

ENTREGABLE PROYECTOS— 2023-2024

Desarrollo de métodos de análisis, no destructivos y por teledetección, para la optimización de la explotación y mejora de la calidad de madera de *Pinus halepensis*

“WOODBYSAT”

Entregable 7.1: Modelos y variables representativos de la calidad de madera de pies de *P. halepensis*

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas

Número de proyecto: 22300053

Expediente: IMDEEA/2023/38

Duración: del 01/07/2023 al 30/09/2024

Coordinado en AIDIMME por: Blasco Mollá, Francisco



AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

Contenido

Contenido.....	1
1 Introducción y objetivos del entregable	2
2 Obtención de variables de interés	3
a) Estudio de las relaciones 1 a 1 entre variables	6
Aín - Incofusta	6
Calidad de madera.....	8
VCC	13
3 Modelos y algoritmos.	15
Calidad de madera.....	15
VCC	16
4 Resultados obtenidos.....	18
5 Acciones de difusión y transferencia.....	19
6 Conclusiones.....	20
7 Anexos y bibliografía	21

1 Introducción y objetivos del entregable

La finalidad de este entregable es obtener modelos para las variables de interés obtenidas de los pies de *Pinus halepensis* mediante los métodos descritos en el entregable E6.1, para las 6 parcelas de estudio analizadas. En el entregable E6.1 partimos de una base de datos con indicadores descriptivos de las diferentes parcelas forestales, se pretende realizar una selección más representativa de las variables que estén más relacionadas con indicadores de calidad de la madera y el volumen.

Para ello el entregable se divide en tres partes, en primer lugar, se realiza un análisis de los datos disponibles en la base de datos se seleccionan las variables que puedan ser más representativas para la obtención de calidad de madera, se busca que estas variables presenten características de facilidad de obtención y fiabilidad y considerando los diferentes métodos de obtención de datos.

En segundo lugar, se realizan los análisis de las relaciones directas entre las diferentes variables, diferenciando las parcelas de Aín e Incofusta con las parcelas de Serra, Agrés y Ares, donde las primeras nos permiten relacionar las variables de calidad de la madera con métodos destructivos, y las segundas con variables obtenidas mediante Sentinel y TLS. Estas relaciones nos permitirán generar modelos de regresión entre estas variables.

Finalmente, se evaluarán los modelos obtenidos y se evaluarán para obtener que variables obtenidas por métodos de evaluación de calidad de madera pueden ser más representativas de la calidad de los pies de *Pinus halepensis* con mayor potencial de explotación maderero. Estos modelos obtenidos se pondrán en uso para la comprobación de su fiabilidad mediante técnicas estadísticas aplicables a esta tipología de datos.

2 Obtención de variables de interés

Uno de los métodos no destructivos empleados para la determinación de la calidad de la madera es mediante el uso de la herramienta sylvatest, que nos permite estimar variables de calidad estructural de la madera mediante los indicadores MOE y MOR.

En primer lugar, los pies de *Pinus halepensis* de Aín e Incofusta han sido sometidos a las mediciones mediante sylvatest tanto en verde, como en seco. Esta herramienta, habitualmente, se utiliza para madera seca, sin embargo, en este caso es necesario evaluar la relación entre las variables MOE y MOR en verde frente a la seco y evaluar la relación existente entre ambas mediciones.

El valor de MOE y MOR de 33 pies son los empleados para realizar los análisis estadísticos para definir la relación entre los valores en verde y seco. Las principales relaciones estudiadas son:

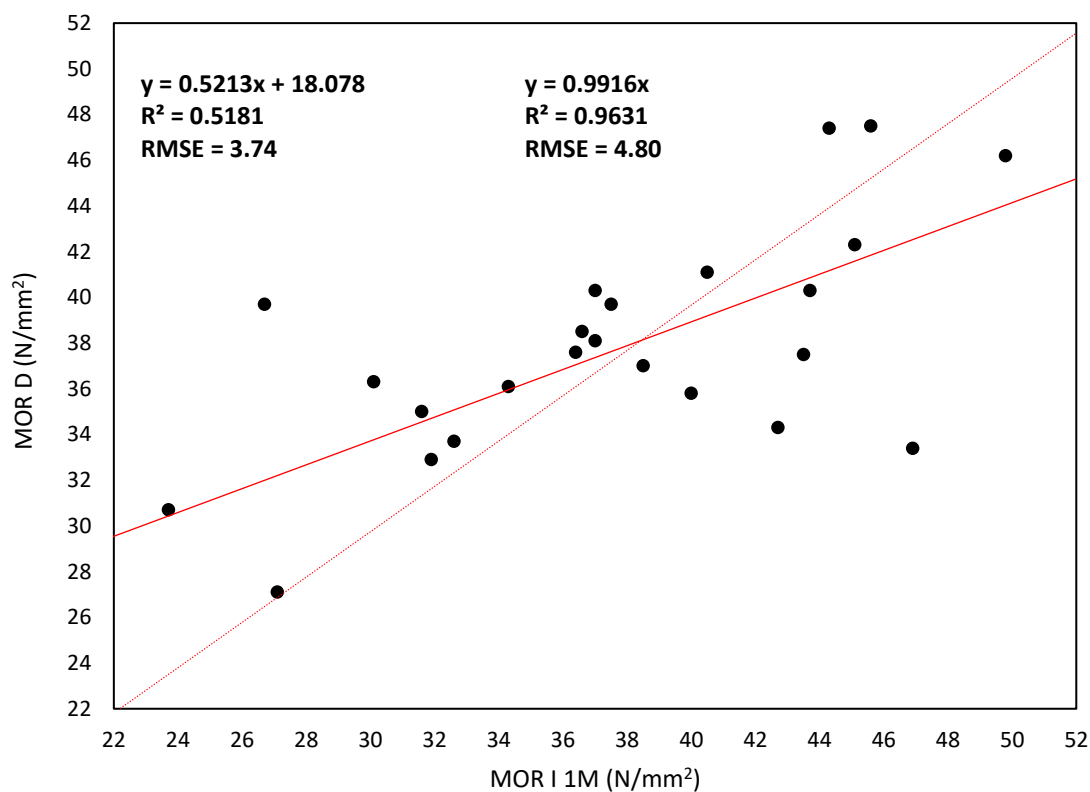
- (MOR I – MOR DS): Los valores de MOR indirectos (toma de datos no destructiva) en verde frente a los valores de MOR directos en seco.
- (MOR DV – MOR DS): Los valores de MOR directo (toma de datos destructiva) en verde frente a los valores de MOR directos en seco.

El objetivo es obtener una relación lineal lo suficientemente significativa y fiable para poder aplicarla a mediciones en verde donde únicamente se empleen métodos no destructivos, en nuestro caso se aplicará la relación obtenida los pies de *Pinus halepensis* en las parcelas donde se han realizado tala de pies, es decir, en las parcelas de Serra, Agrés y Ares del maestrat. De esta forma a partir de las mediciones obtenidas mediante métodos no destructivos (en este caso sylvatest) podemos obtener valores de MOE y MOR en seco sin necesidad de realizar una tala para obtener la medición directa.

