

CONTENIDOS

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	vi
RESUM	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xviii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xxiv
GLOSARIO Y ACRÓNIMOS.....	xxvi
CAPÍTULO 1	1
APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA FORESTAL Y SU APLICACIÓN EN ZONAS MEDITERRÁNEAS	1
GLOSARIO Y ACRÓNIMOS	2
1. EL MONTE MEDITERRÁNEO.....	3
1.1. Falta de gestión	4
2. BIOMASA FORESTAL.....	4
3. ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA POR TELEDETECCIÓN.....	5
3.1. Teledetección pasiva	5
3.2. Teledetección activa	6
3.3. La teledetección en zonas mediterráneas	6
4. PROCESADO DE LOS DATOS DE TELEDETECCIÓN	7
5. DATOS DE CAMPO	7
5.1. Inventario Forestal Nacional.....	8
5.1.1. Los inventarios forestales españoles desde 1963	8
5.1.2. Diseño del muestreo y toma de datos	9
5.1.3. Resultados. Estructura del IFN3.....	10
5.2. Ecuaciones de biomasa	10
6. ANÁLISIS Y PROPUESTA METODOLÓGICA.....	12
7. ZONAS DE ESTUDIO.....	13
7.1. Zonas y climas.....	13
7.1.1. Área forestal: Los Páramos y Los Valles (Palencia)	14
7.1.2. Área forestal: T.M. de Enguera (Valencia).....	15
7.1.3. Área agroforestal: T.M. de Liria (Valencia)	16
7.1.4. Regenerado post-incendio: T.M. de Chequilla (Guadalajara)	17
7.1.5. Área agrícola: T.M. de Barrax (Albacete)	19
8. CONCLUSIONES	19
9. BIBLIOGRAFÍA.....	21

CAPÍTULO 2	26
OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES DE CAMPO: ANÁLISIS DEL LÁSER TERRESTRE PARA EL INVENTARIADO FORESTAL	26
GLOSARIO Y ACRÓNIMOS	27
1. INTRODUCCIÓN.....	28
2. ANTECEDENTES.....	28
2.1. Variables dasométricas.....	29
2.2. Variables dendrométricas	30
2.3. Otras variables.....	30
2.4. El LiDAR en el clima mediterráneo.....	31
2.5. Análisis	32
3. OBJETIVOS	33
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
4.1. Zona de estudio	33
4.2. Inventario forestal	33
4.2.1. Diseño del muestreo	33
4.2.2. Instrumentos de medida.....	34
4.2.3. Ecuaciones alométricas	35
4.3. Escáner láser terrestre (TLS).....	35
4.3.1. ScanStation Leica P-40.....	35
4.3.2. Software de procesado de la nube de puntos	36
4.3.3. Parámetros dendrométricos	37
4.3.4. Parámetros dasométricos y estimación de la biomasa	37
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
5.1. Inventario forestal	38
5.1.1. Biomasa total	38
5.2. Nubes de puntos obtenidas por el TLS	39
5.2.1. Gestión de los datos	39
5.2.2. Perfiles de distribución de la biomasa por altura	40
5.2.3. Parámetros dendrométricos de la nube de puntos	42
5.2.4. Parámetros dasométricos: biomasa a partir de datos TLS ...	42
5.3. Coste operativo.....	43
5.3.1. Materiales	43
5.3.2. Tiempos	44
5.3.3. Rendimientos totales.....	44
5.4. Discusión	45
6. CONCLUSIONES	47
7. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	47
7.1. Resumen: RAQRS-V	48
8. BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXO FOTOGRÁFICO.....	53

CAPÍTULO 3.....	57
ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA EN MASAS HOMOGÉNEAS DE PINAR MEDIANTE ANÁLISIS POR REGRESIÓN.....	57
GLOSARIO Y ACRÓNIMOS	58
1. INTRODUCCIÓN.....	59
2. OBJETIVOS	60
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	61
3.1. Zona de estudio	61
3.2. Datos del IFN3.....	61
3.3. Datos procedentes de las imágenes de satélite	62
3.3.1. Imágenes del satélite Landsat-5 TM.....	62
3.3.2. Procesado y correcciones de las imágenes Landsat-5 TM.....	63
3.3.3. Extracción de la información de las imágenes.....	64
3.4. Relación de los datos de satélite con los datos del IFN3.....	66
3.4.1. Análisis estadístico.....	66
3.4.2. Análisis descriptivo y gráfico	66
3.4.3. Modelos de regresión.....	68
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1. Regresión lineal múltiple con todas las variables	71
4.2. Criterios para la selección de modelos.....	72
4.2.1. Criterio AIC _k de Akaike	72
4.2.2. Criterio C _k de Mallows	72
4.2.3. Criterio PRESS _k	72
4.3. Selección de variables automática: regresión por etapas.....	72
4.4. Discusión sobre los modelos obtenidos.	73
5. CONCLUSIONES	74
6. BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXO FOTOGRÁFICO.....	78
CAPÍTULO 4.....	80
ANÁLISIS DE LOS PRODUCTOS L2B LAI Y FAPAR DE SENTINEL-2 COMO VARIABLES DESCRIPTORAS DE LA BIOMASA FORESTAL	80
GLOSARIO Y ACRÓNIMOS	82
1. INTRODUCCIÓN.....	83
2. OBJETIVOS	84
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	84
3.1. Zonas de estudio	84
3.1.1. Zona agrícola: T.M. de Barrax (Albacete, España).....	84
3.1.2. Zona agroforestal: T.M. de Liria (Valencia, España).....	85
3.1.3. Zona forestal: T.M. de Enguera (Valencia, España)	85
3.2. Variables biofísicas de estudio	86
3.2.1. Índice de área foliar - Leaf Area Index (LAI).....	86

