

ANEXO. ENTREGABLE

FV3- INFORME DE VERIFICACIÓN DE LA HERRAMIENTA GIS Y VALIDACIÓN DE LA EFICACIA CON LOS DATOS REALES DE CLASE RESISTENTE TRAS ENSAYO A ROTURA.

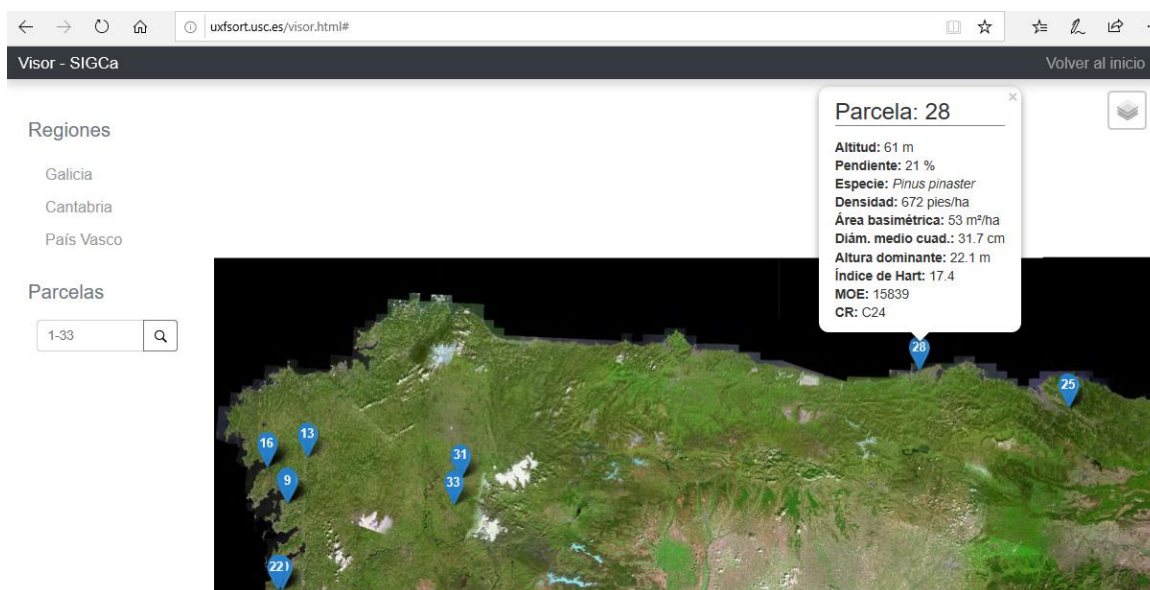
1. Introducción

El objetivo de la herramienta GIS es poder predecir las propiedades tecnológicas de una parcela de *P. pinaster* dada, a partir de la aplicación interna de un algoritmo de predicción del módulo de elasticidad, que habrá sido previamente validado con los datos de módulo de elasticidad real obtenidos tras los ensayos a rotura de la madera extraída de dichas parcelas.

En cuanto a la plataforma GIS se ha desarrollado una versión Beta a la que se puede acceder desde la página web del proyecto con el link <http://uxfsort.usc.es/index.html>



Esta plataforma muestra las predicciones de propiedades mecánicas de la madera de las parcelas muestreadas a partir de la aplicación de los algoritmos de predicción preexistentes, optimizados con la inclusión de nuevos datos. Dicha predicción será validada a partir de los datos obtenidos tras ensayo a rotura de las tablas obtenidas sobre una muestra de árboles en dichas parcelas.



En este informe se resumen los progresos conseguidos en relación a los modelos predictivos de propiedades tecnológicas para *Pinus pinaster* a partir de datos tomados sobre árbol en pie y los primeros resultados de validación. En las siguientes páginas se expone la metodología usada para ajustar los modelos y los resultados obtenidos, mostrando los análisis gráficos pertinentes.

