeno asociado a la aceleración del conjunto es el que permite transmitir la aceleración eficaz a las ramas para el desprendimiento de frutos. Por ello, cabe pensar que es conveniente aumentar notablemente la masa del sistema de sacudida para mejorar la transmisión de la vibración. No obstante, ello tendría dos efectos negativos: aumentar la complejidad, robustez y peso del mecanismo; y aumentar el número de daños en ramas del árbol al no permitir un aumento del momento de giro del tambor en el momento de los impactos. De esta manera, es necesario dimensionar el elemento tambor-varas para producir el mejor efecto para el derribo.

Las modificaciones llevadas a cabo en el ensayo, se han realizado modificando el número de varas del tambor. Teniendo en cuenta que el momento de inercia de un disco está relacionado directamente con la masa del conjunto y directamente relacionado con la posición de dicha masa con respecto al cuadrado de su distancia al centro geométrico, es importante destacar que no sólo el efecto de la masa prima en el tambor, sino su distribución con respecto al centro del tambor. Esta última premisa, lleva a pensar en la necesidad maximizar la masa del conjunto hacia el exterior y minimizar la del interior de tal manera que para un mismo momento de inercia se disminuya la masa total del tambor y varas. Esto se puede realizar con unas varas más pesadas y un tambor de material más ligero.

La masa y e inercia del conjunto dependen del diseño inicial del dispositivo, aunque permanecen constantes a lo largo del tiempo, pero no así la aceleración que está ligada al desplazamiento del cigüeñal. No obstante, el ciclo continuado del trabajo en el árbol permitirá que existan momentos donde se transmita la máxima aceleración de las varas al árbol.

1.4.3.2 Material, longitud y rigidez.

.1.4.3.2.1 ENSAYO A

Tras realizar parte de este ensayo se han obtenido los siguientes resultados:

- El material que puede resultar más acorde para su comportamiento en la sacudida del olivar es la fibra de vidrio reforzada con resina de poliéster, por su alta

resistencia al impacto, buen comportamiento en el mecanizado, y su alta capacidad para soportar tensiones de apriete en la zona de agarre de la vara. De igual manera, el acero presenta similares aptitudes por su gran rigidez aunque puede resultar más agresivo a la hora de ocasionar daños.

- Materiales como la fibra de carbono se han desechado por su fragilidad ante los impactos (Figura 119). Las varas de acero recubierto de goma y el híbrido acero-nylon, han sido desechados por su alto peso, que no se de conseguir un conjunto de tambor y varas ligero, y que conllevaría aumentar el peso total de la máquina perjudicando al trabajo en las condiciones en las que se ubica el olivar tradicional.
- Los materiales flexibles presentaron un valor de frecuencia natural cercano a 4 Hz y cercana a la frecuencia de trabajo en campo: Por ello, se podrían producir resonancias que ocasionen vibraciones indeseadas en el mecanismo. Además, la resonancia conjuntamente con las amplitudes que se observan en los extremos de las varas por sus deformaciones elásticas, no las hacen aptas para ser colocadas en un sistema de derribo al poder producirse colisiones con elementos colindantes.



Figura 119. Vara de fibra de carbono maciza rota en el ensayo de simulación de vareo

- La longitud que mejor se adapta a los objetivos buscados es de 1,4 m, con una zona de agarre de 0,09 m, por lo que la longitud útil de vara sería de de 1,31 m. Esta elección se ha hecho atendiendo al diámetro de los olivos tradicionales, ya que es fundamental garantizar la máxima penetración de las varas para alcanzar unos adecuadas eficiencias de derribo.

.1.4.3.2.2 ENSAYO B

Los valores de ángulos de los diferentes números de rebotes se muestran en la Figura 120 para las varas estudiadas.

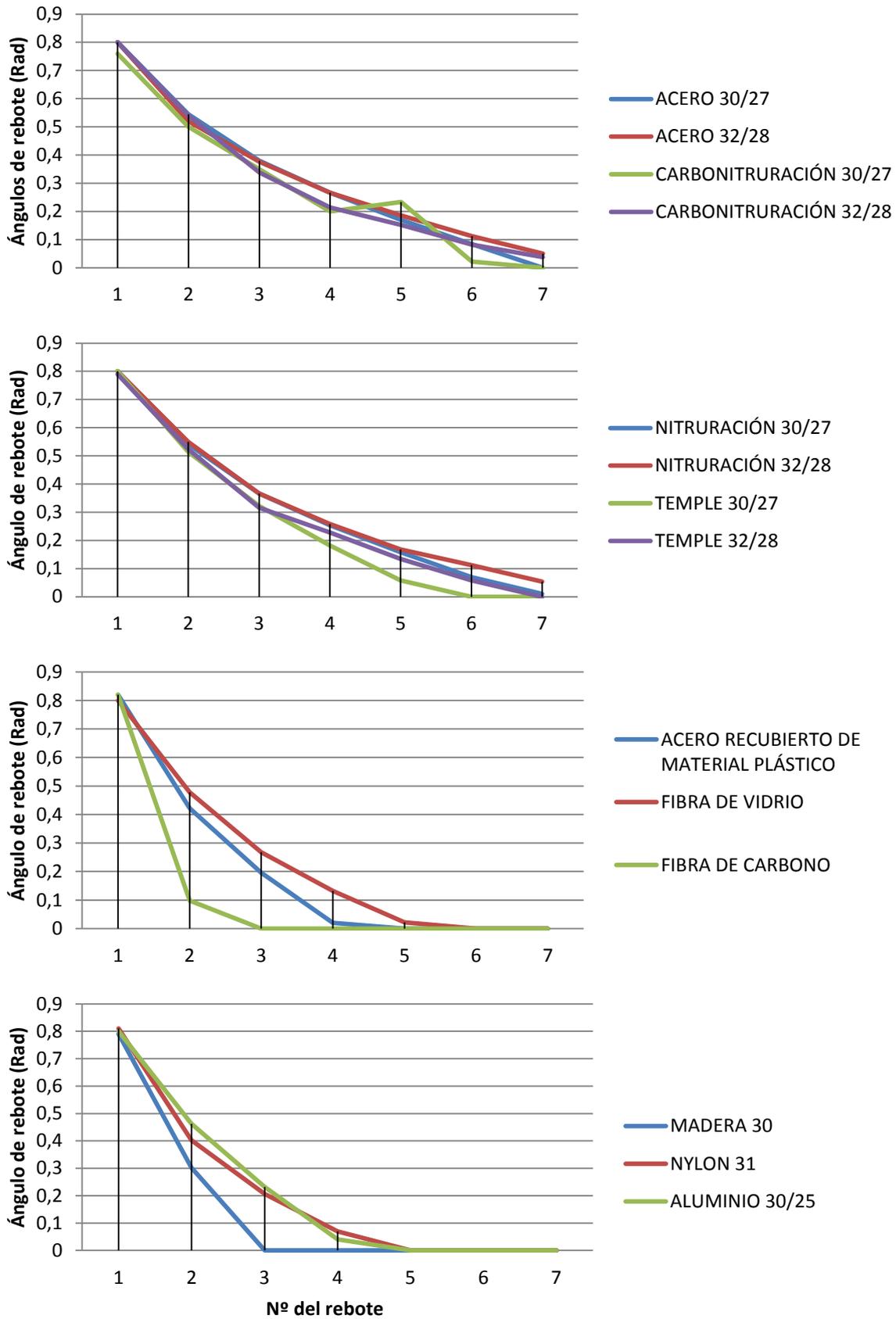


Figura 120. Ángulo de los diferentes rebotes efectuados por las varas con dispositivo de péndulo de impacto

El acero es el material que con mayor número de rebotes, mayor a 7, en sus diferentes tratamientos térmicos. Este valor denota la mayor rigidez de este material que puede ser efectiva para la transmisión de aceleración a las ramas sin grandes disipaciones de energía debidas a las deformaciones de las varas.

Entre los materiales estudiados diferentes al acero destaca la fibra de vidrio, por su gran resistencia teniendo en cuenta que también presenta una rigidez aceptable de la observación del número alto de rebotes efectuados. Se descarta el uso de fibra de carbono por su fragilidad y su baja rigidez. Materiales como la madera, nylon o aluminio han resultado mostrar un coeficiente de amortiguación más alto, sugiriendo no ser adecuados para transmitir la aceleración a las ramas del árbol.