Antes de empezar a realizar los análisis estadísticos es importante recordar la obtención de los valores del MOE y el MOR, como se explicó en el entregable E6.1, ya que estos valores dependen de la densidad y la velocidad corregida proveniente de la herramienta sylvatest. Esta relación entre ambas variables indica que son variables dependientes y, por lo tanto, no tiene sentido realizar los análisis de ambas variables. En este caso se ha decidido emplear el MOR como variable indicativa de la calidad estructural de la madera.

- MOR indirecto vs directo (seco)

Según los valores de MOR obtenidos mediante el método indirecto en verde (MOR I 1M) los valores se encuentran entre 20,50 y 49,80 N/mm², y entre 18,70 y 47,50 N/mm² para el método directo en seco (MOR DS). Se puede observar una pequeña diferencia entre los valores máximos y mínimo respetando el rango de valores en ambas mediciones. En la figura se pueden observar la distribución de las mediciones realizadas en estos dos métodos, exceptuando un par de casos, se puede observar una tendencia clara representada por la ecuación $y = 0.5213x + 18.078$ con un valor de $R^2 = 0.52$ y un $RMSE = 3.74$. A la hora de analizar la regresión lineal entre estas dos variables es posible forzar la recta de ajuste por el origen (0,0) indicando que si en el caso que el valor sea 0 en un método ocurre lo mismo en es otro. Esto genera una ecuación diferente $y = 0.9916x$ que permite observar la relación directa entre ambos métodos y valor de $RMSE = 4.80$ algo superior debido a forzar la recta.

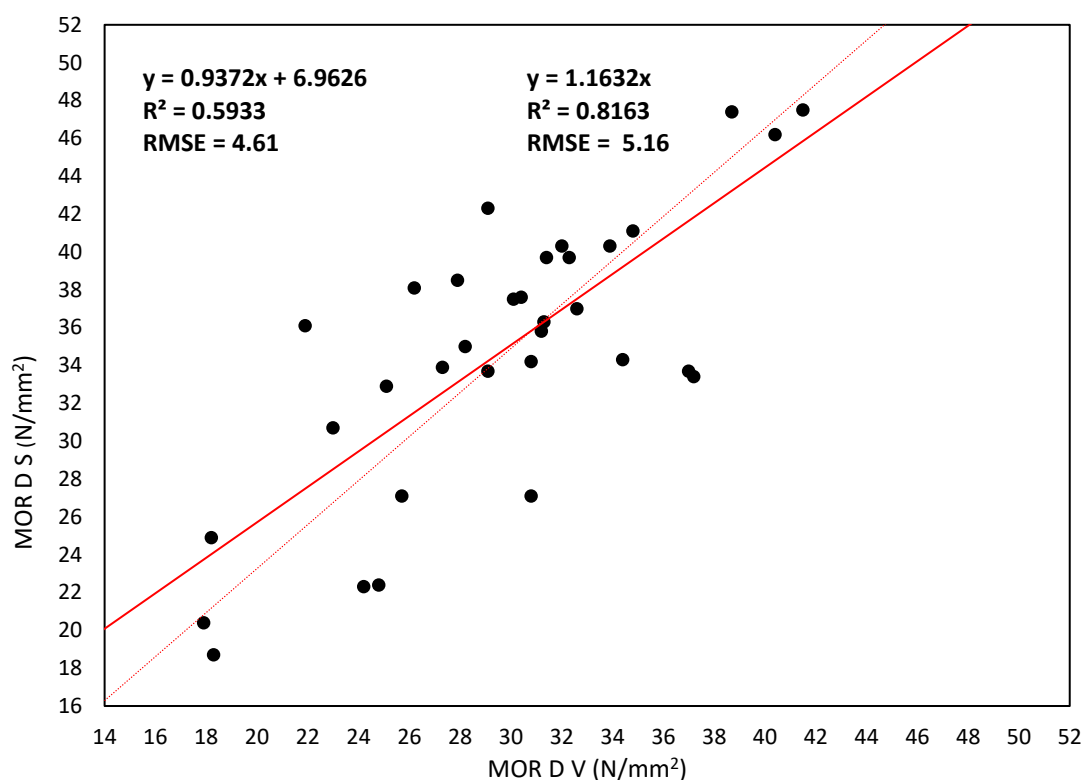


Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR I V – MOR D S)

- MOR directo (verde) vs directo (seco)

MODELOS Y VARIABLES REPRESENTATIVOS DE LA CALIDAD DE MADERA DE PIES DE *P. HALEPENSIS*

Según los valores de MOR obtenidos mediante el método directo en verde (MOR D V) los valores se encuentran entre 17.90 y 41.50 N/mm², y entre 18,70 y 47,50 N/mm² para el método directo en seco (MOR D S). Se puede observar una pequeña diferencia entre los valores máximos y mínimo observando que el método en verde subestima ligeramente a los valores obtenidos en seco. En la figura se pueden observar la distribución de las mediciones realizadas en estos dos métodos, se puede observar una tendencia clara representada por la ecuación $y = 0.9372x + 6.9626$ con un valor de $R^2 = 0.59$ y un $RMSE = 4.61$. A la hora de analizar la regresión lineal entre estas dos variables es posible forzar la recta de ajuste por el origen (0,0) indicando que si en el caso que el valor sea 0 en un método ocurre lo mismo en es otro. Esto genera una ecuación diferente $y = 1.1632x$ que permite observar la relación directa entre ambos métodos, esta ecuación también es indicadora de la subestimación de les método en verde y valor de $RMSE = 5.16$ algo superior debido a forzar la recta.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D V – MOR D S)

La relación lineal obtenida del análisis estadístico ente el MOR verde y el MOR en seco permite

el cálculo del MOR en seco en aquellas parcelas donde no se ha realizado métodos de medición destructivos, concretamente estos casos son los correspondientes a las parcelas de Serra, Agrés y Ares, donde si se han realizado las mediciones indirectas.