2. Material y métodos

2.1 Datos previos

Se parte de una base de datos de *Pinus pinaster* tomados en proyectos previos en los que se emplearon métodos destructivos para la determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y se guardó la trazabilidad desde monte hasta aserradero. Dicho conjunto de datos se compone de 73 árboles, provenientes de 9 parcelas, de los que se sacaron 223 tablas. Con toda esta información se elaboraron una serie de modelos (Merlo et al. 2014) que ahora fueron mejorados con la incorporación de nuevas variables al análisis estadístico. En la tabla 1 se muestran los valores medios, máximos y mínimos de las principales variables forestales y propiedades tecnológicas usadas en este análisis previo.

Tabla 1. Resumen estadístico de las principales variables forestales y propiedades tecnológicas

Variable	Media	SD	Máximo	Mínimo
<i>VARIABLES DE MASA</i>				
Edad	53,74	7,11	43,40	65,50
N (pies/ha)	438,3	159,29	287,98	726,60
G (m ² /ha)	50,50	9,12	37,37	69,14
Dg (cm)	39,46	5,20	30,43	47,02
Do (cm)	48,59	5,57	39,58	58,79
Hm (m)	21,82	1,95	18,23	23,64
Hc (m)	15,65	2,26	11,08	18,64
Ho (m)	23,13	2,06	19,59	25,43
Razón de Copa	0,29	0,05	0,21	0,39

Árbol individual

d (cm)	40,74	5,83	30,25	58,45
hc (m)	15,83	2,61	10,6	20,60
h (m)	22,62	2,48	17,3	27,50
esbeltez	39,65	8,56	20,11	61,59
razón de copa	0,70	0,08	0,53	0,86

Propiedades tecnológicas

MOE (MPa)	12135,10	3500,88	5198,56	20877,5
ST300 (m/s)	4069,54	381,50	3064,58	4753,59
DB (Kg/m ³)	484,14	40,60	396,35	574,78
MOEdyn (MPa)	15249,93	3250,70	7956,58	21193,05

Dónde: *N*, número de pies por ha; *G*, área basimétrica; *Do*, diámetro dominante; *Dg*, diámetro medio cuadrático; *Hm*, altura media; *Ho*, altura dominante; *d*, diámetro normal; *hc*, altura de copa; *h*, altura total; *MOE*, módulo de elasticidad; *ST300*, velocidad medida con el equipo de ultrasonido "ST300"; *DB*, densidad básica; *MOEdyn*, Módulo dinámico.

2.2 Reajuste de modelos previos

Se desarrollaron dos nuevos modelos lineales, a nivel parcela y árbol individual, relacionando el MOE con los valores de las mediciones tomadas sobre árbol en pie (mediciones con equipos de ultrasonido, extracción de barrenas para densitometría e inventario forestal tradicional) y variables ambientales edáficas, climatológicas y fisiográficas. La selección de las mejores variables independientes se llevó a cabo mediante la metodología de paso a paso ("Stepwise"), combinada con un análisis de correlaciones preliminar de los datos. Sólo se incluyeron en los modelos aquellas variables independientes cuyos coeficientes de regresión arrojasen resultados con una significación superior al 95% (p-valor < 0,05).

Para evaluar la presencia de colinealidad múltiple entre las variables de los modelos se usó el factor de inflación de la varianza (VIF) de todas las variables independientes, el cual se calcula del siguiente modo:

$$VIF = \frac{1}{1 - R_i^2}$$

Dónde: R_i^2 , es el coeficiente de correlación múltiple obtenido cuando la variable independiente *i* es enfrentada en regresión lineal a las restantes variables independientes del modelo. Se aceptaron los valores superiores a 10 (Der and Everitt, 2002).

Estos nuevos modelos, se compararon con los ya existentes por medio de dos índices estadísticos: el coeficiente de determinación ajustado (R_{adj}^2), que refleja la parte de la varianza total explicada por el modelo; y el error medio cuadrático (RMSE) que analiza la precisión de las estimaciones. Dichos estadísticos se calculan del siguiente modo:

$$R^2 = 1 - \frac{(n - 1) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n - p) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}\right)}$$

Donde: y_i , y_i , \hat{y}_i and \bar{y} son los valores observados, predichos y medios de la variable dependiente respectivamente; n , el número total de observaciones y p , el número de parámetros del modelo.

Ya por último, se evaluaron gráficamente los nuevos modelos mediante gráficos de observados frente a predichos para observar visualmente el comportamiento de los modelos.