El tratamiento de nitruración ofrece también es el tratamiento térmico del acero que mayor ángulo de rebote alcanza para sus dos secciones estudiadas. Por otro lado, el temple y la carbonitruración también han mostrado ángulos grandes de rebote. Sin embargo, la aplicación de los diversos tratamientos térmicos al acero provoca diferentes efectos en la geometría del material de varas final haciéndolo más o menos apto para su uso continuado en un sacudidor comercial. En este sentido, la nitruración de las varas de acero no han manifestado apenas deformación tras su aplicación, aunque sí se ha contemplado en mayor grado en el temple que además, puede favorecer acumular tensiones internas en el material que lleven a una rotura prematura en impactos. La carbonitruración ha resultado ser no un tratamiento no válido por manifestar alta fragilidad en la vara tratada.

Se observa que el aumento del perfil de las varas aumenta el ángulo de rebote en los diferentes configuraciones estudiadas, aunque las diferencias son pequeñas debido las pequeñas variaciones del parámetro. De este modo, es aconsejable mejorar la rigidez de la vara a través de la modificación de su perfil y no del material en sí.

Las diferencias observadas en el comportamiento de la aplicación de un tratamiento térmico son muy pequeñas en la mejora de la rigidez del material y no son equivalentes en proporción a las diferencia de precio y complejidad que conlleva su fabricación. Además, estos tratamientos aumentan la fragilidad del material acortando la vida útil de un perfil utilizado para impactos. Sin embargo, la introducción de elementos aleantes que mejoren la rigidez del material sería aconsejable para que las varas mejoren en el proceso de transmisión de aceleración, pero debe realizarse de tal modo que se aumente la dureza del material y su límite elástico para evitar la

deformación de la vara y su durabilidad. En este sentido, los materiales HSLA (High-Strength Low Allow) en perfiles comerciales tubulares pueden proporcionar una solución válida para un sistema sacudidor de copa.

Por otro lado, las magnitudes de los impactos registrados son totalmente proporcionales a la masa de la vara que impacta y a su rigidez de la misma. De esta manera, para conseguir un material rígido, elástico y ligero, se desprende la necesidad de utilizar un material de acero aleado y sin ningún tratamiento térmico que perjudica en su forma en perfiles tubulares de este tipo. Futura experimentación tratará de enfocarse a materiales HSLA con alto límite elástico y baja deformación.

1.5 *Desarrollo de un sistema de automatización de la aproximación del sistema de sacudida y el copiado a la copa del árbol*

En la Figura 121, se muestran los parámetros de evaluación del prototipo SAMOLIV (eficiencia de derribo y número de daños) en función de los modos de funcionamiento usados en el control automatizado de la aproximación del módulo al árbol.

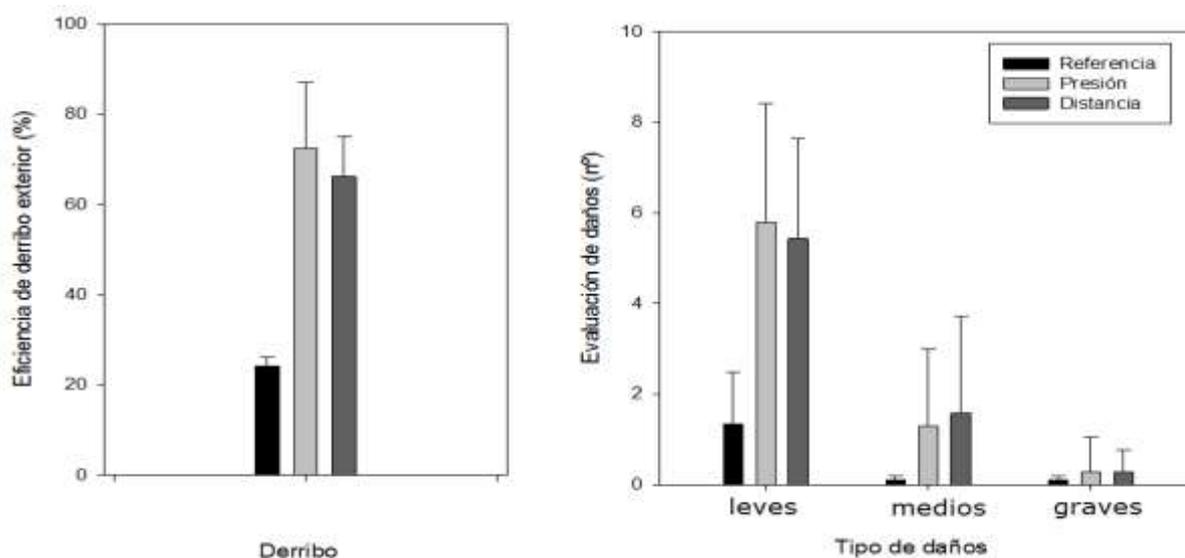


Figura 121. Comparativa general de eficiencia de derribo (arriba) y daños ponderados (abajo) para los ensayos de copiado automático realizados

El copiado de copa con el Modo de Referencia no causó daños prácticamente en el olivo obteniendo una eficiencia de derribo baja debido a que la falta de contacto bueno con un árbol al no disponer de aproximación suficiente. Esto demuestra el contorno teórico circular del árbol no existe prácticamente en ningún árbol de olivar tradicional. Esto resalta la importancia de un

sistema de aproximación adecuado conjuntamente con una poda que evite en lo posible las irregularidades de la geometría de la copa del árbol.

En los modos de funcionamiento de copiado automático (Modo Presión y Modo Distancia), la eficiencia de derribo aumentó considerablemente demostrándose que es necesario un sistema que mantenga el contacto permanente para conseguir unos resultados aceptables para la recolección. Sin embargo, este tipo de contacto deber ser evaluado, ya que en ambos modos provocaron mayores daños en el olivo pudiendo existir diferencias en la penetración de las varas en la copa (Figura 122).