A continuación, en el siguiente apartado se pretende realizar más relaciones entre las variables indicativas de calidad de madera (MOR) y las variables restantes obtenidas en el entregable E.6.1

a) Estudio de las relaciones 1 a 1 entre variables

En este apartado se analizará la relación de las variables de la base de datos frente a tres indicadores clave:

- Volumen con corteza (VCC)
- Calidad estructural de la madera (Calidad)

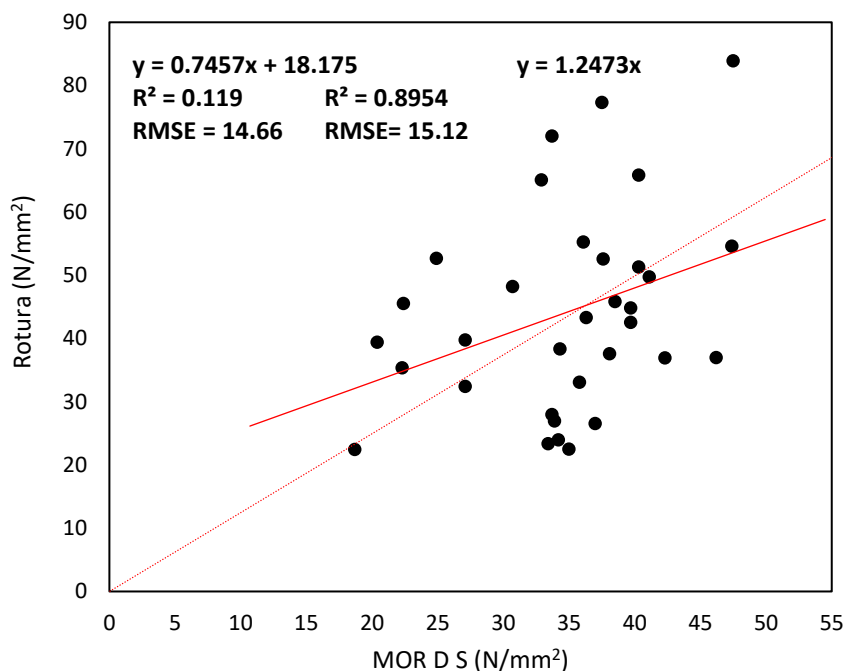
Aín - Incofusta

En primer lugar, como se ha comentado anteriormente los pies de Aín e Incofusta han sido talados para ser sometidos a métodos destructivos para la obtención de variables indicativas de la calidad de la madera, estos son el MOE, MOR y la Resistencia de flexión axial.

En el apartado anterior se ha realizado la relación lineal entre la variable MOR indirecta en verde frente al MOR directo en seco, obteniendo resultados adecuados para generar un modelo de verde a seco, a continuación, se realiza un proceso estadístico similar para relacionar estas variables con la variable de resistencia obtenida del proceso de rotura y analizar si este otro indicador muestra una mejor relación entre ellas.

- MOR directo (seco) vs Rotura

En la figura siguiente se pueden observar la distribución de la mediciones realizadas en estos dos métodos, los puntos en la gráfica muestran una dispersión muy alta y un ajuste de la recta poco prometedor tal y como se puede observar en la ecuación $y = 0.7457x + 18.175$ con un valor de $R^2 = 0.119$ y un $RMSE = 14.66$. A la hora de analizar la regresión lineal entre estas dos variable es posible forzar la recta de ajuste por el origen (0,0) indicando que si en el caso que el valor sea 0 en un método ocurre lo mismo en es otro. Esto genera una ecuación diferente $y = 1.2473x$ que permite observar la relación directa entre ambos métodos y valor de $RMSE = 15.12$ algo superior debido a forzar la recta.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Rotura)

Debido a la mala relación obtenida entre el MOR directo en seco y los valores de la rotura, se decide emplear el valor del MOR como variable indicativa de la calidad de la madera.

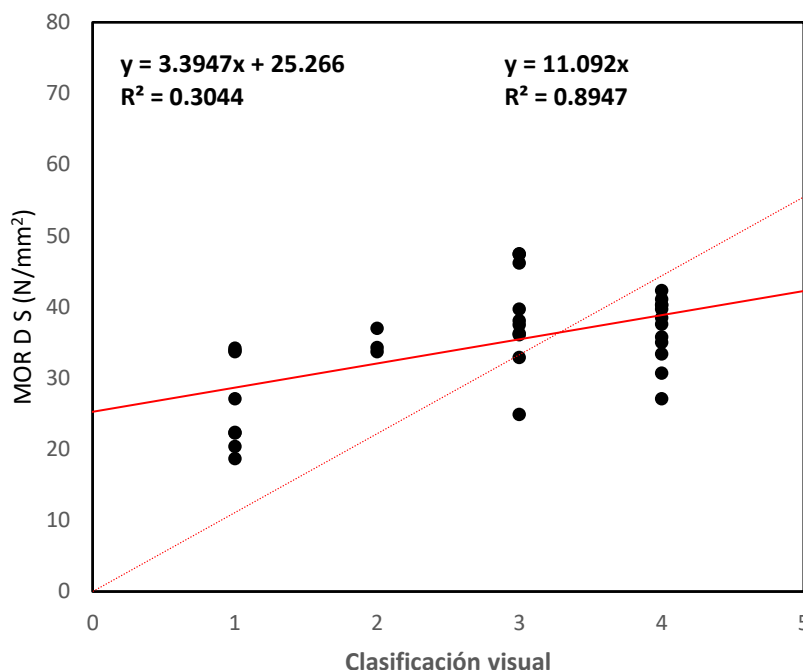
Además, en los pies de Aún se tomaron mediciones de crecimiento mediante la extracción de tubillones con barrena y se realizó el estudio de calidad (explicados en el E6.1). Con estas variables también se pretende analizar si existe alguna relación directa entre estos valores y el MOR D S.

- MOR directo (seco) vs Crecimiento

Como se puede observar por la recta obtenida $y = 1.9748x + 32.403$ y los valores de $R^2 = 0.19$ y $RMSE = 4.84$, se puede concluir que la relación no es robusta ni fiable.

- MOR directo (seco) vs clasificación visual

Como se puede observar por la recta obtenida $y = 3.3947x + 25.266$ y los valores de $R^2 = 0.30$ y $RMSE = 5.38$, se puede concluir que la relación no es robusta ni fiable.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR DS – Clasificación visual)

Calidad de madera

En este apartado se realizan las relaciones de las variables obtenidas en las parcelas de estudio (Serra, Agrés y Ares), descritas en el entregable E6.1, con objetivo de buscar modelos que puedan describir adecuadamente la calidad de la madera (MOR_DS). Para mayor robustez a la hora de realizar los análisis se incorporan las mediciones tomadas en las 15 parcelas correspondientes al proyecto WOODFOREST, las cuales han sido incorporadas a la base de datos final empleada en este apartado.

Las variables empleadas en este análisis estadístico son:

- **Volumen con corteza (VCC):** esta variable se ha obtenido a partir de los datos capturados por el TLS, las unidades son m3/ha.