3.2.2. FAPAR.....	86
3.3. Instrumentación	87
3.3.1. DHP y CAN-EYE.....	87
3.3.2. Accupar LP-80 Ceptometer.....	90
3.3.3. LiCOR LAI-2200 Plant Canopy Analyzer.....	90
3.4. Metodología del muestreo en las parcelas de muestra	91
3.5. Evaluación del muestreo.....	93
3.5.1. Procedimiento de Monte-Carlo.....	93
3.6. Imágenes de satélite.....	94
3.7. Procesador de imágenes SNAP.....	95
3.8. La función de transferencia.....	97
3.8.1. Método de regresión	97
3.8.2. Combinación de bandas.....	98
3.9. Evaluación de las funciones de transferencia	98
3.10. Valores de SNAP y validación de los resultados	99
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	100
4.1. Datos de campo.....	100
4.2. Procesado de los datos de campo	103
4.2.1. Procesado DHP	103
4.3. Evaluación del muestreo basada en NDVI.....	106
4.4. Definición de las funciones de transferencia	108
4.5. Validación e interpolación	114
4.6. Generación de los mapas y comparación de resultados.	116
4.7. Consistencia de los resultados. Discusión	118
5. CONCLUSIONES.....	122
6. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	123
6.1. Resumen: RAQRS-V	124
6.2. Resumen: 2 nd Sentinel-2 Validation Team Meeting	126
7. BIBLIOGRAFÍA.....	128
CAPÍTULO 5.....	130
ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA TOTAL DE <i>Pinus halepensis</i> Mill. CON IMÁGENES SENTINEL-2 Y MÁQUINAS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO.....	130
GLOSARIO Y ACRÓNIMOS	131
1. INTRODUCCIÓN.....	132
2. OBJETIVOS	133
3. METODOLOGÍA.....	133
3.1. Área de estudio.....	133
3.2. Imágenes de satélite.....	134
3.3. Inventarios forestales	135
3.4. Evaluación del inventario	137
3.5. Procesos gaussianos.....	138
3.6. Análisis de los datos	139
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	140

4.1. Sentinel-2.....	140
4.2. Landsat-8.....	140
4.3. RADAR	143
4.3.1. Sentinel-2 y Sentinel-1	143
4.3.2. Landsat-8 and Sentinel-1	143
4.4. Mapa de biomasa	145
5. CONCLUSIONES	145
6. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	148
6.1. Resumen: III Congreso Forestal de la <i>Comunitat Valenciana</i> ...	148
7. BIBLIOGRAFÍA.....	149
CAPÍTULO 6.....	150
ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LAS MASAS FORESTALES MEDIANTE IMÁGENES DE TELEDETECCIÓN. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS GAUSSIANOS.	150
GLOSARIO Y ACRÓNIMOS	150
1. INTRODUCCIÓN.....	151
2. OBJETIVOS	151
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	151
3.1. Área de estudio e inventarios forestales	151
3.2. Ecuaciones alométricas	152
3.3. Imágenes de satélite.....	152
3.4. Evaluación de la biomasa y crecimiento.....	152
3.5. Análisis estadístico	152
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	152
4.1. Mapas de biomasa, 2011-2017.....	152
4.2. Análisis de los datos	152
4.2.1. Descripción de las áreas de muestreo	152
4.2.2. Test de Kruskal-Wallis.....	154
5. DISCUSIÓN.....	154
6. CONCLUSIONES	154
7. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	155
7.1. Resumen: MDPI <i>Proceedings</i> 2019 / II CIGEO.....	155
7.2. Publicación original	155
8. BIBLIOGRAFÍA.....	160
CAPÍTULO 7.....	161
ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA Y EL SECUESTRO DE CARBONO TRAS UN INCENDIO EN ÁREAS DE MATORRAL MEDIANTE IMÁGENES DE SENTINEL-2 Y PROCESOS GAUSSIANOS	161
1. INTRODUCCIÓN.....	162
2. OBJETIVOS	163
3. DESARROLLO DEL ESTUDIO.....	163
3.1. Valores anómalos y valores de suelo.....	163

3.2. Área de interés.....	165
3.3. Análisis de costes	166
4. DISCUSIÓN.....	166
5. CONCLUSIONES	168
6. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	169
6.1. Resumen: MDPI <i>Forests</i> 2022	169
6.2. Publicación original	169
7. BIBLIOGRAFÍA.....	182
CAPÍTULO 8.....	183
CAPITALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS: AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO Y APLICACIÓN COMERCIAL	183
1. INTRODUCCIÓN.....	184
2. OBJETIVOS	184
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	184
3.1. Zona de estudio	184
3.2. Datos de campo.....	185
3.3. Sentinel-2.....	185
3.4. Python	185
3.5. Estructura de los comandos.....	185
3.5.1. Módulo de imágenes.....	186
3.5.2. Módulo de datos.....	186
3.5.3. Módulo de procesado.....	186
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	186
4.1. Comparativa de ajuste y errores	186
4.2. Comparativa y carbono secuestrado.....	187
5. CONCLUSIONES	188
6. BIBLIOGRAFÍA.....	188
CAPÍTULO 9.....	189
CONCLUSIONES	189
BIBLIOGRAFÍA GENERAL	191