2.3 Datos SIGA 2019

Con los datos de árbol en pie tomados durante el actual proyecto, se hizo un análisis de correlaciones para el módulo dinámico, calculado a partir de árbol en pie, respecto de las variables de campo inventariadas. Este análisis se llevó a cabo a nivel árbol individual y por parcela.

2.4 Validación con nuevos datos y mejora de los modelos previos

Con los datos de MOE obtenidos por métodos destructivos en el presente proyecto, se llevó a cabo la validación de los modelos previos. Para ello se calculó el valor estimado de cada árbol y parcela (utilizando el modelo correspondiente, ya sea a nivel árbol individual o parcela) muestreado en este proyecto y se enfrentó al valor obtenido con los métodos destructivos. Se calcularon los estadísticos de bondad de ajuste (R^2 y RMSE) y se elaboraron los gráficos de observados contra predichos para evaluar la calidad de las estimaciones.

Posteriormente, se reajustó de nuevo el modelo añadiendo la información de las nuevas parcelas a la base de datos preexistente para así conseguir un modelo mucho más robusto debido al hecho de contar con un tamaño muestral mucho mayor.

3. Resultados

3.1 Modelos de masa

En primer lugar, el análisis de los coeficientes correlación de Pearson muestra relaciones estadísticamente significativas (p -valor $< 0,05$) en diversas variables de masa: diámetro dominante ($r=-0,86$); altura de copa ($r=0,73$); esbeltez ($r=0,78$); razón de copa ($r=-0,79$).

En segundo lugar, respecto a las variables ambientales (edáficas, climáticas y fisiográficas), las correlaciones más destacadas son: a) fisiografía: altitud sobre el nivel del mar ($r=-0,68$); b) edafología: grado de acidez (pH) del suelo ($r=0,81$), contenido de fósforo ($r=-0,72$), contenido de calcio ($r=-0,77$), contenido de cinc ($r=-0,85$) y contenido de plomo ($r=-0,85$); c) clima: temperatura media anual ($r=0,87$), temperatura media de las máximas anuales ($r=0,92$) y temperatura media de las mínimas anuales ($r=0,72$).

En tercer lugar, del análisis de Pearson para las propiedades tecnológicas, se hallaron las siguientes correlaciones significativas: velocidad de propagación de la onda acústica con ST300 Fibre Gen ($r=0,94$); densidad básica ($r=0,77$); módulo dinámico en pie ($r=0,85$).

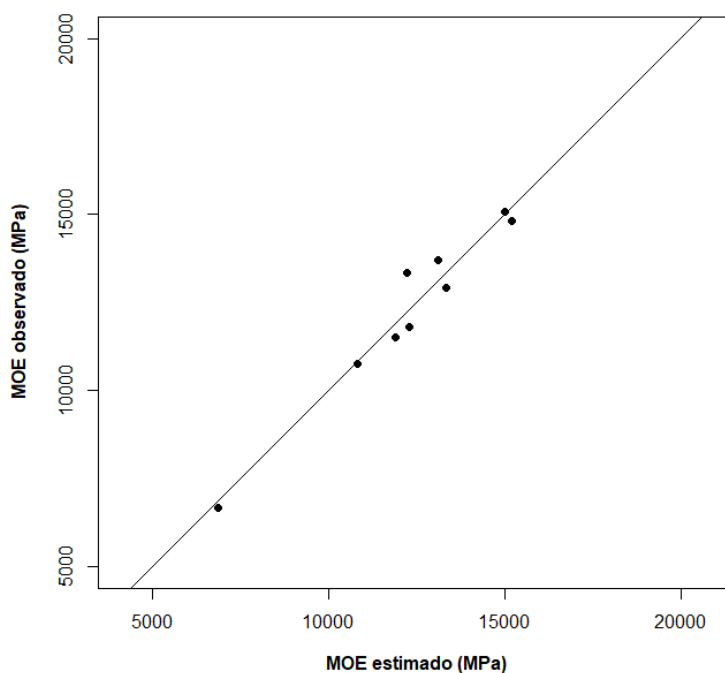
Una vez analizadas las correlaciones, se realizó el ajuste empleando la metodología de paso a paso indicada previamente, resultando un modelo de predicción de MOE por parcela a partir de árbol en pie.