- **Diámetro (D):** esta variable se ha obtenido a partir de los datos capturados por el TLS, las unidades son milímetros.
- **Altura media (Hm):** esta variable se ha obtenido a partir de los datos capturados por el TLS, las unidades son metros.
- **Altura máxima (Hmax):** esta variable se ha obtenido a partir de los datos capturados por el TLS, las unidades son metros
- **Sentinel:** son un conjunto de variables correspondiente a índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes satelitales de Sentinel-2 entre los años 2018 y 2023. Concretamente está comprendida por un conjunto de 28 variables adimensionales y corresponden a el valor medio de 5 años.
- **Crecimiento:** esta variable se ha obtenido a partir la medición de los anillos de los tubillones extraídos mediante la barrena, las unidades son milímetros.
- **Clasificación Visual:** esta variable se ha obtenido a partir de un análisis visual de las características descriptivas de los árboles de la parcela.

En primer lugar, se realizan relaciones una a una entre cada una de las variables (Exceptuando el conjunto de variables de Sentinel) y la variable de calidad de madera seleccionada (MOR D S).

- MOR directo (seco) vs VCC

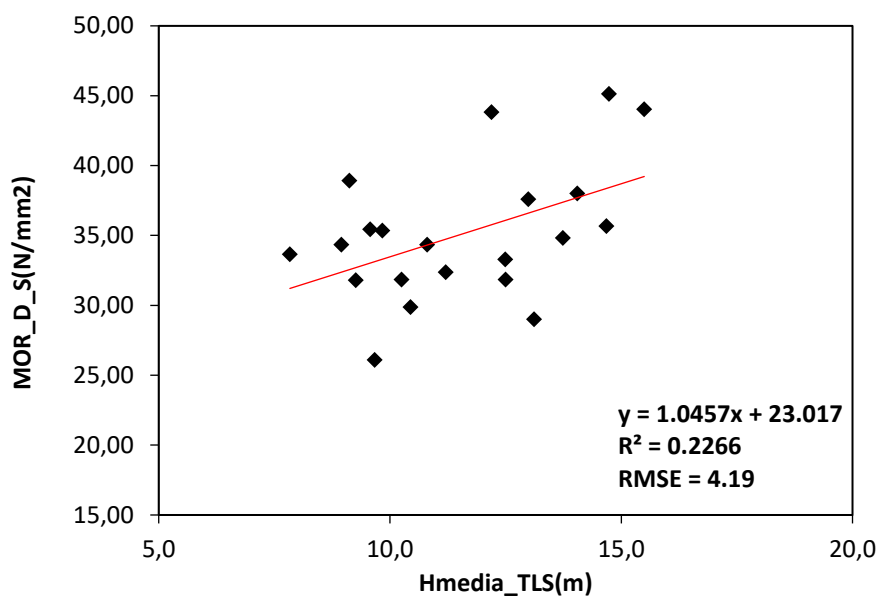
Tanto la recta obtenida $y = 0.0121x + 33.395$ como el valor de $R^2 = 0.0194$ nos confirma que la posibilidad de emplear la variable VCC como variable indicativa de la calidad de la madera.

- MOR directo (seco) vs altura media (Hm)

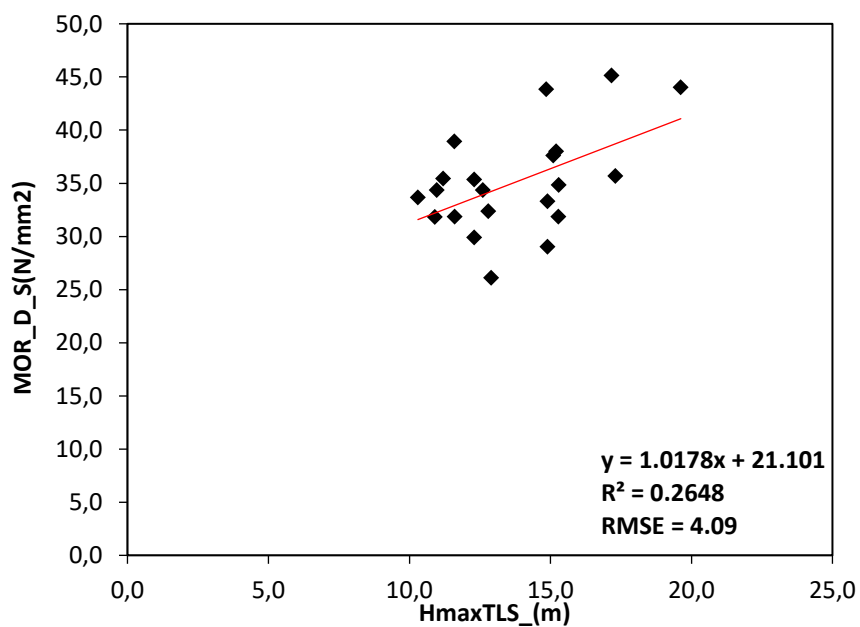
Al observar la figura se puede observar que la variable muestra una mejor relación respecto a la calidad de la madera, a diferencia del VCC, la recta que muestra esta regresión es algo más significativa $y = 1.0457x + 23.017$, aún con un valor de $R^2 = 0.2266$, el valor de $RMSE = 4.19$ indica una variabilidad del error al predecir la calidad de la madera por debajo del 10% ($MAPE = 9,8\%$)

- MOR directo (seco) vs Diámetro (D)

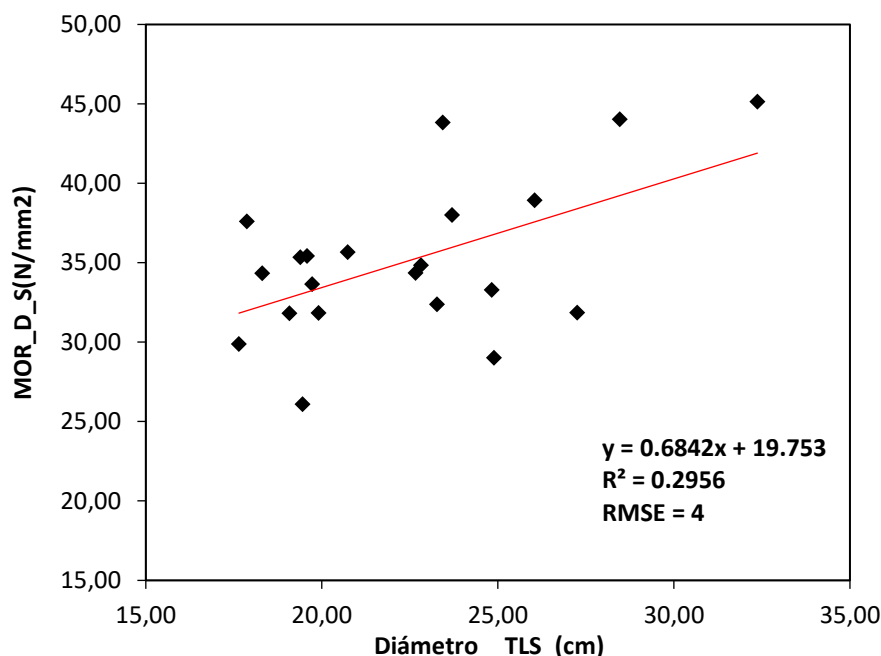
En la figura podemos observar una regresión bastante similar a la de la figura 8, este par de variables muestran un resultado ligeramente mejor tanto en el valor de $R^2 = 0.2956$ y de $RMSE = 4$, y presenta la siguiente ecuación de recta $y = 0.6842x + 19.753$.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – HM)



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Hmax)



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Dm)

Después de estos tres análisis de regresión simple se ha llegado a la conclusión que de las tres variables (VCC, Hmedia y Diámetro), la altura media y el diámetro son las únicas variables que presentan algún tipo de relación lineal con la variable de calidad de la madera. Por lo tanto, precedemos a realizar un multivariable con ambas variables (Hm y D) en el intento de mejorar y fortalecer la relación que existe entre ellas.