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: zona de estudio en repoblaciones forestales: comarca de Los Páramos y Los Valles (Palencia, España)</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2: zona de estudio forestal en clima Csa: T.M. de Enguera (Valencia, España)</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3: zona de estudio en un mosaico agroforestal: T.M. de Liria (Valencia, España)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4: zona de estudio en un regenerado post-incendio: T.M. de Chequilla (Guadalajara, España)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5: mosaico agrícola: T.M. de Barray (Albacete, España)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6: distanciómetro LaserAce 1000 Rangefinder (fuente: www.trimble.com).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 7: manejo del distanciómetro en el monte.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 8: método de medida de la altura desde una distancia cualquiera (fuente: www.trimble.com).</i>	<i>35</i>
<i>Figura 9: forcípula forestal (fuente: www. haglofsweden.com).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10: ScanStation P-40 (fuente: Leica).</i>	<i>35</i>
<i>Figura 11: manejo del escáner LiDAR en el monte.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12: esquema de trabajo para el tratamiento de los datos LiDAR.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 13: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU02</i>	<i>40</i>
<i>Figura 14: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU03.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 15: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU04.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 16: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU05.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 17: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU06.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU07.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 19: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU11.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 20: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU12.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 21: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU13.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 22: distribución de los puntos TLS por altura, segmentados cada 0,5 m. Parcela ESU14.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 23: segmentación de la nube de puntos a 1,3 m ± 0,1 m para la identificación del DBH. ESU03.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 24: determinación incompleta del DBH debido a la geometría de adquisición.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 25: vista de la parcela ESU02.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 26: vista de la parcela ESU03.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 27: vista de la parcela ESU04.....</i>	<i>54</i>

Figura 28: vista de la parcela ESU05.....	54
Figura 29: vista de la parcela ESU06.....	54
Figura 30: vista de la parcela ESU07.....	55
Figura 31: vista de la parcela ESU11.....	55
Figura 32: vista de la parcela ESU12.....	55
Figura 33: vista de la parcela ESU13.....	56
Figura 34: vista de la parcela ESU14.....	56
Figura 35: distribución de los valores de biomasa de la serie de datos (Mg/ha).....	61
Figura 36: correlación entre las variables de estudio.....	68
Figura 37: homocedasticidad del modelo.	73
Figura 38: distribución de los errores.....	73
Figura 39: vista de las parcelas de <i>Pinus sylvestris</i> L. en la provincia de Palencia.....	78
Figura 40: vista de las parcelas de <i>Pinus nigra</i> Arn. en la provincia de Palencia.....	78
Figura 41: vista de las parcelas de <i>Pinus pinaster</i> Ait. en la provincia de Palencia.....	79
Figura 42: composición RGB desde Sentinel-2A de la zona de estudio. Barrax, 2017.....	84
Figura 43: valores de NDVI en la zona de estudio. Barrax, 2017.....	84
Figura 44: composición RGB desde Sentinel-2A de la zona de estudio. Liria, 2017.	85
Figura 45: valores de NDVI en la zona de estudio. Liria, 2017.....	85
Figura 46: composición RGB desde Sentinel-2A de la zona de estudio. Enguera, 2017.	85
Figura 47: valores de NDVI en la zona de estudio. Enguera, 2017.....	85
Figura 48: características del ceptómetro Accupar LP-80 (fuente: Decagon Devices).....	90
Figura 49: LAI-2200 (izquierda) y el sensor óptico con cinco ángulos cenitales (derecha) (fuente: LiCOR).....	91
Figura 50: tipos de muestreo para una plantación irregular (izquierda) o en disposición regular (centro y derecha) (fuente: Proyecto FP-7 Imágenes).....	92
Figura 51: DHP "hacia abajo" (izquierda) y "hacia arriba" (derecha).....	93
Figura 52: frecuencias del valor LAI en Barrax, marzo de 2016.....	100
Figura 53: frecuencias del valor FAPAR en Barrax, marzo de 2016.	100
Figura 54: mediciones de FAPAR Vs LAI por ESU. Barrax, 2016.....	101
Figura 55: frecuencia de distribuciones de las medidas de campo de LAI. Liria, 2017.....	101
Figura 56: frecuencia de distribuciones de las medidas de campo de FAPAR. Liria, 2017.	102
Figura 57: mediciones de FAPAR Vs LAI por ESU. Liria, 2017.....	102
Figura 58: frecuencias del valor LAI en Enguera. Marzo de 2017.....	103
Figura 59: comparación de las variables biofísicas calculadas: LAI (derecha) y LAI efectivo(izquierda) con diferentes métodos: CEV5.1, CEV6.1 y fórmula de Miller. Barrax, 2016.	103
Figura 60: comparación de las variables biofísicas calculadas: LAI (derecha) y LAI efectivo (izquierda) con diferentes métodos (CEV5.1, CEV6.1 y fórmula de Miller) en relación con el FAPAR. Barrax, 2016.....	104
Figura 61: comparación de las variables biofísicas calculadas: LAI (derecha) y LAI efectivo (izquierda) con diferentes métodos: CEV5.1, CEV6.1 y fórmula de Miller. Liria, 2017.....	104