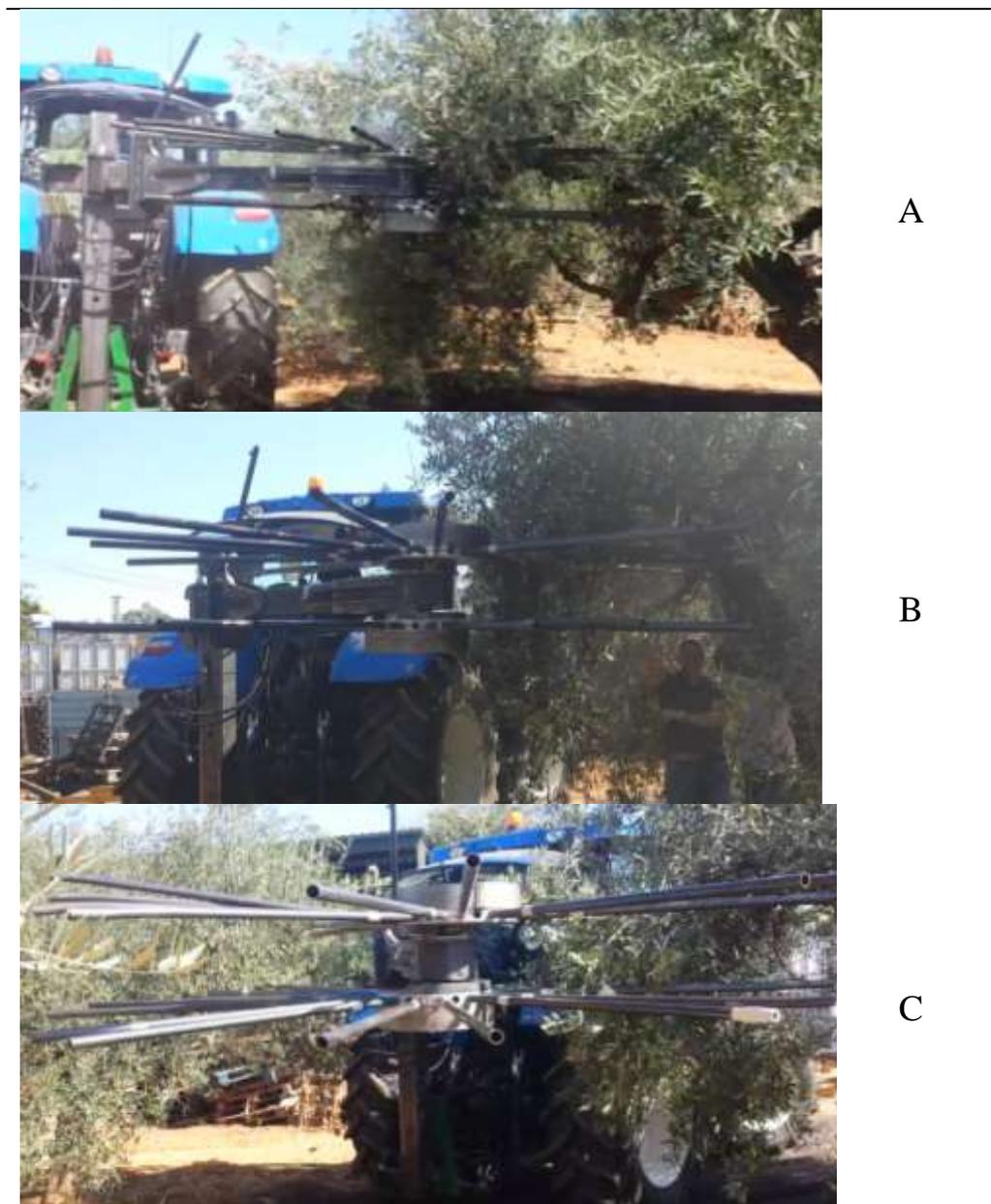


Figura 122. Distintas penetraciones del prototipo SAMOLIV en la copa del árbol. A: excesiva, B: correcta, C: insuficiente

El modo de funcionamiento que obtuvo mejores eficiencias de derribo fue el Modo Presión consiguiendo valores medios superiores al 72%. Los de daños ocasionados fueron altos, en muchos casos, debido a atranques entre las ramas y las varas en la transición de avance del prototipo, lo que sugiere, por un lado, un rediseño del tambor y densidad de varas, y por otro, una necesidad de poda del árbol. El Modo Distancia también mostró buenos resultados en de eficiencia de derribo (68% medios) aunque algo menor que el de Modo Presión. Los daños ocasionados fueron similares con menores daños leves pero mayores daños medios. Sin embargo, no existen diferencias significativas en la eficiencia de derribo ni en la evaluación de daños entre los modos automáticos, aunque sí con el Modo Referencia..

En el Modo Presión, el dispositivo de control mostró un buen comportamiento a nivel de lógica de control, con una rápida respuesta entre la entrada del sensor de presión y la salida del comando de aproximación-retroceso del cilindro hidráulico. El umbral de trabajo se seleccionó una franja de 20-30 bar por encima de la presión de trabajo del motor en su régimen en vacío (30 bar). De esta manera, el módulo aproximó correctamente cuando la presión fue menor a 50 bar y retrocedía en el momento que superaba 60 bar para evitar excesivos daños.

En el Modo Distancia, la medición de la copa con ultrasonidos pretendía utilizar la distancia medida relativa a la copa para situar el tambor de varas del módulo de sacudida en dicha posición, copiando el contorno de esa franja de copa, pero en su trabajo real presentaba algunos problemas para esta aplicación:

- Para medir una distancia fija, según el algoritmo diseñado, el sensor debía estar en una posición fija que no dependiera de la posición del módulo de sacudida en su movimiento de aproximación. Ello obligó colocarlo en la parte del mástil fijo cercana al tractor cercano al pivote del módulo. Al tener el punto de medición una posición más retrasada a la que pretendía copiar, se corrigió con un retraso de tiempo en la aproximación del módulo calculado como la relación entre dicha y la velocidad de avance del tractor. No obstante, existía un desfase de falta de sincronización entre la aproximación con respecto a la lectura del sensor debido a la dificultad de mantener una trayectoria circular constante y sobre todo, a que correcciones en la dirección del tractor conllevaban a movimientos bruscos en la posición del módulo de sacudida al estar suspendido sobre su tripuntal trasero.

- El sensor tiene una zona de medida ciega (zona mínima de medida del sensor) localizada entre 0 a 350 mm del sensor. La ubicación del sensor produjo que en multitudes ocasiones que las ramas se introdujesen en dicha zona falseando las lecturas y produciendo errores en el copiado.

Los resultados del estudio de los porcentajes de tiempos de vibración en que las medidas de las variables de control de los sensores utilizados, se encuentran dentro de los umbrales establecidos, se muestran en la figura 123.

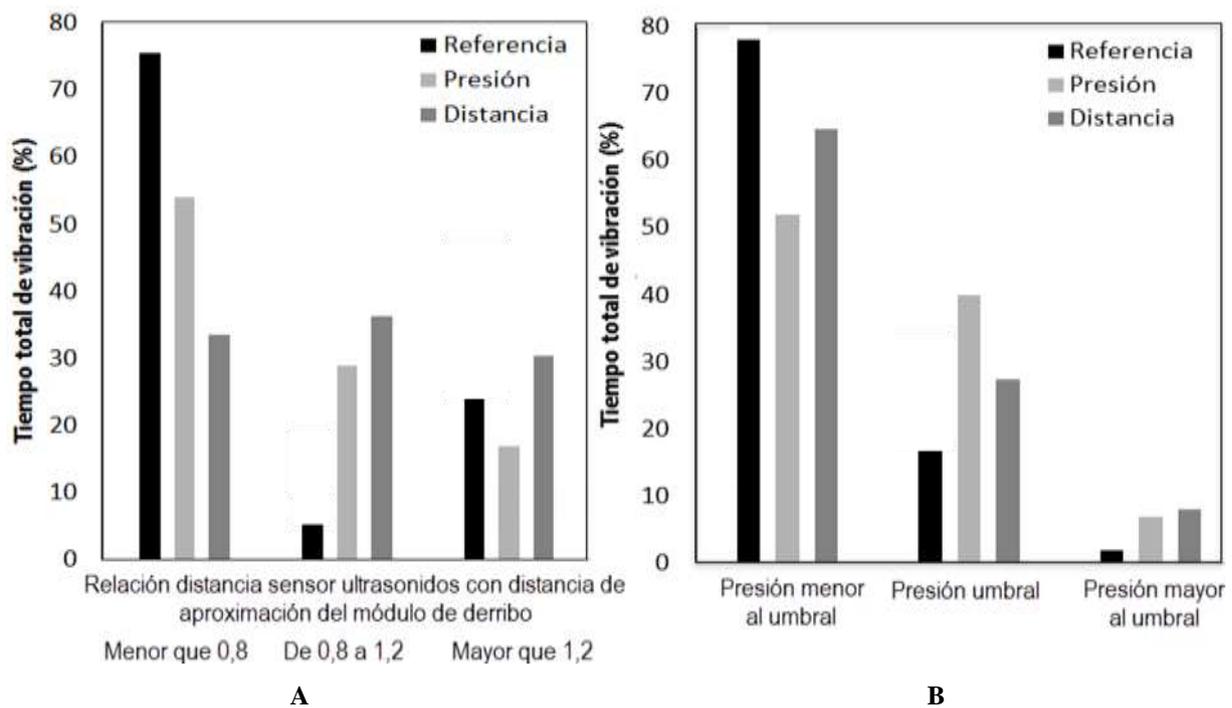


Figura 123. Prototipo SAMOLIV. Evaluación de diferentes modos de copiado automático de copa y de referencia. A: Porcentajes del tiempo total de vibración en que la relación entre la distancia medida con sensor ultrasonidos y con la distancia de la posición de aproximación del módulo de derribo dentro de los umbrales marcados. B: Porcentajes del tiempo total de vibración en que el sensor de presión registra valores superiores, iguales o inferiores al umbral de presión establecido

El Modo Distancia mantuvo la relación distancia del sensor ultrasonidos y posición de la aproximación más próxima a la unidad que el resto de modos (Figura 123 A), traducándose en un mayor porcentaje de tiempo copiando la copa en base a la distancia obtenida por sensor ultrasonidos, concretamente un 36% frente al 29% para el de Presión. Sin embargo, el porcentaje de tiempo en que se encuentra menor al 0,8 de esta relación es también alto, debido a los problemas comentados por el uso de esta tecnología en esta aplicación. Además, el tiempo en el que estuvo por encima del umbral de presión alcanzó picos de presión muy altos debidos a las diferencias de densidad en la copa del árbol.