- MOR directo (seco) vs (Diámetro (D) y altura media (Hm))

Una regresión lineal múltiple empleando las variables de diámetro y altura media genera la siguiente ecuación $y = 0.5085x_1 + 0.5571x_2 + 17.2533$, donde la x_1 corresponde a los valores de diámetro en centímetros y la x_2 corresponde a los valores de altura medidas en metros. La ecuación da un peso equitativo a las dos variables en coherencia a las regresiones lineales simples anteriores. Los valores de $R^2 = 0.34$, el valor de $RMSE = 3.87$ suponiendo una mejora significativa.

- MOR directo (seco) vs (Diámetro (D) y altura máxima (Hmax))

Una regresión lineal múltiple empleando las variables de diámetro y altura máxima genera la siguiente ecuación $y = 0.4623x_1 + 0.5833x_2 + 17.2533$, donde la x_1 corresponde a los valores de diámetro en centímetros y la x_2 corresponde a los valores de altura máximas en metros. A

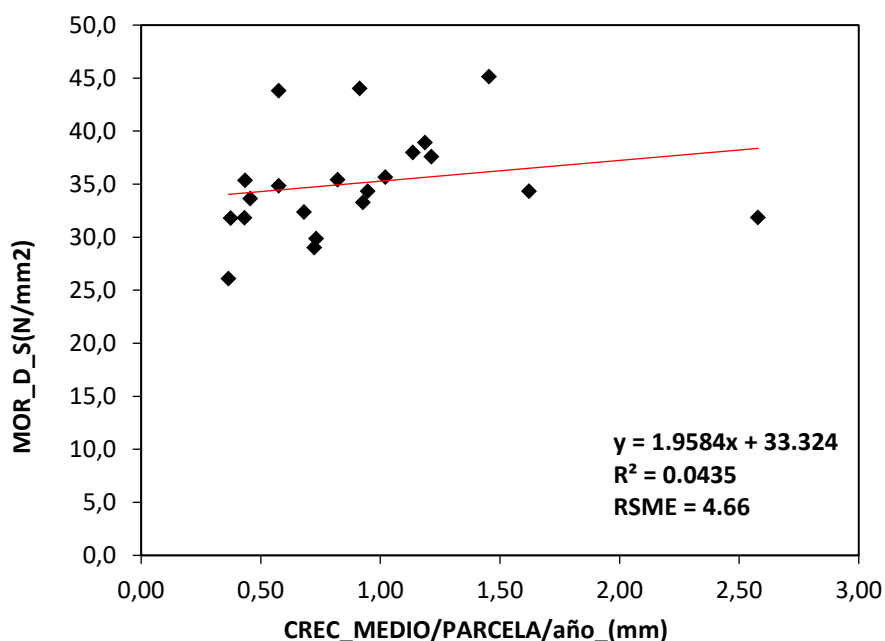
diferencia que la relación con la altura media, la ecuación da un peso superior a la altura máxima en coherencia a las regresiones lineales simples anteriores. Los valores de $R^2 = 0.35$, el valor de $RMSE = 3.84$ suponiendo una mejora significativa.

- MOR directo (seco) vs Crecimiento

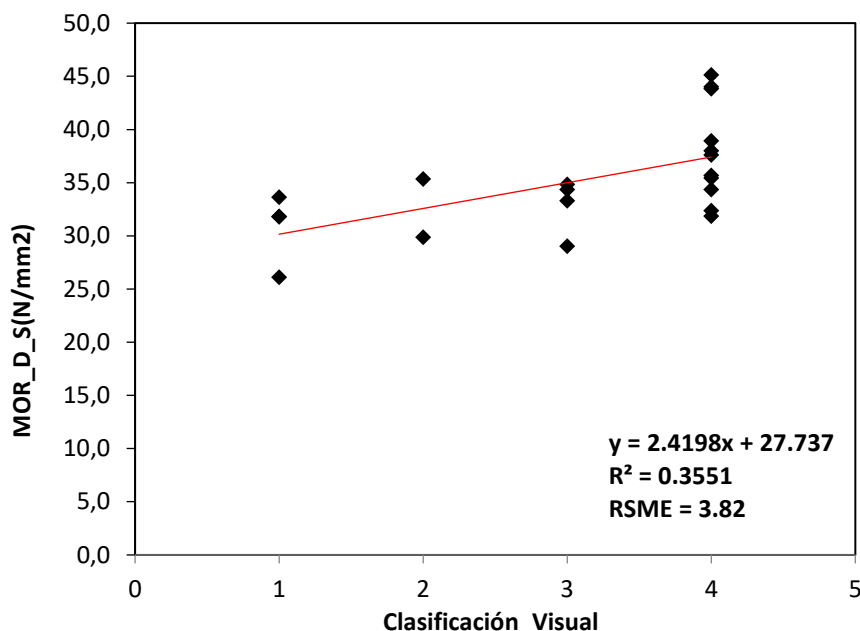
Al igual que con los pies de Aín, la relación de la calidad de madera calculada con el crecimiento medio obtenido para cada una de las parcelas no es especialmente buena, la relación entre estas variables no fiable como podemos observar al analizar los valores de $R^2 = 0.0435$ y $RSME = 4.66$, siendo el primero muy cercano a 0. La ecuación obtenida de esta es $y = 1.9584x + 33.324$.