Figura 62: comparación de las variables biofísicas calculadas: LAI (derecha) y LAI efectivo (izquierda) con diferentes métodos (CEV5.1, CEV6.1 y fórmula de Miller) en relación con el FAPAR. Liria, 2017.	105
Figura 63: resultados del procesado de CAN-EYE "hacia arriba" en una zona forestal; a): imágenes originales; b): imágenes clasificadas; c): media de la fracción de huecos; d): cálculo del factor "clumping".	106
Figura 64: relación de las distribuciones de NDVI muestreados (puntos verdes) con los de la escena de referencia completa (cinco valores mayores y menores indicados en las líneas exteriores). Barrax, 2016.	107
Figura 65: relación de las distribuciones de NDVI muestreados (puntos verdes) con los de la escena de referencia completa (cinco valores mayores y menores indicados en las líneas exteriores). Liria, 2017.	107
Figura 66: relación de las distribuciones de NDVI muestreados (puntos verdes) con los de la escena de referencia completa (cinco valores mayores y menores indicados en las líneas exteriores). Enguera, 2017.	108
Figura 67a y b: prueba de regresiones múltiples (TF) aplicada a diferentes combinaciones de bandas. Las combinaciones de bandas se indican en las abscisas (1=G, 2=RED, 3=NIR y 4=SWIR). El error cuadrático medio ponderado (RMSE) se presenta en rojo junto con el RMSE de validación cruzada en verde. Los valores en cada terna indican el número de datos utilizados para la regresión con un peso inferior a 0,7, que podrían considerarse como valores atípicos; a), prueba para el LAI; b) prueba para el FAPAR. Barrax, 2016.	109
Figura 68a y b: ajustes de regresión en el cálculo de las variables biofísicas; a) LAI; b) FAPAR. Puntos negros: peso>0,7. Puntos vacíos: 0<peso<0,7. Cruces: peso=0. Barrax, 2016.	110
Figura 69a y b: prueba de regresiones múltiples (TF) aplicada a diferentes combinaciones de bandas. Las combinaciones de bandas se indican en las abscisas (1=GREEN, 2=RED, 3=NIR y 4=SWIR). El error cuadrático medio ponderado (RMSE) se presenta en rojo junto con el RMSE de validación cruzada en verde. Los valores en cada terna indican el número de datos utilizados para la regresión con un peso inferior a 0,7, que podrían considerarse como valores atípicos; a), prueba para el LAI; b) prueba para el FAPAR. Liria, 2017.	111
Figura 70a y b: ajustes de regresión en el cálculo del LAI; a) usando valores de NDVI; b) usando valores de cuatro bandas seleccionadas. Puntos negros: Peso>0,7. Puntos vacíos: 0<Peso<0,7. Liria, 2017.	111
Figura 71a y b: ajustes de regresión en el cálculo de FAPAR; a) usando NDVI; b) usando la combinación de cuatro bandas. Puntos negros: Peso>0,7. Puntos vacíos: 0<Peso<0,7. Liria, 2017.	112
Figura 72: prueba de regresiones múltiples (TF) para el cálculo de LAI aplicada a diferentes combinaciones de bandas. Las combinaciones de bandas se indican en las abscisas (1=G, 2=RED, 3=NIR y 4=SWIR). El error cuadrático medio ponderado (RMSE) se presenta en rojo junto con el RMSE de validación cruzada en verde. Los valores en cada terna indican el número de datos utilizados para la regresión con un peso inferior a 0,7, que podrían considerarse como valores atípicos. Enguera, 2017.	113
Figura 73: ajustes de regresión para LAI. Puntos negros: Peso>0,7. Puntos vacíos: 0<Peso<0,7. Cruces: peso=0. Enguera, 2017.	113
Figura 74: evaluación por el método de la envolvente convexa en un área de 400 Km ² . Izquierda, composición RGB del área de estudio. Derecha, mapa de validación de la función de transferencia para LAI: las zonas en azul claro corresponden a la aplicación de una envolvente estricta; en azul oscuro se representan las relacionadas con la envolvente cercana a la interpolación y en rojo las zonas donde la función ha sido extrapolada. Barrax, 2016.	114

Figura 75: evaluación por el método de la envolvente convexa en un área de 400 Km². Izquierda, composición RGB del área de estudio. Derecha, mapa de validación de la función de transferencia para LAI: las zonas en azul claro corresponden a la aplicación de una envolvente estricta; en azul oscuro se representan las relacionadas con la envolvente cercana a la interpolación y en rojo las zonas donde la función ha sido extrapolada. Liria, 2017..... 115

Figura 76: evaluación por el método de la envolvente convexa en un área de 400 Km². Izquierda, composición RGB del área de estudio. Derecha, mapa de validación de la función de transferencia para LAI: las zonas en azul claro corresponden a la aplicación de una envolvente estricta; en azul oscuro se representan las relacionadas con la envolvente cercana a la interpolación y en rojo las zonas donde la función ha sido extrapolada. En negro, máscara de suelo con valores de NDVI de 0,12. Enguera, 2017. 116

Figura 77: mapa de LAI obtenido por la aplicación de las funciones de transferencia. Barrax, 2016..... 116

Figura 78: mapa de FAPAR obtenido por la aplicación de las funciones de transferencia. Barrax, 2016. 116

Figura 79: mapa de LAI obtenido por la aplicación SNAP. Barrax, 2016. 117

Figura 80: mapa de FAPAR obtenido por la aplicación SNAP. Barrax, 2016. 117

Figura 81: mapa de LAI obtenido por la aplicación de las funciones de transferencia. Liria, 2017..... 117

Figura 82: mapa de FAPAR obtenido por la aplicación de las funciones de transferencia. Liria, 2017..... 117

Figura 83: mapa de LAI obtenido por la aplicación SNAP. Liria, 2017..... 118

Figura 84: mapa de FAPAR obtenido por la aplicación SNAP. Liria, 2017. 118

Figura 85: mapa de LAI obtenido por la aplicación de las funciones de transferencia. Enguera, 2017..... 118

Figura 86: mapa de LAI obtenido por la aplicación SNAP. Enguera, 2017..... 118

Figura 87: comparación de valores LAI obtenidos por la aplicación de las funciones de transferencia y por SNAP. Barrax, 2016. 119

Figura 88: comparación de valores LAI obtenidos por la aplicación de las funciones de transferencia y por SNAP. Liria, 2017..... 119

Figura 89: comparación de valores LAI obtenidos por la aplicación de las funciones de transferencia y por SNAP en zonas agrícolas puras. Barrax, 2016..... 119