El Modo Presión fue el que más tiempo estuvo dentro de los umbrales de presión establecidos, concretamente cercanos al 40% del tiempo total de vibración. El Modo Distancia Referencia estuvo también un tiempo alto dentro del umbral y el Modo Referencia no alcanzó ni el 20% de tiempo. De manera opuesta el Modo Referencia estuvo cercano al 80% del tiempo en que no estuvo dentro del umbral de presión demostrando la necesidad de una aproximación para mantener el contacto eficiente en la copa del árbol. Los modos Presión y Distancia estuvieron tiempos similares por encima del umbral de presión, alrededor de un 8% de tiempo, mostrando la misma tendencia en los daños causados al árbol, mostrándose así una relación entre ambas variables. Por ello, es necesario que el sistema de aproximación tenga una respuesta rápida para minimizar el tiempo de sacudida por encima del umbral para minimizar el número de daños. En este caso, el Modo Presión ha mostrado mejor comportamiento que el resto de modos para trabajar dentro del umbral establecido demostrando su correcto funcionamiento.

Como conclusión a este estudio, se concluye que el desarrollo de un sistema automático de aproximación y copiado de copa es posible y necesario para los sistemas de sacudidores de copa, especialmente con recolección en continuo.

El Modo Distancia podría ser implementado como variable de control, pero sería aconsejable otra tecnología distinta al ultrasonido que limitara el rango de error de zonas ciegas. Futuros ensayos son necesarios para un desarrollo con tecnología óptica para este fin. Además la ubicación de los sensores utilizados debe ser colocada estratégicamente para evitar errores en los desfases entre la posición de la herramienta de golpeo. Por otra parte, el copiado del contorno no tiene en cuenta otros factores como la cantidad de ramas en el follaje que pueden ocasionar daños durante la sacudida si no tienen en cuenta.

El Modo de Presión podría ser un buen recurso para el control de la aproximación midiendo la presión hidráulica del motor de accionamiento. Para ello, es necesario que el diseño del mecanismo de derribo genere un movimiento lo más equilibrado posible, para que no existan oscilaciones ni ruidos en la señal de presión en su trabajo. Es necesario, optimizar los umbrales de presión utilizados como variable de control para la optimización del mayor derribo con los mínimos daños posibles al árbol. Ello además, se podría realizar discriminando diferentes zonas del árbol con diferente estructura (ramas bajas, zona media, ramas altas) en un diseño de un sacudidor con diferentes módulos de derribo.

**CAPITULO VI. PROTOTIPOS PRECOMERCIALES DE
COSECHADORAS CON SACUDIDORES DE COPA**

1. Introducción

El conocimiento generado en fases y actividades realizadas anteriormente, se puso de manifiesto en el diseño y fabricación de dos prototipos desarrollados durante el convenio de Compra Pública Precomercial Mecaolivar, dentro de la línea 1 (cosechadoras para olivar tradicional) en colaboración las empresas Maqtec y Moresil (Figura 124). En concreto, el prototipo desarrollado en colaboración con Maqtec es una adaptación de la tecnología de derribo para olivar intensivo desarrollada por la empresa a la recolección en círculo planteada para olivar tradicional. Sin embargo, el prototipo desarrollado en colaboración con Moresil S.L., sigue la evolución y el desarrollo generado en esta tesis, por lo que se expondrá en más profundidad. En este caso, se planteó una primera fase de diseño conceptual para dar forma a la cosechadora. Para ello, se partió de una evolución del sistema de derribo de SAMOLIV, el sistema de arrastre utilizado en SACOLIV y el sistema de recepción integrado a Oxbo 3210, integrando todo ello con la información obtenida de la morfología de la plantación y la experiencia adquirida durante los trabajos desarrolladas en el desarrollo de esta Tesis.



Figura 124. Prototipos precomerciales de cosechadoras basadas en sacudidores de copa para olivar tradicional desarrollados en el convenio Mecaolivar en colaboración con Moresil (izquierda) y Maqtec (derecha)

2. Prototipos desarrollados

2.1 *Prototipo A (UCO-Maqtec)*

El prototipo A desarrollado en colaboración con la empresa Maqtec se muestra en la Figura 125, junto con un mayor detalle de los sistemas componentes de los que está formado en la Tabla 32.

La información de las siguientes páginas se encuentra cifrada por protección industrial.

El contenido de dicha información se encuentra publicado en la versión impresa.

CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en esta Tesis Doctoral según los objetivos marcados son las siguientes:

- 1) Evaluación de los sistemas de recolección para olivar tradicional.
 - ❖ Se ha demostrado que los sacudidores de copa realizan el derribo del fruto mediante impactos a las ramas, originando un patrón de vibración caracterizado por aceleraciones con altos valores (hasta 1000 m s^{-2}) de poca duración y de baja frecuencia (4-6 Hz), con muy baja transmisión hacia el interior de la copa, lo que hace que en esta zona no se derriben los frutos (4,9-9,7% de la producción del árbol).
 - ❖ Los sistemas basados en la vibración (vibrador de troncos y de ramas) producen un patrón de vibración con altos niveles de aceleración eficaz ($193,2$ y $343,1 \text{ m s}^{-2}$) y baja frecuencia (16,6 y 24,2 Hz), siendo estos valores más altos en el caso del vibrador de troncos, debido a la necesidad de transmitir la aceleración desde el tronco a las ramas fructíferas. El vibrador de troncos es el sistema masivo con mejor eficiencia alcanzado una media de 90,5% de fruto derribado.
 - ❖ El uso de equipos manuales de recolección (vibrador y sacudidor de ramas) incrementa la eficiencia de derribo a costa de disminuir la capacidad de trabajo y aumentar los daños por caída de hojas y tallo. No obstante, el uso de estos equipos no implica nunca alcanzar el 100% del derribo de la producción del fruto en el árbol. Los sacudidores de ramas presentan un patrón de vibración similar a los sacudidores de copa, con valores de frecuencia superiores (13,5 Hz) y de aceleración más bajos ($71,3 \text{ m s}^{-2}$).
- 2) Caracterización de las plantaciones y árboles de olivar tradicional.
 - ❖ El uso de la fotogrametría lateral y aérea ha servido para obtener las dimensiones necesarias en el diseño de sacudidores de copa y su adaptación de al árbol, como paso previo al desarrollo de sistemas de recolección integral. Los árboles presentan geometrías muy irregulares en su perfil lateral y aéreo con diámetros de entre 5 y 7,5 m y alturas medias de 3,3 que conllevan a que el sistema de derribo requiera tener varios módulos con un grado alto de aproximación al árbol.

- ❖ Se ha demostrado que el método de medición manual de volumen de copa puede ser válido para la toma de ciertas decisiones agronómicas. Sin embargo, el método desarrollado para la obtención del área aérea del contorno de los árboles con el uso de UAS puede sustituirlo y complementarlo, ahorrando grandes cantidades de tiempo y costes en las mediciones.
 - ❖ Es posible la obtención de modelos de predicción del rendimiento potencial de plantaciones de olivar, basados en los parámetros geométricos del árbol (volumen de copa manual y área aérea de contorno), que permitan la creación de mapas temáticos para la implementación en sistemas de olivicultura de precisión.
- 3) Integración de un dispositivo de gestión de fruto derribado con un sacudidor de copa comercial y estudio de viabilidad de la cosecha integral en olivar tradicional.
- ❖ Se ha demostrado la viabilidad técnica y económica de una solución para la recolección integral mecanizada del olivar tradicional mediante la adaptación de un dispositivo de recepción y gestión del fruto derribado por un sacudidor comercial diseñado para otro cultivo. En concreto, se han obtenido más de un 85% de eficiencia de cosecha y 5,61 kg daños kg de fruto⁻¹, con una capacidad de trabajo de casi 1600 kg h⁻¹.
 - ❖ El ensayo del conjunto sacudidor-dispositivo de gestión de fruto, ha permitido establecer los parámetros de diseño adecuados (dimensionamiento, contacto con el tronco, limpieza y almacenamiento del fruto).
- 4) Desarrollo de sistemas de derribo sacudidores de copa específicos para el olivar tradicional.
- ❖ Se ha generado conocimiento científico-técnico en el comportamiento del conjunto olivo-sacudidor de copa mediante el estudio de parámetros específicos del sistema de derribo (mecanismo y tipo de movimiento generado, patrón de vibración, características de las varas de golpeo y configuración de los tambores de varas).
 - ❖ Se ha avanzado en el diseño de sistemas de derribo específicos para olivar tradicional que minimicen daños y maximicen las eficiencias de derribo,

permitiendo aumentar la calidad del aceite y bajar los costes de producción. En concreto, se han obtenido valores de casi 90% de eficiencia de derribo y menos de 10 kg de daños por cada 100 kg de fruto derribado con el prototipo SAMOLIV sacudiendo a 5 Hz con varas de acero y una trayectoria lineal de desplazamiento a $0,75 \text{ km h}^{-1}$.