- MOR directo (seco) vs Clasificación visual

En cambio, la relación entre la calidad de la madera y la clasificación visual ha mejorado respecto al análisis empleando únicamente los pies de Aín, al incorporar las parcelas WOODFOREST y las parcelas de estudio se ha conseguido mejorar los valores de $R^2 = 0.3551$ y $RSME = 3.82$, y está representada mediante la siguiente ecuación: $y = 2.4198x + 27.737$.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Crecimiento)



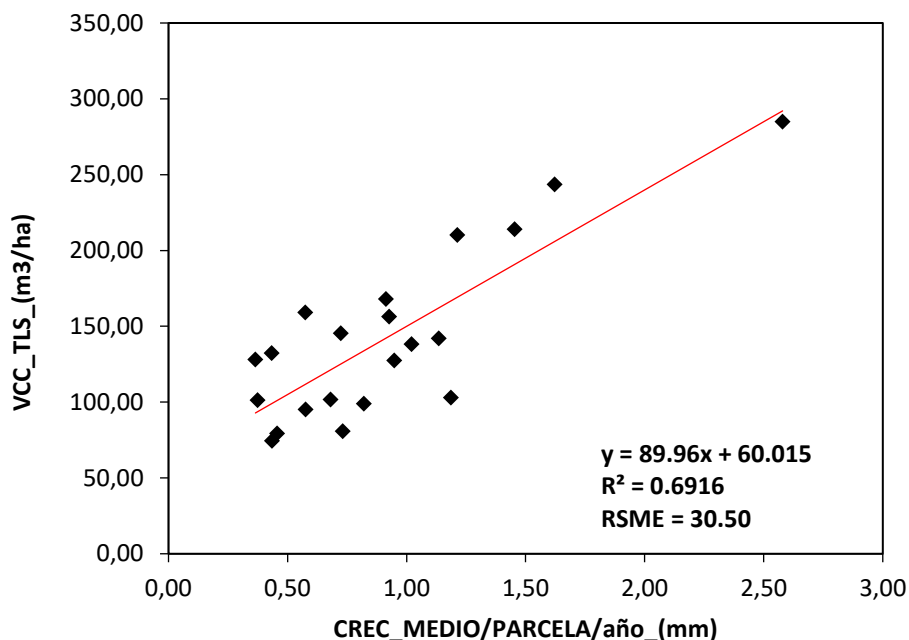
Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (MOR D S – Clasificación visual)

VCC

Además de la calidad de la madera otro variable que nos interesa modelizar es el volumen con corteza, y al igual que en el apartado anterior con la variable indicativa de calidad se realizan las mismas relaciones de variables exceptuando MOR DS, que ya ha sido realizado en el apartado anterior, el diámetro, la altura media y la altura máxima debido a que estas variables son las que se han empleado para el cálculo del volumen con corteza.

- VCC vs Crecimiento

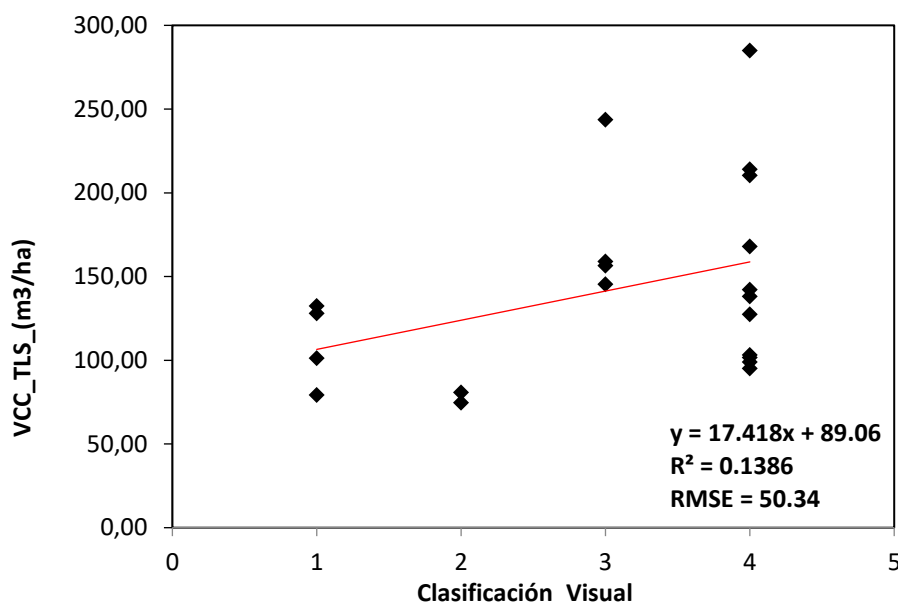
La figura siguiente es la gráfica que representa la regresión lineal entre el crecimiento y el volumen con corteza, la ecuación que representa esta regresión es $y = 89.96x + 60.015$, con un valor de $R^2 = 0.6916$ y valor de $RSME = 30.50$, estos valores indican que existe una relación sustancial entre ambas variables con una tendencia claramente ascendente. Si aplicáramos la ecuación obtenida, a partir de los valores de crecimientos obtenidos a partir de la metodología explicada en el entregable E6.1 podríamos obtener valores de volumen con corteza con un error de 30 metros cúbicos por hectárea.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (VCC – Crecimiento)

- VCC vs Clasificación visual

Por otro lado, la clasificación visual no es un buen indicador de Volumen con corteza, en la figura siguiente se observa como valores altos de volumen con corteza no han podido ser predichos mediante la variable de clasificación visual a diferencia del indicador MOR con el cual si existe algo de relación. La ecuación que representa la recta de tendencia en esta relación es la siguiente, $y = 17.418x + 89.06$ y los valores estadísticos son $R^2 = 0.1386$ y $RMSE = 50.34$.



Valores observados y predichos para un modelo de regresión lineal obtenido y su correspondiente expresión (VCC – Clasificación visual)

3 Modelos y algoritmos.

A diferencia de las relaciones lineales simples, el uso de múltiples variables en los análisis de regresión nos permite generar modelos que nos permiten representar las relaciones más significativas entre nuestras variables objetivo (Calidad y Volumen) mediante una ecuación. Las regresiones lineales simples, realizadas en el apartado anterior, nos permiten hacernos una idea de qué variables tienen una mayor correlación con la calidad y el volumen. A continuación, se incorporan todas las variables recopiladas a lo largo del proyecto en conjuntos de datos, concretamente dos, el primer solo incluye las variables obtenidas a partir de las imágenes satelitales de Sentinel-2, y un segundo conjunto que lo conforman todas las variables de la base de datos: Variables derivadas del TLS, Crecimiento, Clasificación visual, LiDAR PNOA y Sentinel).

Calidad de madera

- MOR directo (seco) vs Sentinel

El conjunto de variables de Sentinel está formado por 26 atributos. A continuación, se relacionan mediante regresión lineal múltiple frente al indicador de calidad de la madera. En una primera instancia mediante un software específico llamado Weka, se realiza una selección de variables más significativas según su correlación con la variable MOR. Estas variables son: **B2 B8A B11 B12 MSI NDVI5**. A partir de esta selección de variables se realiza la regresión múltiple y se obtienen las siguientes ecuaciones:

- 1) $y = 0.0159x_1 + 111.7986x_2 - 17.9756$, donde x_1 es B12 y x_2 es NDVIB5.
 $R^2 = 0.50$ y $RMSE = 3.8$.
- 2) $y = 0.0143x_1 + 114.3429x_2 - 25.4997$, donde x_1 es B11 y x_2 es NDVIB5.
 $R^2 = 0.52$ y $RMSE = 3.66$.