Figura 90: comparación de valores LAI obtenidos por la aplicación de las funciones de transferencia y por SNAP en zonas de mosaico. Liria, 2017..... 119

Figura 91: comparación de valores FAPAR obtenidos por la aplicación de las funciones de transferencia y por SNAP en zonas agrícolas puras. Barrax, 2016..... 120

Figura 92: comparación de valores FAPAR obtenidos por la aplicación de las funciones de transferencia y por SNAP en zonas de mosaico. Liria, 2017..... 120

Figura 93: comparación de valores LAI obtenidos por la aplicación de las funciones de transferencia y por SNAP en zonas agrícolas puras. Liria, 2017..... 120

Figura 94: comparación de valores LAI obtenidos por la aplicación de las funciones de transferencia y por SNAP en zonas de mosaico. Liria, 2017..... 120

Figura 95 (derecha): comparación de valores LAI obtenidos por la aplicación de las funciones de transferencia y por SNAP en zonas forestales. Enguera, 2017..... 121

Figura 96: área del aeródromo de Enguera. a) en negro, zonas de suelo desnudo; b) valores de LAI=1,5 del producto L2B de SNAP; c) valor de LAI nulo obtenido por la función de transferencia. Enguera, 2017. 121

<i>Figura 97: relación entre LAI y biomasa en zonas mediterráneas. Para un amplio rango de biomasa, el LAI permanece sistemáticamente bajo.</i>	122
<i>Figura 98: NDVI derivado de Sentinel-2A. Liria, junio de 2017.</i>	134
<i>Figura 99: NDVI derivado de Sentinel-2A. Enguera, junio de 2017.....</i>	134
<i>Figura 100: muestreo de biomasa en Liria (Mg*ha⁻¹).....</i>	135
<i>Figura 101: muestreo de biomasa en Enguera (Mg*ha⁻¹).....</i>	135
<i>Figura 102: biomasa del monte regenerado (Mg*ha⁻¹)</i>	136
<i>Figura 103: biomasa del fustal (Mg*ha⁻¹)</i>	136
<i>Figura 104: comparación de la distribución de NDVI entre las parcelas (puntos verdes) y la imagen de satélite correspondiente (5 valores mayores y 5 valores menores, como líneas externas). Muestreo en Liria. Junio de 2017. Frec. acumulada mín. y máx. se refiere a los 5 valores mayores y 5 valores menores de las 200 frecuencias acumuladas; Frec. acumulada ESU se refiere a los valores acumulados de NDVI de las parcelas del inventario.</i>	138
<i>Figura 105: comparación de la distribución de NDVI entre las parcelas (puntos verdes) y la imagen de satélite correspondiente (5 valores mayores y 5 valores menores, como líneas externas). Muestreo en Enguera. Junio de 2017. Frec. acumulada mín. y máx. se refiere a los 5 valores mayores y 5 valores menores de las 200 frecuencias acumuladas; Frec. acumulada ESU se refiere a los valores acumulados de NDVI de las parcelas del inventario.....</i>	138
<i>Figura 106: valores medidos contra valores predichos tras la aplicación de procesos gaussianos: a) para Sentinel-2 y el mejor modelo genérico para todas las clases; b) para Landsat-8 y el mejor modelo genérico para la clase de regenerado; c) para Sentinel-2 y el mejor modelo genérico para la clase de regenerado; d) para Landsat-8 y el mejor modelo genérico para la clase de regenerado; e) para Sentinel-2 y el mejor modelo genérico para la clase de fustal; f) para Landsat-8 y el mejor modelo genérico para la clase de fustal; MAR: ajuste por la Major Axis Regression; N: número de muestras; B: sesgo estadístico (mean bias); R²: coeficiente de determinación; S: desviación estándar; RMSE: error cuadrático medio (root mean square error).</i>	143
<i>Figura 107: valores medidos contra valores predichos tras la aplicación de procesos gaussianos: a) para Sentinel-2 y Sentinel-1 y el mejor modelo genérico para todas las clases; b) para Landsat-8 y Sentinel-1 y el mejor modelo genérico para la clase de regenerado; c) para Sentinel-2 y Sentinel-1 y el mejor modelo genérico para la clase de regenerado; d) para Landsat-8 y Sentinel-1 y el mejor modelo genérico para la clase de regenerado; e) para Sentinel-2 y Sentinel-1 y el mejor modelo genérico para la clase de fustal; f) para Landsat-8 y Sentinel-1 y el mejor modelo genérico para la clase de fustal; MAR: ajuste por la Major Axis Regression; N: número de muestras; B: sesgo estadístico (mean bias); R²: coeficiente de determinación; S: desviación estándar; RMSE: error cuadrático medio (root mean square error).....</i>	145
<i>Figura 108: distribución de Pinus halepensis Mill. en Enguera (IFN3)</i>	145
<i>Figura 109: biomasa total en zonas segmentadas de Enguera (Mg*ha⁻¹).....</i>	145
<i>Figura 110: representación gráfica de las bases de datos: (a) indica los valores de incremento de biomasa muestreados en los bosques gestionados (managed) y no gestionados (Not_managed), con alguna anomalía detectada para los valores de biomasa más altos de los bosques no gestionados; (b) base de datos conjunta obtenida por los inventarios, donde se observa una distribución sesgada positiva. ...</i>	153
<i>Figura 111: valores de biomasa medidos Vs. estimados (GPR) para Sentinel-2 con una base de datos de 39 puntos, con valores de suelo de desnudo. MAR: ajuste de regresión del eje principal; N: número de muestras; B: sesgo medio; R² coeficiente de determinación; S: desviación estándar del sesgo; RMSE: error cuadrático medio. La línea discontinua es la línea 1:1; la línea continua es el ajuste MAR. Los</i>	

puntos verdes son parcelas de arbustos; los puntos rojos son parcelas de suelo desnudo...... 164