- ❖ Se ha puesto de manifiesto la necesidad de un sistema de aproximación a la copa eficiente y la importancia de llevarla a cabo a diferentes alturas mediante varios módulos de derribo.
- ❖ Se ha mostrado la importancia de optimizar la configuración de los tambores de varas, siendo favorable reducir la separación entre los mismos para aumentar los impactos, ajustar la separación entre las varas en los tambores (16-20 varas radiales) para evitar daños y aumentar el momento de inercia del conjunto.

5) Desarrollo de un método para automatizar la aproximación del sistema de sacudida y el copiado de la copa del árbol.

- ❖ Se ha determinado la importancia del contacto del sacudidor con la copa y se ha desarrollado un sistema de copiado automático para la adaptación de la máquina al árbol, siendo la presión en el circuito hidráulico del sacudidor el parámetro de control que mejor resultados arroja en su funcionamiento. En particular, la implementación de este sistema en el prototipo SAMOLIV, ha alcanzado valores medios de eficiencia de derribo de más de 70% de derribo en una trayectoria circular alrededor del árbol.

Como conclusión general, se puede establecer que los prototipos precomerciales desarrollados permiten la recolección integral del olivar tradicional, como alternativa a los sistemas existentes, presentando gran potencial para su optimización y comercialización. La innovación conseguida posibilitará que el olivar tradicional, en una situación difícil en condiciones de mercado, pueda competir mejor con los sistemas de producción intensivos que en los últimos años se están imponiendo. Impulsando la mecanización y la optimización de procesos se conseguirá mantener los umbrales de rentabilidad del olivar tradicional para seguir manteniendo su actividad económica.

Como **futuras líneas de investigación**, derivadas de esta Tesis, y que ya se han iniciado se pueden señalar las siguientes:

- Adaptación de sacudidores de copa a olivar de mesa y a otros árboles frutales como naranjos (Figura 149), almendros, limoneros, granados, etc.
- Desarrollo de equipos autopropulsados que mejoren la transitabilidad y maniobrabilidad de las cosechadoras.
- Mejora de los sistemas de copiado automático de la copa.
- Implantación de tecnologías de información y comunicación para el seguimiento de la trazabilidad del producto.
- Desarrollo de sistemas con vibración y sacudida simultánea (Figura 150) para incrementar la eficiencia de derribo que los vibradores convencionales consiguen actualmente.



Figura 149. Prototipos sacudidores de copa con sistemas de aproximación, desarrollados para la recolección de naranja (arriba) y aceituna de mesa (abajo)

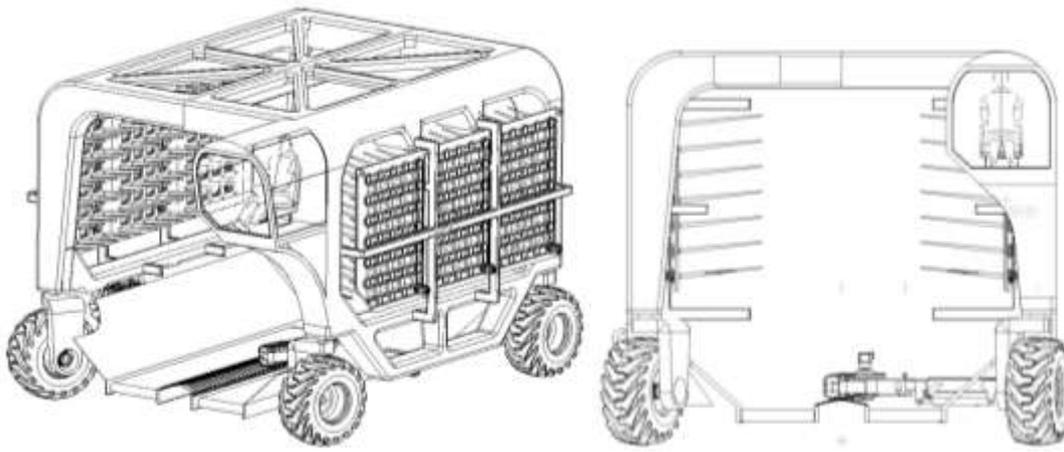


Figura 150. Equipo con sistema de vibración y sacudida simultánea. Patente P201531168

CONCLUSIONS

The conclusions obtained in this dissertation according to the objectives are the following:

1. Evaluation of available systems for harvesting traditional olive trees.
 - ❖ It has been demonstrated that canopy shaker systems perform the fruit detachment process by impacting branches, causing a vibration pattern characterized by acceleration with high values (up to 1000 m s^{-2}) of short duration, low frequency (4-6 Hz) with very low transmission inbound the canopy tree, making this area remain non detached fruits (4.9-9.7% of tree production).
 - ❖ Harvesting systems based on vibration (trunk and branch shaker) produce a vibration pattern with high levels of acceleration ((193.2 y 343.1 m s^{-2}) and low frequency (16.6 y 24.2 Hz) being higher the values performance by trunk shaker due to the need to transmit the acceleration from trunk to branches. Trunk shaker is the massive system that has achieved best efficiency with a mean of 90.5% of removal fruits.
 - ❖ Manual systems (branch shaker and shaker comb) increase removal efficiency, but also increasing debris and decreasing field efficiency. The use of these systems has never achieved 100% of removal efficiency. The shaker comb has a similar vibration pattern than the canopy shaker with higher frequency (13.5 Hz) and lower acceleration (71.3 m s^{-2}).

2. Traditional olive orchards and trees characterization.
 - ❖ Lateral and aerial photogrammetry has been used to obtain the right dimensions for the design of canopy shaker systems and their adaption to trees, as a previous step to develop integral harvesters. Trees have irregular geometries in the whole crown with diameters between 5 and 7.5 m and mean heights of 3.3 m that require the removal systems had several modules for approximating to the tree.
 - ❖ It has been demonstrated that manual canopy volume method may be valid for making agronomical decision. However, the performed method for obtaining the aerial area of tree crown by using UAS may be replaced and

complement, saving large amounts of time and money in the measuring process.

- ❖ It is possible to obtain predictive models of potential yield of olive orchards, based on geometrical parameters of trees (manual canopy volume and aerial area of tree crown), enabling the creation of thematic maps for deployment of precision agriculture.
3. Integration of a collecting device of detached fruit by a commercial canopy shaker and viability study for integral harvesting of traditional orchards.
- ❖ It has been demonstrated the technic and economic feasibility of a solution for mechanical integral harvesting of traditional orchards, adapting a collecting device of detached fruit by a commercial citrus canopy shaker. Particularly, it has been obtained more than 85% of harvest efficiency, 5.61 kg_debris by 100 kg_detached fruit and a field capacity of 1600 kg h⁻¹.
 - ❖ Test of the adaption of collecting device to canopy shaker has allowed establish appropriate design parameters (dimensions, trunk contacts, and cleaning and storage systems of fruits).
4. Development of removal systems based on canopy shakers adapted to traditional orchards.
- ❖ It has been generated scientific-technic knowledge about the interaction between machine and trees by studying specific parameters of removal devices (mechanism, motions generated, vibration patterns, rods characteristics and drum configuration).
 - ❖ It has been progressed in designing removal devices for traditional orchards that minimize tree damage and maximize removal efficiency, allowing enhancing the olive oil quality and lowering the production costs. Particularly, SAMOLIV has reached the 90% of removal efficiency and 100 gr_debris. Kg_detached fruit with an acceleration frequency of 5 Hz, using rod made of steel and a ground speed of 0.75 km h⁻¹.
 - ❖ It has been highlighted the need of perform an efficient approximation to the tree canopy in several areas according to crown height by several modules of removal devices.