A continuación, se comparan los estadísticos de bondad de ajuste del modelo respecto al anterior. Vemos en la Tabla 2 que el nuevo modelo reduce el error medio y mantiene un elevado coeficiente de determinación, además del hecho de emplear menos variables independientes:

Tabla 2. Comparación de modelos de masa

Modelo	R ²	RMSE (MPa)	Variables	Datos
Modelo 2014	0,98	2088	3	9
Modelo 2019	0,94	572	2	9

Ya por último se comprueba, con el gráfico de observados contra predichos, la calidad predictiva del modelo.



Gráfica 1: Predichos vs Observados (modelo de masa)

3.2 Modelos de árbol individual

En primer lugar, el análisis de los coeficientes correlación de Pearson muestra relaciones estadísticamente significativas (p -valor $< 0,05$) en diversas variables de masa: área basal ($r=0,47$); diámetro medio cuadrático ($r=-0,4$); diámetro dominante ($r=-0,61$); altura de copa ($r=0,61$); altura media ($r=0,5$); altura dominante ($r=0,44$); razón de copa ($r=-0,64$).

En segundo lugar, en lo referente a las variables dasométricas de árbol individual, las mejores correlaciones estadísticamente significativas son: diámetro normal ($r=-0,34$); altura de copa ($r=0,42$); altura total ($r=0,38$); esbeltez ($r=0,5$)

En tercer lugar, respecto a las variables ambientales (edáficas, climáticas y fisiográficas), las correlaciones más destacadas son: a) fisiografía: altitud sobre el nivel del mar ($r=-0,48$); b) edafología: grado de acidez (pH) del suelo ($r=0,63$), contenido de fósforo ($r=-0,55$), contenido de calcio ($r=-0,574$), contenido de magnesio ($-0,52$), contenido de cinc ($r=-0,61$) y contenido de plomo ($r=-0,62$); c) clima: precipitación media de octubre ($r=0,36$), temperatura media anual ($r=0,62$), temperatura media de las máximas anuales ($r=0,67$) y temperatura media de las mínimas anuales ($r=0,47$).

En cuarto lugar, del análisis de Pearson para las propiedades tecnológicas, se hallaron las siguientes relaciones estadísticamente significativas: velocidad de propagación de la onda acústica con ST300 Fibre Gen ($r=0,79$); densidad en el momento de medición en pie ($r=0,29$); densidad básica ($r=0,68$); módulo dinámico en pie ($r=0,75$).

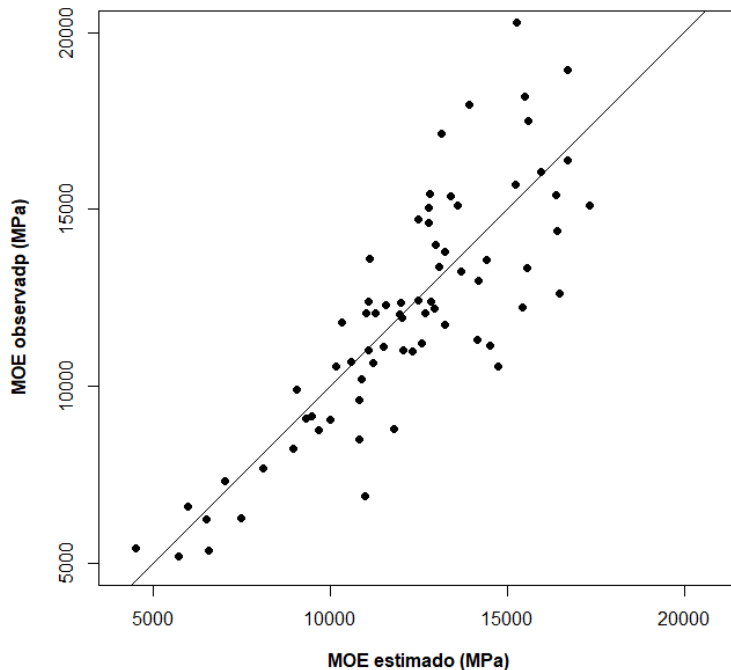
Una vez analizadas las correlaciones, se realizó el ajuste empleando la metodología de paso a paso indicada previamente, resultando un modelo de predicción de MOE por árbol individual a partir de árbol en pie.