*Figura 112: identificación de un valor atípico para cada banda de MSI utilizada en este estudio. En el eje de abcisas, las bandas de Sentinel-2; el el eje de ordenadas, los valores de reflectividad*10.000.* 164

Figura 113: valores de biomasa medidos Vs. estimados (GPR) para Sentinel-2 con una base de datos de 32 puntos, sin valores de suelo de desnudo ni atípicos. MAR: ajuste de regresión del eje principal; N: número de muestras; B: sesgo medio; R² coeficiente de determinación; S: desviación estándar del sesgo; RMSE: error cuadrático medio. La línea discontinua es la línea 1:1; la línea continua es el ajuste MAR. Los puntos verdes son parcelas de arbustos...... 165

Figura 114: Resultado de la aplicación de los procesos gaussianos con el lenguaje de programación Python: valores de biomasa medidos Vs. estimados (GPR). R²: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio. 186

Figura 115: Resultado de la aplicación de los procesos gaussianos con el lenguaje de programación MATLAB®: valores de biomasa medidos Vs. estimados (GPR). MAR: ajuste de regresión del eje principal; N: número de muestras; B: sesgo medio; R² coeficiente de determinación; S: desviación estándar del sesgo; RMSE: error cuadrático medio. La línea discontinua es la línea 1:1; la línea continua es el ajuste MAR. Los puntos verdes son parcelas de arbustos. 187

*Figura 116: biomasa obtenida con Matlab® de una estructura de matorral de Quercus pyrenaica Willd. (Mg*ha⁻¹).* 188

*Figura 117: biomasa obtenida con Python de una estructura de matorral de Quercus pyrenaica Willd. (Mg*ha⁻¹).* 188

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: ejemplo de ecuaciones alométricas por fracción de biomasa para Pinus halepensis Mill. W_s es la biomasa del fuste, W_{b7} es la biomasa de ramas con un diámetro mayor que 7 cm, W_{b2-7} es la biomasa de ramas con un diámetro entre 2 y 7 cm, W_{b2-n} es la biomasa de ramas con un diámetro menor que 2 cm y de las acículas, W_r es la biomasa de las raíces.</i>	12
<i>Tabla 2: zonas de estudio y sus características</i>	13
<i>Tabla 3: estratos 01 a 04 del IFN3 en la provincia de Valencia.....</i>	15
<i>Tabla 4: formatos de salida de la nube de puntos.</i>	36
<i>Tabla 5: parcelas de muestreo.....</i>	38
<i>Tabla 6: biomasa total por parcela y extrapolada al estrato.</i>	39
<i>Tabla 7: herramientas para el tratamiento de la nube de puntos.</i>	39
<i>Tabla 8: comparación de alturas máximas por parcela según el método de medida; $H_{max IF}$ (m) corresponde a la mayor altura medida en el inventario forestal, en metros y $H_{max TLS}$ (m) corresponde a la mayor altura medida con el LiDAR terrestre, en metros.....</i>	43
<i>Tabla 9: comparación de alturas máximas por parcela según el método de medida; $H_{max IF}$ (m) corresponde a la mayor altura medida en el inventario forestal, en metros y $H_{max TLS}$ (m) corresponde a la mayor altura medida con el LiDAR terrestre.....</i>	43
<i>Tabla 10: costes de los materiales de trabajo. Precios con IVA.....</i>	44
<i>Tabla 11: tiempo de adquisición de los datos de campo por parcela.....</i>	44
<i>Tabla 12: costes por parcela.....</i>	45
<i>Tabla 13: valores dasométricos de las parcelas de estudio.</i>	62
<i>Tabla 14: bandas y amplitud del sensor Landsat-5 TM (elaboración propia).....</i>	63
<i>Tabla 15: coeficientes de TC3 para reflectividades de Landsat TM. Adaptado de Crist (1985).</i>	66
<i>Tabla 16: variables independientes obtenidas del sensor Landsat-5 TM.....</i>	66
<i>Tabla 17: descripción de los valores de biomasa (W) y las variables radiométricas.....</i>	67
<i>Tabla 18: coeficientes de correlación de Pearson</i>	67
<i>Tabla 19: estimadores β y p-valor para el modelo con todas las variables.....</i>	71
<i>Tabla 20: estimadores β y p-valor para la selección variables automática.</i>	72
<i>Tabla 21: centro de las áreas de estudio.....</i>	86
<i>Tabla 22: variables obtenidas por instrumento</i>	87
<i>Tabla 23: distribución de las bandas de Sentinel-2A en el espectro electromagnético.....</i>	95
<i>Tabla 24: clasificación de la escena por SEN2COR.....</i>	96
<i>Tabla 25: identificación de las imágenes Sentinel-2 usadas en el estudio.....</i>	96
<i>Tabla 26: características de la órbita de las imágenes Sentinel-2 usadas en el estudio</i>	97
<i>Tabla 27: funciones de transferencia aplicadas con los valores de reflectividad de las cuatro bandas seleccionadas sobre los 400 Km² de la escena de estudio para cada variable biofísica, con sus errores asociados RMSE con validación cruzada (RC) y ponderada (RW). Barrax, 2017.....</i>	109