- ❖ It has been shown the importance of the drums with rods configuration, being advisable to reduce the spacing between them to increase impacts, to adjust rods separation on drums (16-20 rods) to avoid damage, and to increase the inertia moment of the assembly.
5. Development of a method for automating the approximation of the removal system and the copy to the canopy tree.
- ❖ It has been determined the importance of the contact between canopy and removal device and it has been developed an automatic system of crown copy for the adaption of the machine to the tree, being the hydraulic pressure in the circuit of the shaker, the control parameter that has given better results. Particularly, the implementation of this system in SAMOLIV prototype has achieved mean values of 70% of removal efficiency in a harvesting path around the tree.

To sum up, it is possible to establish that pre-commercial prototype developed allowed the integral harvesting of traditional orchards, as alternatives to existing ones, showing a big potential for their optimization and merchandising. The innovation achieved will allow traditional orchards to compete with high density olive orchards that have been spread in the last years. The only way to keep the profitability thresholds of traditional olive orchards is to incorporate the mechanization and optimize the tasks, in order to maintain an economic activity.

Futures lines of research that has been yet initiated may be:

- Adapting the canopy shakers for table olive trees and for others crops such as oranges, almonds, lemons or pomegranates (Figure 149).
- Developing of self-propelled machines with canopy shakers to enhance the mobility and maneuverability of harvesters.
- Improving automatic crown copy devices.
- Incorporating communication and information technologies to follow the traceability of product.
- Developing harvesters with simultaneous technology to shake branches and vibrate trunk (Figure 150) for increasing the removal efficiency of available commercial trunk shakers.

CAPÍTULO VIII.- BIBLIOGRAFÍA

Abounajmi, M. (2000). Design and Development of an experimental shaker for investigating the effects of shaking mode, frequency and amplitude on date fruit detachment (Doctoral dissertation, MS Thesis).

Abramoff, M.D.; Magalhães, Paulo J.; Ram, Sunanda J. (2004). Biophotonics international, 11, (7), 36 – 42.

Agencia de Información y Control Alimentarios (AICA) (2014). Información de mercados: Producción. Consultado: 10 Octubre 2014. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es>

Alfaro Villen, E. (1965). Máquina Recolectora de aceituna. ES 309454.17 Febrero de 1965. Madrid. España.

Aristizábal, I. D., Oliveros, C. E. & Alvarez, F. (2003). Mechanical harvesting of coffee applying circular and multidirectional vibrations. Transactions of the ASAE, 46 (2), 205-209.

Asociación Española de Municipios del Olivo (AEMO). (2010). Aproximación a los costes del cultivo del olivo. Cuaderno de conclusiones del seminario AEMO. Córdoba .Consultado: 30 enero 2012. Disponible en: http://www.aemo.es/get.php?pathext=descargas/Costes_AEMO.pdf

Barranco D., Fernández-Escobar R. & Rallo L. (2010). Olive Growing, (756 pp). Mundi-Prensa, Junta de Andalucía, Australian Olive Association Ltd., Pendle Hill NSW, Australia.

Beltrán-Esteve M. (2013). Assessing technical efficiency in traditional olive grove systems: A directional metadistance function approach. Economía agraria y recursos naturales, 13(2), 53-76.

Bernardi, B., Giametta, F. & Sciarrone, G. (2008). Innovations in Mechanization and Control Systems of Production in Olive Sector. Agricultural Engineering International: CIGR Journal.

Blanco-Roldán, G.L., Gil-Ribes, J., Agüera, J. & Castro, S. (2005, Septiembre). Evaluación de operaciones mecanizadas en el olivar. Ponencia presentada en III Congreso Nacional de Agroingeniería. León, España.

Bora, G., Ehsani, R., Hebel, M., & Lee, K. (2007). In-situ measurement of the detachment force of individual oranges harvested by a canopy shaker harvesting machine. In Proc. Fla. State Hortic. Soc. 120, 38-40.

Boultadakis, Ioannis. (2003). Olive tree shaker-harvester. WO 2004/057943 A1. 30 Octubre 2003. Australia

Brandtberg, T. & Walter, F. (1998). An algorithm for delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images using curved edge segments at multiple scales. Proceedings of Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, Victoria, British Columbia, Canada, 41-54.

Brown G.K. (2005). New Mechanical harvester for the Florida citrus juice industry. HortTechnology, 15(1), 69-72.

Bruel, A. (1976). U.S. Transverse beating device for a grape-gathering machine. US 3939629. 24 Febrero 1976 . Washington, Estados Unidos.

Buist K. (2002). Plant engaging systems and methods for harvesting machines. US 6484487. 26 November 2002. Washington, Estados Unidos.

Burns, J. K., Buker, R. S. III. & Roka, F. M. (2005). Mechanical harvesting capacity in sweet orange is increased with an abscission agent. HortTechnology, 15, 758-765.

Camposeo, S., Vivaldi, G. A., & Gattullo, C. E. (2013). Ripening indices and harvesting times of different olive cultivars for continuous harvest. Scientia Horticulturae, 151, 1-10.

Clement, J., Novas, N., Gazquez, J. & Manzano-Agugliaro, F. (2012). High speed intelligent classifier of tomatoes by colour, size and weight. Spanish Journal Agricultural of Resource, 10(2), 314-325.

Castillo-Ruiz, F.J., Pérez-Ruiz, M., Blanco-Roldán, G.L., Gil-Ribes, J.A. & Agüera, J. (2015). Development of a telemetry and yield mapping system of olive harvester. Sensors, 15 (2), 4001-4018.

Castro-García, S., Blanco-Roldán, G.L., Gil-Ribes, J. & Agüera Vega, J. (2008). Dynamic analysis of olive trees in intensive orchards under forced vibration. Trees, 22 (6), 795-802.

Castro-García S., Rosa U.A., Gliever C.J., Ferguson L. & Glozer, K. (2009). Evaluation of table olive damage during harvest with a canopy shake-and-catch system. *HortTechnology*, 19, 260-266.

Castro-García S., Rosa U.A., Gliever, C. J., Smith D., Burns J.K., Krueger W.H., Ferguson L. & Glozer, K. (2009). Video evaluation of table olive damage during harvest with a canopy shaker. *HortTechnology*, 19 (2), 260-266.

Castro-García, S., Blanco-Roldán, G.L. & Gil-Ribes, J. (2011). Frequency response of *Pinus Pinea L.* for selective cone harvesting by vibration. *Trees*, 25 (5), 801-808.

Castro-Garcia, S., Castillo-Ruiz, F.J., Jimenez-Jimenez, F., Gil-Ribes, J.A. & Blanco-Roldan, G.L. (2015). Suitability of Spanish 'Manzanilla' table olive orchards for trunk shaker harvesting. *Biosystems Engineering*, 129, 388–395.

Consejería de Agricultura y Pesca, España (CAP) (2005). El olivar andaluz. Consejería de agricultura y pesca (Ed), Unidad de Prospectiva de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía.

Consejería de Agricultura y Pesca (CAP). Informe sectorial inicial sobre el sector agrario andaluz. Consultado: 02 Febrero 2015. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/>

Consejo Internacional Oleícola (COI). (2007). Técnicas en la producción en olivicultura. Madrid: Consejo Internacional Oleícola.

Consejo Internacional Oleícola (COI). (2013). World table olive figures.. Consultado: 22 Mayo 2013. Disponible en: <http://www.internationaloliveoil.org>.

Dias, A. B., Peça, J. O. & Pinheiro, A. (2012). Long-Term Evaluation of the Influence of Mechanical Pruning on Olive Growing. *Agronomy Journal*, 104 (1), 22-253.

Duarte F., Jones N., Fleskens L. (2008). Traditional olive orchards on sloping land: Sustainability or abandonment?. *Journal of environmental management*, 89, 86-98.