A continuación, se comparan los estadísticos de bondad de ajuste del modelo respecto al anterior. Vemos en la Tabla 2 que el nuevo modelo reduce el RMSE considerablemente y presenta un R^2 ligeramente inferior, además de emplear menos variables independientes:

Tabla 3. Comparación de modelos de árbol individual

Modelo	R^2	RMSE (MPa)	Variables	Datos
Modelo 2014	0,73	3051	4	73
Modelo 2019	0,66	2052	3	73

Ya por último se comprueba, con el gráfico de observados contra predichos, la calidad predictiva del modelo.



Gráfica 2: Predichos vs Observados (modelo de árbol individual)

Se debe considerar que los nuevos modelos no consideran variables edáficas, lo cual facilita su uso práctico, pues no siempre es rentable llevar a cabo análisis de suelo por el elevado coste de muestreo que suponen.

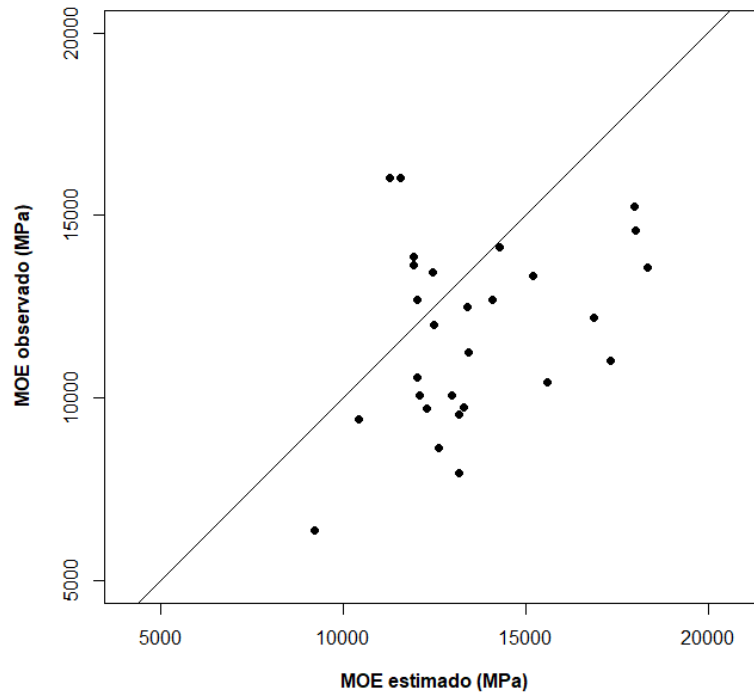
3.3 Datos SIGCA

A nivel parcela se observa que las siguientes variables guardan una correlación alta y estadísticamente significativa con el módulo dinámico sobre árbol en pie: pendiente del terreno ($r=0,41$) y diámetro dominante ($r=0,36$).

A nivel árbol individual se observa que las siguientes variables guardan una correlación alta y estadísticamente significativa con el módulo dinámico sobre árbol en pie: densidad básica ($r=0,42$), pendiente del terreno ($r=0,26$), diámetro dominante ($r=0,22$), altura media y altura dominante ($r=0,22$).

