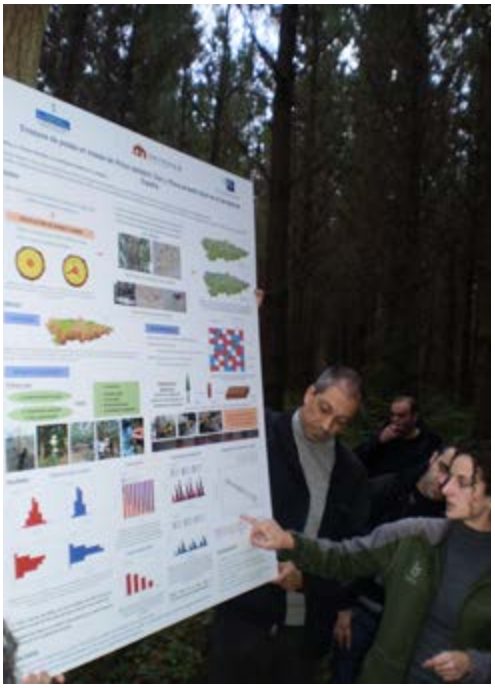
DENDROMETRÍA APLICADA AL PINO MARÍTIMO

SIGCA
Gestión Forestal para
Bosques de Madera de Calidad

hazi
LANDA, ITSASERTZ ETA ELIKAGAIEN SUSTAPENA
DESARROLLO RURAL, LITORAL Y ALIMENTARIO

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO
EKONOMIAREN GARAPEN ETA AZPIEGITURA SAILA
DEPARTAMENTO DE DESARROLLO ECONÓMICO E INFRAESTRUCTURAS



Edición: 1ª, julio 2020

Tirada: 125 ejemplares

© Fundación HAZI Fundazioa

Edita: Fundación Hazi Fundazioa
Granja Modelo s/n
01192 Arkaute (Araba)
www.hazi.eus