Du X., Chen, D., Zhang, Q., Scharf, P. A. & Whiting, M. D. (2012). Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations. *Biosystems Engineering*, 111(3), 305-314.

El-Awady M., Genaidy M., Rashowan M. & El-Attar M. (2008). Modeling and simulating of olive-tree harvesting mechanism. *Journal of Agricultural Engineering*, 25(3), 712-722.

Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos análisis de las plantaciones de olivar en España (ESYRCE). Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente (2013). Consultado: 04 Enero 2015. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>

Famiani F., Farinelli D., Rollo S., Camposeo S., Di Vaio C. & Inglese P. (2014). Evaluation of different mechanical fruit harvesting systems and oil quality in very large size olive trees. *Span J Agric Res* 12(4), 960-972.

Famiani, F., Tombesi, A., Farinelli, D. & Tombesi, S. (2012). The fruit detachment force/fruit weight ratio can be used to predict the harvesting yield and the efficiency of trunk shakers on mechanically harvested olives. In I International Symposium on Mechanical Harvesting and Handling Systems of Fruits and Nuts, 965, 61-64.

Farinelli, D., Ruffolo, M., Boco, M. & Tombesi, A. (2008, September). Yield efficiency and mechanical harvesting with trunk shaker of some international olive cultivars. In VI International Symposium on Olive Growing 949 (pp. 379-384).

Ferguson, L. (2006). Trends in olive fruit handling previous to its industrial transformation. *Grasas y Aceites* 57(1), 9-15.

Ferguson L., Rosa U.A., Castro-García S., Lee S.M., Guinard J.X., Burns J., Krueger W.H., O'Connell N.V. & Glozer K. (2010). Mechanical harvesting of California table and oil olives. *Advances in Horticultural Science*, 24(1), 53-63.

Ferguson, L., Glozer, K., Crisosto, C., Rosa, U. A., Castro-Garcia, S., Fichtner, E. J., Guinard J.X., Lee S.M., Krueger W.H., Miles J.A. & Burns, J. K. (2012, April). Improving canopy contact olive harvester efficiency with mechanical pruning. In I International Symposium on Mechanical Harvesting and Handling Systems of Fruits and Nuts, 965, 83-87).

Fernández-Escobar, R., De la Rosa, R., León, L., Gómez, J.A., Testi, L., Orgaz, F., Gil-Ribes, J.A., Quesada-Moraga, E., Trapero, A. & Msallem, M. (2012). Sistemas de producción en olivicultura. *Olivae*, 118, 55-68.

Gil-Ribes JA, Blanco-Roldán GL & Castro-García S. Mecanización del cultivo y de la recolección en el olivar. Junta de Andalucía, Sevilla, Spain, 2009

Gil-Ribes, J., López-Giménez, F. J., Blanco-Roldán, G. L. & Castro-García, S. (2008). Mecanización. Barranco D., Fernández Escobar R., Rallo L.(Eds.), El cultivo del olivo, (pp. 435-505). Madrid, España: Mundiprensa.

Gil-Ribes, J.A., Blanco-Roldán, G.L. & Castro-García, S. (2010b). Recolección y reconversión del olivar en Andalucía y en España. *Vida rural*, Noviembre, 52-57.

Gil-Ribes, J.A., Blanco-Roldán, G.L., Castro-García, S., Agüera-Vega, J., Muñoz-Tejada, R., Jiménez-Jiménez, F., Sola-Guirado, R.R., Jiménez-Herrera, B. & García-Zamorano, F. (2011b, Mayo). Introducción de un sistema sacudidor de copa para la recolección mecanizada del olivar tradicional de almazara. Ponencia presentada al XV Simposio científico-técnico del aceite de oliva. Expoliva, Jaén.

Gómez-Limón J.A. & Riesgo L., (2010). Sustainability assessment of olive grove in Andalusia: A methodological proposal. In Proc 120th EAAE Seminar, Chania, Crete, Greece.

Gougeon, F. A. & Leckie, D. G. (2006). The individual tree crown approach applied to Ikonos images of a coniferous plantation area. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(11), 1287-1297.

Graaff, J., & Eppink, L. A. A. J. (1999). Olive oil production and soil conservation in southern Spain, in relation to EU subsidy policies. *Land use policy*. 16(4), 259-267.

Hattaralerphong, J. & Sinoquet, H. (2005). A method for 3D reconstruction of tree canopy volume from photographs: assessment from 3D digitised plants. *Tree Physiology*, 25, 1229-1242.

Hong M.Y., Rosa U.A. & Upadhyaya S.K. (2012). Optimum operating parameters for a rotary drum shaker for harvesting *Jatropha curcas* L. *T ASAE*, 55(6), 2051-2058.

Hosking, J., (2002). Fruit shaker. US 2002/0062635 A1. 30 Mayo 2002. Washington, Estados Unidos.

Hussain, A. A. M., Rehkugler, G. E., & Gunkel, W. W. (1975). Tree limb response to a periodic discontinuous sinusoidal displacement [Fruit harvesting, vibration]. *Transactions of the ASAE*.

Igathinathane, C., Pordesimo, L.O., Columbus, E.P., Batchelor, W.D. & Methuku, S.R. (2008). Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using ImageJ. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 168-182.

Jiménez-Jiménez, F., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G. L., González-Sánchez, E. & Gil-Ribes, J. (2013). Isolation of table olive damage causes and bruise time evolution during fruit detachment with trunk shaker. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(1), 65-71.

Ke, Y. H. & Quackenbush, L. J. (2011). A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 32(17), 4725-4747.

Kise, M. & Zhang, Q. (2008). Development of a stereovision sensing system for 3D crop row structure mapping and tractor guidance. *Biosystems Engineering*, 101(2), 191-198.

Kouraba K., Gil-Ribes J.A., Blanco-Roldán G.L., de Jaime-Revuelta M.A. & Barranco-Navero D. (2004). Suitability of olive varieties for mechanical harvester shaking. *Olivae*, 101(39), e43.

Larbi, A., Ayadi, M., Ben Dhiab, A., Msallem M. & Caballero, J. (2012). Planting density affects vigour and production of 'Arbequina' olive. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(4), 1081-1089.

Lavee, S., Haskal, A., & Avidan, B. (2012). The effect of planting distances and tree shape on yield and harvest efficiency of cv. Manzanillo table olives. *Scientia Horticulturae*, 142, 166-173.

Leon, L., De la Rosa, R., Rallo, L., Guerrero, N. & Barranco, D. (2007). Influence of spacing on the initial production of hedgerow 'Arbequina' olive orchards. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(4), 554-558.

Mateev, L.M. & Kostadinov, G.D. (2004). Probabilistic model of fruit removal during vibratory Morello harvesting. *Biosystem Engineering*, 87(4), 425-435.

Meyer, G.E. & Neto, J.C. (2008). Verification of colour vegetation indices for automated crop imaging applications. *Compututer Electronics in Agriculture*, 63(2), 282-293.

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). Consultado: 29 Enero 2015. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/>

Miranda-Fuentes, A., Llorens, J., Gamarra-Diezma, J. L., Gil-Ribes, J. A. & Gil, E. (2015). Towards an optimized method of olive tree crown volume measurement. *Sensors*, 15(2), 3671-3687.

Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M. & Fereres, E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 425-431.

Muñoz-Cobo, M.P. & Humanes-Guillén, J. (1988). Capítulo 8. In *La poda del olivo: moderna olivicultura*, 5th ed (pp. 77-139). Madrid: Agrícola Española.

Ortiz-Cañavate, J., García-Ramos, F. J., & Ruiz-Altisent, M. (1999). Testing equipment for the improvement of mechanical devices to minimize damage to fruit in commercial packing lines. In *Symposium: Actual Tasks on Agricultural Engineering*, 223-229.

Pahl, G. & Beitz, W. (2013). *Engineering design: a systematic approach*. Springer Science & Business Media.

Palm, R. S. (2014). Rotary brush harvesters and methods of using the same. U.S. 8635845. 28 Enero 2014. US 2002/0062635.

Pardo, A. Ruiz, M. A. (2002). *SPSS 11. Guía para el análisis de datos*. Madrid: McGraw-Hill.