<i>Tabla 28: funciones de transferencia aplicadas con los valores de reflectividad de las cuatro bandas seleccionadas sobre los 400 Km² de la escena de estudio para cada variable biofísica, con sus errores asociados RMSE con validación cruzada (RC) y ponderada (RW). Liria, 2017.</i>	112
<i>Tabla 29: funciones de transferencia aplicadas con los valores de reflectividad de las cuatro bandas seleccionadas sobre los 400 Km² de la escena de estudio para cada variable biofísica, con sus errores asociados RMSE con validación cruzada (RC) y ponderada (RW). Enguera, 2017.</i>	113
<i>Tabla 30: clasificación de los píxeles en la escena de estudio. 0: extrapolación; 1: envolvente amplia al 95%; 2: envolvente estricta al 99%. Barrax, 2016.</i>	114
<i>Tabla 31: clasificación de los píxeles en la escena de estudio. 0: extrapolación; 1: envolvente amplia al 95%; 2: envolvente estricta al 99%. Liria, 2017.</i>	115
<i>Tabla 32: clasificación de los píxeles en la escena de estudio. 0: extrapolación; 1: envolvente amplia al 95%; 2: envolvente estricta al 99%. Enguera, 2017.</i>	115
<i>Tabla 33: identificación de las imágenes Sentinel-2 usadas en el estudio.</i>	134
<i>Tabla 34: identificación de la imagen Landsat-8.</i>	134
<i>Tabla 35: identificación de la imagen Sentinel-1.</i>	135
<i>Tabla 36: valores estadísticos de biomasa (Mg*ha⁻¹) de los muestreos de Liria y Enguera. Junio de 2017.</i>	136
<i>Tabla 37: valores estadísticos de biomasa (Mg*ha⁻¹) segmentado por monte regenerado y fustal y para una base de datos genérica.</i>	136
<i>Tabla 38: resumen de los estadísticos obtenidos mediante la aplicación de procesos gaussianos a la base de datos, dependiendo de su aplicación para todo el conjunto o segmentando por clases. MAR: Major Axis Regression; R²: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.</i>	141
<i>Tabla 39: resumen de los estadísticos obtenidos mediante la aplicación de procesos gaussianos a la base de datos, dependiendo de su aplicación para todo el conjunto o segmentando por clases y con la inclusión de información RADAR. MAR: Major Axis Regression; R²: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.</i>	143
<i>Tabla 40: identificación de las imágenes Landsat</i>	152
<i>Tabla 41: valores estadísticos del crecimiento de la biomasa (Mg*ha⁻¹) en bosques gestionados y no gestionados.</i>	153
<i>Tabla 42: estadísticos de los valores de crecimiento de la biomasa (Mg*ha⁻¹). 2011–2017. ..</i>	154
<i>Tabla 43: biomasa (W) y valores de reflectividad (*10.000) de las bandas MSI de Sentinel-2 (B2 a B12, inclusives) para el valor atípico.</i>	164
<i>Tabla 44: estructura de la tabla de datos de campo</i>	185
<i>Tabla 45: diferencia de resultados según el lenguaje de programación. R²: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.</i>	187

GLOSARIO Y ACRÓNIMOS

3

3D Hace referencia al espacio tridimensional.

A

AGB *Above Ground Biomass*, biomasa excluyendo aquella de las raíces.

ALA *Average Leaf Area*, área foliar media.

AOT *Aerosol Optical Thickness*, espesor óptico de la atmósfera.

APDA *Atmospheric Precorrected Differential Absorption*.

ARD *Automatic Relevance Determination*, método automático de determinación.

ASTER *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*.

B

B Sesgo estadístico (*mean bias*).

BEF *Biomass Expansion Factor*, factor de expansión de la biomasa.

C

CEOS *Committee on Earth Observation Satellite*.

CEOS LPV *CEOS - Land Product Validation Subgroup*.

D

DAP Diámetro a la altura del pecho. Véase DBH.

Dasometría Parte de la dasonomía que se ocupa de las mediciones de árboles y masas forestales, así como del estudio de las leyes métricas que rigen su evolución.

Dasonomía Conjunto de disciplinas que estudian los bosques respecto de su formación, manejo, reproducción y aprovechamiento.

DBH *Diameter at Breast Height*, diámetro del árbol a la altura del pecho, típicamente medido a 1,30 m de altura, expresado en cm.

Dendrometría Parte de la dasometría que trata de la medida de las dimensiones del árbol individualmente, del estudio de su forma y de la determinación de su volumen.

Densidad de puntos Número de puntos por unidad de medida. Normalmente cuanto mayor sea la densidad, mejor se representan los elementos.

DGCN *Dirección General de Conservación de la Naturaleza*.

DHP *Digital Hemispheric Photography*.

E

ECV *Essential Climate Variables*, variables climáticas esenciales; variables físicas, químicas o biológicas que caracterizan el clima de la Tierra.

Escaneado Hace referencia a una única sesión de toma de datos desde un origen y orientación concretos del escáner.

ESU *Elementary Sampling Unit*.

ESA *European Space Agency*.

F

FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
FAPAR	<i>Fraction of Absorbed Photo-synthetically Active Radiation.</i>
FCover	<i>Fraction of Vegetation Cover.</i>
Fustal	Clase natural de edad que se alcanza cuando la masa supera un diámetro normal medio de 20 cm.

G

GCOS	<i>Global Climate Observing System.</i>
GEO	<i>Group on Earth Observations</i>
GMES	<i>Global Monitoring for Environment and Security.</i>
GPP	<i>Gross Primary Production</i> , producción primaria neta.
GPR	<i>Gaussian Process</i> , proceso gaussiano; método bayesiano y no paramétrico de aprendizaje automático.
GPS	<i>Global Positioning System</i> , sistema de posicionamiento global.