El software de Weka durante la ejecución del proceso de regresión lineal múltiple aplica una búsqueda (GreedyStepwise) de un subconjunto de atributos eligiendo estos dos como los atributos más significativos. De todas las pruebas realizadas con los atributos de Sentinel el B11 o B12 y el NDVIB5 son los que han generados mejores valores de R^2 y RMS. Entre las dos ecuaciones, el uso de la variable B11 en lugar de la variable B12 ofrece un resultado ligeramente mejor a cambio de dar más peso a la variable NDVIB5.

- MOR directo (seco) vs (Bases de datos completa)

El conjunto total de la base de datos está formado por 40 atributos. A continuación, se relacionan mediante regresión lineal múltiple frente al indicador de calidad de la madera. En primer lugar, empleamos Weka para realizar la selección de variables más significativas según su correlación con la variable MOR. Estas variables son: B2, NDVIB5, TCB y la Clasificación Visual. A partir de esta selección de variables se realiza la regresión múltiple y se obtienen las siguientes ecuaciones:

- 1) $y = -0.0488x_1 + 52.9836x_2 + 0.0207x_3 + 2.2361x_4 - 41.4989$, donde x_1 es B2, x_2 es NDVIB5, x_3 es TCB y x_4 es la Clasificación visual.
 $R^2 = 0.73$ y $RMSE = 3.33$.
- 2) $y = 0.0228x_1 + 2.4903x_2 + 6.2064$, donde x_1 es TCB y x_2 es la Clasificación visual.
 $R^2 = 0.61$ y $RMSE = 3.43$.

El software de Weka durante la ejecución del proceso de regresión lineal múltiple aplica una búsqueda (GreedyStepwise) de un subconjunto de atributos eligiendo estos dos como los atributos más significativos. De todas las pruebas realizadas con los todos los atributos el TCB, y la Clasificación Visual son los que han generados mejores valores de R^2 y RMS y son las variables que más peso ejercen en esta configuración de variables.

VCC

- VCC vs Sentinel

El conjunto de variables de Sentinel está formado por 26 atributos. A continuación, se relacionan mediante regresión lineal múltiple frente al indicador de VCC. En una primera instancia mediante un software específico llamado Weka, se realiza una selección de variables más significativas según su correlación con la variable VCC. Estas variables son: **B1 B3 NDVI6 NDVI7 EVI EV2 TCB**. A partir de esta selección de variables se realiza la regresión múltiple y se obtiene la siguiente ecuación:

- 1) $y = 0.5746x_1 - 0.7106x_2 + 367.9745$, donde x_1 es B1 y x_2 es B2.
 $R^2 = 0.67$ y $RMSE = 36.29$
- 2) $y = 0.4896x_1x_1 - 0.5304 + 1520.8066x_3 + 0.2736x_4 - 575.8283$, donde x_1 es B1, x_2 es B3, x_3 es NDVIB7 y x_4 es TCB.
 $R^2 = 0.70$ y $RMSE = 40.433$.

El software de Weka durante la ejecución del proceso de regresión lineal múltiple aplica una búsqueda (GreedyStepwise) de un subconjunto de atributos eligiendo estos dos como los atributos más significativos. De todas las pruebas realizadas con los atributos de Sentinel el B1 y el B3 son los que han generados mejores valores de R^2 y RMS.

- VCC vs (Base de datos completa)

El conjunto total de la base de datos está formado por 40 atributos. A continuación, se relacionan mediante regresión lineal múltiple frente al indicador de Volumen con corteza. En primer lugar, empleamos Weka para realizar la selección de variables más significativas según su correlación con la variable VCC. Estas variables son: B2, B3, B8, SAVI, EVI, NDVIB5, Densidad y el Crecimiento medio por parcela. A partir de esta selección de variables se realiza la regresión múltiple y se obtienen las siguientes ecuaciones:

- 1) $y = -0.2073x_1 + 0.0468x_2 + 68.0255x_3 + 147.2232$, donde x_1 es B3, x_2 es Densidad y x_3 es Crecimiento medio.
 $R^2 = 0.80$ y $RMSE = 32.08$.
- 2) $y = -328.5763x_1 + 0.0536x_2 + 81.5989x_3 - 89.1691$, donde x_1 es NDVIB5, x_2 es Densidad y x_3 es Crecimiento medio.
 $R^2 = 0.81$ y $RMSE = 37.69$.

El software de Weka durante la ejecución del proceso de regresión lineal múltiple aplica una búsqueda (GreedyStepwise) de un subconjunto de atributos eligiendo estos dos como los atributos más significativos. De todas las pruebas realizadas con los todos los atributos la Densidad, y Crecimiento medio son los que han generado mejores valores de R^2 y RMS y son las variables que más peso ejercen en esta configuración de variables, sobre todo el crecimiento medio, como ya indicó la regresión lineal simple realizada anteriormente.

4 Resultados obtenidos

A continuación, en las tablas 1 y 2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de todas las regresiones lineales simples y múltiples calculadas en el apartad anterior. Estos resultados nos permiten detectar y analizar que variables y que modelos resultantes son los más adecuados para la predicción y cálculo de la calidad de la madera y la cantidad de volumen con corteza se puede obtener a partir de mediciones no destructivas, ya sean mediante métodos en campo como mediante el uso de herramientas de teledetección.

Resumen de los resultados estadísticos y relaciones obtenidas de a partir de regresiones lineales simples.

Método	Variables	Ecuación	R2	R2 Adj.	CC	MAE	RMSE
Calidad (MOR)	VCC (m3/ha)	$0.0121x + 33.40$	0.02	0	0.14	3.66	4.72
	Hmedia (m)	$1.043x + 23.02$	0.22	0.19	0.48	3.44	4.19
	Hmax (m)	$1.021x + 21.10$	0.26	0.23	0.51	3.32	4.09
	Diametro (cm)	$0.684x + 19.75$	0.30	0.26	0.54	3.23	4.00
	Crecimiento	$1.958x + 33.32$	0.04	0	0.21	3.55	4.66
	Calidad Vis	$2.419x + 27.74$	0.36	0.32	0.60	3.01	3.83
Volumen (VCC)	Crecimiento	$89.96x + 60.02$	0.69	0.66	0.83	27.11	30.51
	Calidad Vis	$17.42x + 89.06$	0.14	0.09	0.37	40.87	50.99

Resumen de los resultados y modelos obtenidos de la aplicación de métodos de regresión múltiple.