Pastor, M., Hidalgo, J.C., Vega, V., Fereres, E. (2006). Densidades de plantación en olivar de regadío. Consultado: 05 Marzo 2015. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/ministerio/>

Pastor, M., Vega, V. & Hidalgo, J.C. Ensayos en plantaciones de olivar intensivas y superintensivas. Consultado: 05 Marzo 2015. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/ministerio/>

Phattaralerphong, J., & Sinoquet, H. (2005). A method for 3D reconstruction of tree crown volume from photographs: assessment with 3D-digitized Plants. *Tree Physiology*, 25(10), 1229-1242.

Pedrosa Gonzales, A. (1967). *Máquina recolectora de aceituna*. ES 338128. 16 Marzo 1967. Madrid. España.

Pergola M., Favia M., Palese A.M., Perretti B., Xiloyannis C. & Celano G. (2013). Alternative management for olive orchards grown in semi-arid environments: An energy, economic and environmental analysis. *Scientia Horticulturae*, 162, 380-386.

Pertics, E. E. (1966). Berry picker. U.S. 3255578. Washington, Estados Unidos.

Peterson, D. L. & Kornecki, T. (1989). Shaking mechanism for fruit harvesting. U.S. 4860529. Washington, Estados Unidos.

Pezzi, F. & Caprara, C. (2009). Mechanical grape harvesting: Investigation of the transmission of vibrations. *Biosystems Engineering*, 103 (3), 281-286.

Poolred (2012). Sistema de información de precios en origen del aceite de oliva. Fundación olivar. Consultado: 03 Febrero 2012. Disponible en: <http://www.oliva.net/poolred/>

Poolred (2015). Sistema de información de precios en origen del aceite de oliva. Fundación olivar. Consultado: 22 Abril 2015. Disponible en: <http://www.oliva.net/poolred/>

Pouliot, D. A., King, D. J., Bell, F. W., & Pitt, D. G. (2002). Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sensing of Environment*, 82(2), 322-334.

Pugh, S. & Hollins, B. (1990). *Successful Product Design: What to Do and When*. Butterworth-Heinemann.

Pugh S. (1991). *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Addison Wesley Publishing Company.

Rallo, L., Barranco, D., Castro-García, S., Connor, D. J., Gómez del Campo M., & Rallo, P. (2013). High-Density Olive Plantations. *Horticultural Reviews*, 41, 303-384.

Rajbarkohan, M., Rasekh, M., Hosani, AH, Asadi, MR. (2011) Kinematics and kinetic analysis of slider crank mechanism in otto linear four cylinder Z24 engine. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 3(3). 85-95.

Ramos, A.F. & Santos, F.L. (2010). Yield and olive oil characteristics of a low-density orchard (cv. Cordovil) subjected to different irrigation regimes. *Agriculture Water Manage*, 97(2), 363-373.

Ravetti, L. & Robb, S. (2010). Continuous mechanical harvesting in modern Australian olive growing systems. *Advances in Horticultural Science*, 24(1), 71-77.

Recker K. H. (1970). Fruit harvester including reciprocable and rotatable rod-like helical member. US 3527039. 8 Septiembre 1970. Washington, Estados Unidos.

Roka, F. M., & Rouse, R. E. (2004). Tree shaping and grove design to enhance performance of citrus mechanical harvesting. In Proc. Fla. State Hort. Soc., 117, 117-119.

Rosell, J.R. & Sanz, R. (2011). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agriculture activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 124-141.

Sánchez, J. G. (2012). La Nueva reconversión productiva del olivar jienense: aproximación inicial a sus fundamentos y limitaciones. *Cuadernos Geográficos*, 95-121.

Savary, S.K.J.U., Ehsani, R., Schueller, J.K. & Rajaraman, B.P. (2010). Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. *Transaction of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*, 53(5), 1373-1381.

Savary, S.K.J., Ehsani, R., Salyani, M., Hebel, M.A. & Bora G.C. (2011). Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker. *Computer and Electronics in Agriculture*, 76(1), 51-58.

Scott, P. R. (1995). Single row grape and raisin harvester. U.S. 5423166. 13 Junio 1995. Washington, Estados Unidos.

Scott, P. R., Orlando, F. P., Warren, R. K., & Slates, L. L. (1996). Canopy harvester with force balanced drive. U.S. 5495708. 5 Marzo 1996. Washington, Estados Unidos

Scudder, R. 1982. Coffe harvester. U.S. Patent No 4341062. 27 Julio 1982. Washington, Estados Unidos.

Serrano, N.; Romacho, F.J. & Arquero, O (2012). Estado del olivar en Andalucía. Necesidad y criterios de reconversión del olivar tradicional. *Fruticultura*, 24, 4-19.

Sessiz, A., & Özcan, M. T. (2006). Olive removal with pneumatic branch shaker and abscission chemical. *Journal of Food Engineering*, 76, 148-153.

Shamshiri, R., Ehsani, R., Maja, J.M. & Roka, F.M. (2013). Determining machine efficiency parameters for a citrus canopy shaker using yield monitor data. *Applied Engineering in Agriculture*, 29(1), 33-41.

Sola-Guirado, R.R., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G.L., Jiménez-Jiménez, F., Castillo-Ruiz, F.J. & Gil-Ribes, J.A. (2014). Traditional olive tree response to oil olive harvesting technologies. *Biosystem Engineering*, 118, 186-193.

Spann, T. M., & Danyluk, M. D. (2010). Mechanical Harvesting Increases Leaf and Stem Debris in Loads of Mechanically Harvested Citrus Fruit. *HortScience*, 45(8), 1297-1300.

Takeda, F. & Peterson, D.L., (1999). Considerations for machine harvesting fresh-market eastern thornless blackberries: Trellis design, cane training systems, and mechanical harvester developments. *HortTechnology*, 9(1), 16-21.

Tombesi, A., Boco, M., Pilli, M., & Farinelli, D. (2000, September). Influence of canopy density on efficiency of trunk shaker on olive mechanical harvesting. In *IV International Symposium on Olive Growing*, 586, 291-294.

Tombesi, A.; Sergio Tombesi., 2007. Orchard planning and planting In *Production techniques in olive growing*, 1st ed, (pp. 17-40). International Olive Council, Madrid.

Torregrosa, A., Cuenca, A., & Ortiz, C. (2012). Detachment of orange fruits with a low frequency and high amplitude shaker. In *Proceedings of the international conference of agricultural engineering*. Valencia, Spain.

Torregrosa, A., Ortí, E., Martín, B., Gil, J., & Ortiz, C. (2009). Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain. *Biosystems Engineering*, 104(1), 18-24

Upadhyaya, S.K. & J. R. Cooke. (1981). Limb impact harvesting, Model studies. *Trans. ASAE*, 24(4), 868-871.

Vieri, M., & Sarri, D. (2010). Criteria for introducing mechanical harvesting of oil olives: results of a five-year project in Central Italy. *Advances in Horticultural Sciences*, 24(1), 78-90.

Villalobos, F.J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M. & Orgaz F. (2006). Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *European Journal Agronomy*, 24(4), 296–303.

Walpole, R., Myers R. Myers, S. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*, 6^a. Ed. Pearson Prentice Hall.

Weygandt R.A. & Weygandt R.M. (1966). Apparatus for and method of harvesting berries and similar produce from bushes. Patente de invención US 3245211, 12 Abril 1966,US.

Wiesman Z. (2009). Economic aspects of desert olive oil cultivation. Desert olive oil cultivation, 355-365. Academic Press, San Diego, US.

Zhou J., He L., Zhang Q. & Karkee M. (2014). Effect of excitation position of a handheld shaker on fruit removal efficiency and damage in mechanical harvesting of sweet cherry. Biosystem Engineering, 125, 36-44.

Zúñiga Medina, Juan Francisco. (1971). Máquina recolectora de aceituna. ES 175014. 10 Diciembre 1971. Madrid. España.

BIOGRAPHICAL SKETCH

Rafael Rubén Sola-Guirado was born in 1986 in Almeria, Spain. In 2003, he earned the Technological High School with honors. He attended in Polytechnic of Linares from 2004 to 2007 where earned Mechanical Engineering. Then, he procured Technician in Industrial Design. At 2011, he earned a Bachelor of Industrial Engineering from the University of Jaén. At 2012, he received his Master of Science in Representation in Engineering and Architecture from the University of Córdoba.