Imprime: Roberto Elburgo

DENDROMETRÍA APLICADA AL PINO MARÍTIMO

INDICE

INTRODUCCIÓN A ESTE TRABAJO 5

1.- CUBICACIÓN DE ÁRBOLES. UNA EXPERIENCIA EN EL PAÍS VASCO 13

2.- VARIACIONES DE LA RELACIÓN ALTURA-DIÁMETRO 25

3.- INFLUENCIA DE LA SELVICULTURA EN EL PERFIL Y FORMA DE LOS ÁRBOLES PARA MADERA DE CALIDAD 55

4.- ECUACIONES DE CUBICACIÓN HISTÓRICAS Y ACTUALES 67

5.- RESULTADOS DEL PROYECTO SIGCA-PIMA: CUBICACIÓN 91

6.- RESULTADOS DEL PROYECTO SIGCA-PIMA: VELOCIDAD SÓNICA 145

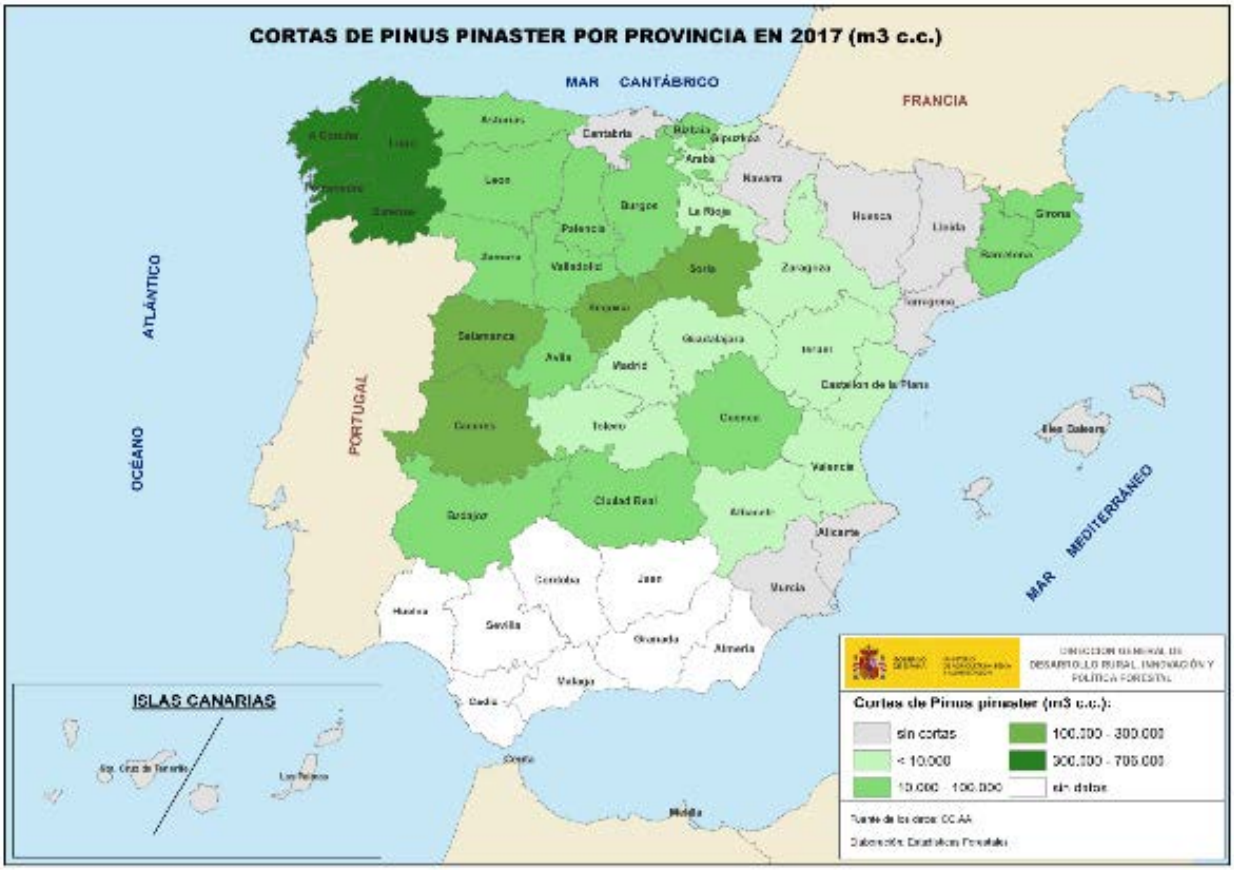
7.- UNAS NOCIONES SOBRE DASOMETRÍA 163

INTRODUCCIÓN A ESTE TRABAJO

Alejandro Cantero Amiano
HAZI Fundazioa

Este trabajo ha sido diseñado y redactado en tiempos de confinamiento (marzo/junio 2020). Se integra en el proyecto de innovación SiGCa-PIMA, promovido por el Grupo Operativo "Sistemas de Gestión forestal en bosques productores de madera de Calidad" (SiGCa), creado en 2017 y dedicado en 2018-2019 a aumentar la competitividad del sector forestal e industrial relacionado con el Pino Marítimo (*Pinus pinaster* Aiton ssp. *atlantica*).

En la redacción de esta obra han intervenido ingenieros de Montes de tres generaciones: Fernando Otazua Mendizábal -ya cercano a su merecida jubilación-, Andrea Hevia Cabal -joven investigadora asturiana-, Esther Merlo Sánchez -emprendedora gallega interesada en las nuevas tecnologías- y servidor. Esta mezcla de procedencias y experiencias ha ido enriqueciendo el texto por aproximaciones sucesivas.



Una buena medición de parámetros forestales y una adecuada cubicación son fundamentales en el caso de pinares que llegan a su edad de corta final. En ellos, el propietario forestal ha ido invirtiendo durante décadas muchos esfuerzos y ha depositado muchas esperanzas, por lo que no puede verse defraudado ni engañado en cuanto al volumen de madera generado en el momento de la venta de su pinar.

El pino marítimo o pináster es una de las especies más productivas del Sur de Europa y, en concreto, del Arco Atlántico. En los años 2017 y 2018, el volumen de cortas de pino marítimo ha sido sobrepasado por el eucalipto y por el pino radiata en España y en el Norte (o Noroeste) peninsular, aunque sigue siendo una especie de primer orden en su valor económico.

Ubicación de los pinares de marítimo según el último mapa forestal (IFN del Norte).

En los últimos años se está registrando un descenso paulatino en el volumen total de cortas de madera de pino marítimo, como puede comprobarse en el cuadro, que compara las cifras del Atlas Forestal del Arco Atlántico Sur del IEFC (http://www.eurosilvasur.org/) con las cifras del Anuario de Estadística Forestal 2017 y con las estimaciones más recientes disponibles.