Método	Variables	Ecuación	R2	R2 Adj.	CC	MAE	RMSE
Sentinel-2	MOR (N/mm ²)	1	0.50	0.44	0.61	2.85	3.80
		2	0.52	0.47	0.64	2.73	3.66
	VCC (m3/ha)	1	0.67	0.63	0.75	27.77	36.29
		2	0.70	0.63	0.69	32.12	40.43
Total	MOR (N/mm ²)	1	0.73	0.65	0.73	2.85	3.33
		2	0.61	0.57	0.69	3.00	3.44
	VCC (m3/ha)	1	0.80	0.77	0.81	23.81	32.08
		2	0.81	0.78	0.74	30.91	37.69

5 Acciones de difusión y transferencia

Durante el desarrollo del paquete de trabajo correspondiente a este entregable, se han realizado diversas reuniones con las empresas colaboradoras.

- SIDO MADERA

Ha colaborado en la tarea 7.1. Obtención de variables de interés. La empresa muestra a los técnicos cómo evalúa visualmente la calidad de la madera utilizada en los distintos productos y procesos de la fabricación de las estructuras y productos, mediante la selección de los tipos de dibujo, la medición de las singularidades (nudos, desviaciones de la fibra, bolsas de resina, etc.)

Los técnicos de AIDIMME entregan muestras de Pinos halepensis extraídas del proyecto. Estas muestras son tablas finas de Pinus halepensis extraídas de las trozas de Ain (1^{er} monte de estudio) y las comparan con muestras suyas de Pinus sylvestris, pinaster y picea abies, llegando a la conclusión de que, si la calidad que representan estas tablas en las posibles trozas en el futuro, a ellos les interesaría producir sus productos con ellas.



Figura 1. Reunión con los técnicos de SIDO MADERA.

6 Conclusiones

Para iniciar el estudio de variables en primer lugar, se ha buscado y encontrado una relación entre la variable de calidad de la madera en seco (MOR DS) y la versión en verde (MOR IV). Obtener una buena relación entre el MOR indirecto en verde, obtenido mediante procesos no destructivos, y el indicador MOR en seco, obtenido mediante la medición en viga, es fundamental para aplicar la relación ($y = 0.5213x + 18.078$ | $R^2 = 0.52$ | $RMSE = 3.74 \text{ N/mm}^2$) en las parcelas donde se han aplicado los métodos destructivos.

En la tabla 1 se observa un resumen de todas las relaciones 1 a 1 realizadas tanto para la variable de calidad de la madera como la variable de volumen con corteza, ambas variables son buenos indicadores del estado de las masas forestales. En cuanto a la variable calidad (MOR) los mejores indicadores de una buena calidad son obtenidos mediante el estudio de clasificación visual ($R^2 = 0.36$ | $RMSE = 3.82 \text{ N/mm}^2$) realizado en campo y los datos de diámetro y alturas extraídas de las nubes de puntos del TLS ($R^2 = 0.34$ | $RMSE = 3.87 \text{ N/mm}^2$). En cuanto al volumen con corteza obtenido a través de las nubes de puntos del TLS, el mejor indicador en este caso es el crecimiento medio de los árboles de la parcela ($R^2 = 0.69$ | $RMSE = 30.51 \text{ m}^3/\text{ha}$).

Finalmente se ha realizado un estudio multivariante del conjunto total de datos extraídos durante el proyecto, y se han generado unos modelos adecuados que relacionan, en una primera instancia las variables de Sentinel con la calidad de la madera ($R^2 = 0.52$ | $RMSE = 3.66 \text{ N/mm}^2$) y con el VCC ($R^2 = 0.67$ | $RMSE = 36.29 \text{ m}^3/\text{ha}$) y en segundo lugar con el resto de las variables para la calidad de madera ($R^2 = 0.73$ | $RMSE = 3.33 \text{ N/mm}^2$) y el VCC ($R^2 = 0.80$ | $RMSE = 33.08 \text{ m}^3/\text{ha}$). Comparando los modelos generados a partir de los dos conjuntos (Sentinel y Base de datos completa), los índices de evaluación para los segundos muestran mejorías, es decir, aún los valores de los modelos empleando únicamente las variables de Sentinel son buenos, la incorporación de variables tomadas en campo (métodos no destructivos) mejora estos resultados.

En resumen, la variable de crecimiento muestra una gran influencia en la obtención del volumen con corteza tanto de forma individual como al lado de las variables satelitales en los modelos generados. La clasificación visual por otro lado es la variable principal en la relación con la calidad de la madera, y al igual que el crecimiento con relación al VCC, el estudio visual participa como variable principal en la creación de los modelos de calidad de madera.

7 Anexos y bibliografía

Adame-Campos, R. L., Ghilardi, A., Gao, Y., Paneque-Gálvez, J., & Mas, J. (2019). Variables selection for aboveground biomass estimations using satellite data: A comparison between relative importance approach and Stepwise Akaike's information Criterion. *ISPRS international journal of geo-information*, 8(6), 245. <https://doi.org/10.3390/ijgi8060245>

Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2013). High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 136, 259-276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005>

Efron, B., & Tibshirani, R. (1986). Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. *Statistical Science*, 1(1). <https://doi.org/10.1214/ss/1177013815>

Jiménez, E., Vega, J. A., Fernández-Alonso, J. M., Vega-Nieva, D. J., Ortiz, L., López-Serrano, P. M., & López-Sánchez, C. A. (2017). Estimation of aboveground forest biomass in Galicia (NW Spain) by the combined use of LIDAR, LANDSAT ETM+ and National Forest Inventory data. *Iforest - Biogeosciences and Forestry*, 10(3), 590-596. <https://doi.org/10.3832/ifor1989-010>

Kuhn, M., & Johnson, K. (2018). *Applied Predictive Modeling*. Springer.

McGaughey, R.J. *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*; USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Seattle, WA, USA, 2015.

Mallinis, G., Koutsias, N., Makras, A., & Karteris, M. (2004). Forest parameters estimation in a European Mediterranean landscape using remotely sensed data. *Forest Science*, 50(4), 450-460. <https://doi.org/10.1093/forestscience/50.4.450>

Niu, W., Feng, Z., Feng, B., Min, Y., Cheng, C., & Zhou, J. (2019). Comparison of multiple linear regression, artificial neural network, extreme learning machine, and support vector machine in deriving operation rule of hydropower reservoir. *Water*, 11(1), 88. <https://doi.org/10.3390/w11010088>

Tan, B., Xia, K., Tang, D., & Sheng, Y. (2019). Improved perturb and observation method based on support vector regression. *Energies*, 12(6), 1151. <https://doi.org/10.3390/en12061151>

Vastaranta, M., Wulder, M. A., White, J. C., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Kankare, V., Holopainen, M., Hyyppä, J., & Hyyppä, H. (2013). Airborne Laser Scanning and Digital Stereo Imagery Measures of Forest Structure: Comparative Results and Implications to Forest Mapping and Inventory update. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39(5), 382-395. <https://doi.org/10.5589/m13-046>

MODELOS Y VARIABLES REPRESENTATIVOS DE LA CALIDAD DE MADERA DE PIES DE *P. HALEPENSIS*

AIDIMME

INSTITUTO TECNOLÓGICO

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es

www.aidimme.es