4. Validación y Optimización de modelos previos

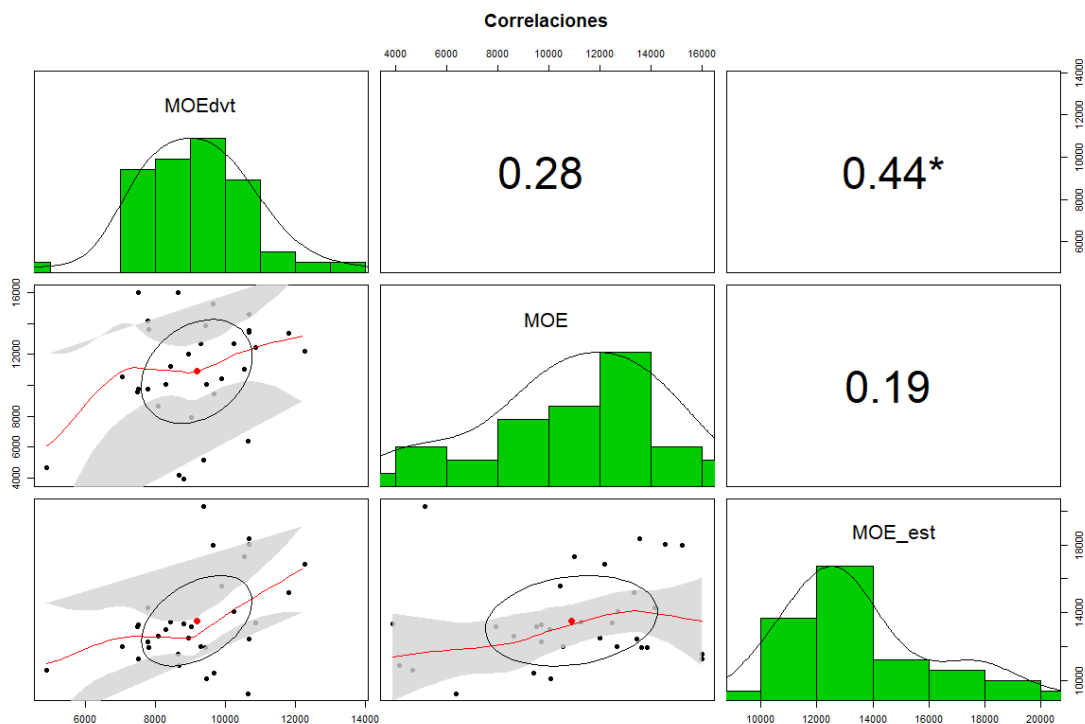
En este momento del proyecto se han podido medir, mediante métodos destructivos, 53 tablas de 32 árboles de los que se ha obtenido un valor promedio de MOE. Así, era de suponer que los datos, al provenir de una tabla por carbol (o dos a lo sumo) no fuesen muy representativos de la realidad por árbol, de tal modo que se han descartado 4 árboles con valores de MOE demasiado bajos que se consideraron outliers. Una vez hecho esto, se aplicó el modelo por árbol y se obtuvo el resultado que se muestra en el gráfico 3:



Gráfica 3: Predichos vs Observados (modelo de árbol individual)

A continuación, teniendo en cuenta que los valores de MOE provenían de muy pocas tablas por árbol, se analizó la calidad de estas estimaciones. Para ello, sabiendo que existen múltiples estudios que han demostrado la existencia de correlación entre los valores de módulo dinámico sobre las tablas con el MOE obtenido una vez llevadas a rotura, se han realizado correlaciones de Pearson enfrentando los valores obtenidos de módulo dinámico, a partir de las tablas de cada árbol, con los valores MOE, obtenido por métodos destructivos, y las estimaciones de nuestro modelo por árbol individual.

Así pues, se confirma que la correlación entre tablas y MOE tras rotura es baja y no significativa, lo que demuestra que el valor de MOE obtenido de una sola troza (dos a lo sumo) no es representativo para árbol individual. Sin embargo, sí existe correlación significativa entre nuestro modelo y el módulo dinámico de las tablas por árbol ($r=0,44$).



Gráfica 4: Correlaciones entre Módulo dinámico de las tbalas (MOEdtv), módulo estático por métodos destructivos (MOE) y módulo estimado por el modelo de Madera+ (MOE_est).

Ya por último, se han agregado estos valores de 26 árboles (pues se han perdido los datos de densidad básica de 2 árboles) para reajustar el modelo de *Pinus pinaster* para árbol individual. En estos resultados ha de tenerse en cuenta que son provisionales, pues no se han llevado a rotura todas las tablas disponibles de los 28 árboles añadidos, por lo que los resultados podrían variar.

Tabla 4. Modelo para *P.pinaster* (árbol individual)

Modelo	R ²	RMSE (MPa)	Variables	Datos
Modelo SIGCA	0,51	2267	4	99