H

ht	Altura total del árbol, medido como la longitud de su fuste desde la base hasta el ápice, expresada en m.
-----------	---

I

IFN2	Segundo Inventario Forestal Nacional español (1986-1996).
IFN3	Tercer Inventario Forestal Nacional español (1997-2007).
IFN4	Cuarto Inventario Forestal Nacional español (2007-2017).
IMAGINES	<i>Implementing Multi-scale Agricultural Indicators Exploiting Sentinels.</i>
INRA	<i>Institut National de la Recherche Agronomique.</i>
IR	<i>Infra-Red.</i>
IRLS	<i>Iteratively Re-weighted Least Squares.</i>

K

Kernel	Un <i>kernel</i> , o función de covarianza, describe la covarianza de las variables aleatorias del proceso gaussiano y se utiliza para medir la similitud entre dos puntos. Junto con la función de media, el <i>kernel</i> define completamente un proceso gaussiano.
k-NN	<i>k-nearest neighbours</i> , los k vecinos más cercanos.
Kruskal-Wallis	<i>Prueba de...:</i> método estadístico no paramétrico que no asume normalidad en los datos y que sirve para determinar si un grupo de datos pertenece a la misma población.

L

LAI	<i>Leaf Area Index</i> , índice de área foliar. Magnitud adimensional que relaciona la superficie de una cara de la hoja verde con la superficie del terreno (m ² /m ²) en la vegetación frondosa.
Landsat-5 TM	Sensor <i>Thematic Mapper</i> a bordo de la misión Landsat-5 (1984-2013).
Landsat-8 OLI	Sensor <i>Operational Land Imager</i> a bordo de la misión Landsat- 8 (2013 – actualidad).
Láser	<i>LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> : haz intenso de luz.

Latizal	Clase natural de edad que se inicia con la poda natural y termina cuando el diámetro alcanza 20 cm.
LiDAR	<i>Light Detecting and Ranging</i> : término usado frecuentemente para referirse a los escaneados con láseres aerotransportados pero que también se aplica a los sistemas terrestres.
LOOCV	<i>Leave-One-Out-Cross-Validation</i> .
LUT	<i>Look-Up-Table techniques</i> .

M

MAR	<i>Major Axis Regression</i> , método de regresión ortogonal.
MDE	Modelo Digital de Elevaciones.
MDT	Modelo Digital del Terreno.
MID57	Suma de las reflectividades de las bandas 5 y 7 de Landsat-5 TM.
MLST	<i>Mean Local Solar Time</i> .
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i> .
Monte bravo	Clase natural de edad en las masas forestales que ocupa desde que se produce una tangencia de copas hasta que comienza la poda natural.
MSI	<i>MultiSpectral Instrument</i> , instrumento a bordo de la misión Sentinel-2.
m.s.n.m.	metros sobre el nivel del mar. Altitud.

N

NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> , índice de vegetación de diferencia normalizada. Obtenido por la diferencia entre las medidas de reflexión espectral en las regiones del rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, $NDVI = (\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo}) / (\text{infrarrojo cercano} + \text{rojo})$
NIR	<i>Near Infra-Red</i> , parte del espectro en el infrarrojo cercano.
Nube de puntos	Conjunto de coordenadas XYZ en un sistema de coordenadas tridimensional. También puede incluir información adicional, como los valores de color y de reflectividad.

O

OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> .
------------	---------------------------------

P

PAI	<i>Plant Area Index</i> .
PATFOR	Plan de Acción Territorial Forestal de la <i>Comunitat Valenciana</i> .
PNOA	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.
PPN	Producción primaria neta, entendida como la energía fijada por fotosíntesis menos la energía empleada en la respiración; es la cantidad de energía almacenada en la planta como materia orgánica.

R

R²	Coficiente de determinación. Representa la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicada conjuntamente por todas las variables predictoras del modelo de regresión.
RADAR	<i>RAnge Detection And Ranging</i> .
RC	Error cuadrático medio de la validación cruzada de RMSE.
Regenerado	También repoblado. Clase natural de edad en las masas forestales hasta que se alcanza 1,30 de altura o hay tangencia de copas.

Registro	Proceso de transformación de las nubes de puntos a un sistema de coordenadas común. Este proceso también se conoce con el nombre de alineación o consolidación.
RGB	<i>Red-Green-Blue.</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> , error cuadrático medio.
RNA	Redes Neuronales Artificiales.
RW	<i>Weighted RMSE.</i>

S

S	Desviación típica o estándar.
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i> , RADAR de apertura sintética.
SEN2COR	Procesador para la obtención de los niveles L2A en Sentinel-2.
Sentinel-1	Satélite del Programa Copernicus con instrumental SAR en banda C.
Sentinel-2	Satélite del Programa Copernicus con instrumental en 13 bandas del espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio.
SLT	<i>Solar Local Time.</i>
SNAP	<i>Sentinel Application Platform.</i>
SPOT /VGT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre / VEGETATION.</i>
SVM	<i>Support Vector Machines</i> , máquinas de vectores de soporte.
SWIR	<i>Short Wave Infra-Red</i> , parte del espectro en el infrarrojo medio.

T

TC3	<i>Tasseled-Cap 3</i> , combinación lineal de todas las bandas de Landsat-5 TM, excepto la banda 6, que reinterpreta los datos con un significado físico referido a la humedad.
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanner</i> , escáner láser terrestre.
TM1	Valor de la reflectividad en la banda 1 del sensor TM del satélite Landsat-5. Por extensión, TM2, TM3, TM4 se refieren a los valores de reflectividad obtenidos en las bandas 2, 3 y 4 respectivamente del mismo sensor.
Tamaño del haz	Diámetro del haz láser emitido por el escáner, también conocido como huella.

U

USDA	<i>United States Department of Agriculture.</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i> , sistema de coordenadas.

W

W	Biomasa. Si no se especifica la fracción arbórea, entendida como biomasa total de materia seca expresada en Mg*ha ⁻¹
WGS-84	<i>World Geodetic System.</i>