	Corta anual (m^3) 1999/2000	Corta anual (m^3) 2017/2018
NOUVELLE AQUITAINE	8.201.556	6.000.000
EUSKADI	-	22.214
ASTURIAS	70.616	82.817
GALICIA	2.308.293	2.285.482
NORTE PORTUGAL	1.149.000	871.620
CENTRO PORTUGAL	3.333.000	2.528.380
ARCO ATLÁNTICO	15.062.465	11.790.513

Nouvelle-Aquitaine, Galicia y Portugal partían en el año 2000 de una masa total de pino marítimo cercana al millón de hectáreas en cada uno de esos territorios, aunque ha ido descendiendo en los tres casos. Las existencias totales y las cortas de madera de pino varían sensiblemente en esos tres territorios, dominados por la propiedad forestal privada y el minifundismo.

La región de Nueva Aquitania o Nouvelle-Aquitaine, resultante de la fusión de Aquitania, Limusín y Poitou-Charentes en 2016, es una de las primeras regiones forestales de Europa. Hay que tener en cuenta que en 2000 se estaban empezando a recuperar de los daños de la tormenta de diciembre de 1999 y que, al igual que volvió a suceder en 2009, se produjeron fuertes incrementos en el volumen de madera cortada como consecuencia de estos desastres naturales. El descenso registrado en Portugal, en cambio, hay que asignarlo a otro tipo de desastres, más ligados a los incendios y a los efectos del nematodo del pino. Como curiosidad, en 2000 las cortas totales de pino marítimo doblaban a las de eucalipto en el Arco Atlántico y en los últimos años se ha ido registrando el proceso inverso.

Este proyecto, centrado en la madera de calidad del pino, no puede olvidar el apartado de estimación o medición de esa misma calidad de la madera. Por ello, esta publicación incluye un capítulo centrado en las herramientas disponibles para la medición de la velocidad de trasmisión del sonido a través de la madera y en los resultados conseguidos en campo y en aserradero.

Al integrarse esta obra en un proyecto de innovación colectivo como es SiGCa-PIMA, tampoco se puede obviar la labor coordinada del resto de socios. Así, al final de esta publicación se han incluido diversas presentaciones de los distintos socios de este proyecto explicando sus logros alcanzados en la recta final del proyecto (junio 2020). La *web* del proyecto (https://www.sigcamaderadecalidad.info/) será el repositorio de la información final del presente proyecto.

Breves notas sobre el empleo de Pinus pinaster en el País Vasco

Las masas forestales que se pueden disfrutar en la actualidad son consecuencia de las decisiones que se tomaron en el pasado, años o decenios atrás. Si se conoce la historia o el origen de los pinares actuales, se podrá tomar mejores decisiones futuras sobre su tratamiento, su aprovechamiento o su regeneración. En una especie tan plástica y de tantos posibles orígenes genéticos como el pino marítimo, conocer esa historia es fundamental, aunque no se suelen encontrar muchos datos por escrito.

Mario Michel Rodríguez publicó su Tesis Doctoral en 2003 (*El pino radiata (Pinus radiata D.Don) en la historia forestal de la Comunidad Autónoma del País Vasco: análisis de un proceso de forestalismo intensivo*) y posteriormente la amplió por medio de otra obra semejante en 2013 (*La transformación histórica del paisaje forestal en la CAE*). En ambas obras proporciona diversos datos de interés sobre el empleo y el origen de muchas masas de *Pinus pinaster* en el País Vasco durante los siglos XIX y XX y, sobre todo, enumera las primeras repoblaciones de los servicios forestales de las Diputaciones. En resumen, en orden cronológico:

En 1861, José de Mazarredo, propietario de la ferrería Huacar en Arrazua (Bizkaia), compra en París dos sacos con semilla de pino marítimo y silvestre.

El vitoriano Thomas López de Arroyabe, becado por la Diputación para cursar estudios forestales en la Real Academia de Montes de Tharandt en Sajonia, gestionó en 1867 la adquisición de la semilla de coníferas más apropiada para los montes alaveses, realizando las compras de *Pinus pinaster Ait*. en un establecimiento de Bayona.

El primer inventario disponible sobre el estado de los montes vascos se confecciona en 1878, tras la abolición foral. En 1877, el ministerio de Fomento comisiona a varios ingenieros de montes para clasificar el estado de los montes públicos vascos y calculan una superficie total de 6.588 ha para *Pinus sylvestris L.*, de 100 ha para Pinus pinaster Ait. y de 5 ha para otras coníferas.

Según Isidoro Escagüés de Javierre (1956), Francisco de Elorza utiliza en 1880 el pino marítimo con éxito en Oñati (Gipuzkoa), lo que podría considerarse como una de las primeras introducciones de coníferas en el País Vasco.

En 1887, Severo Aguirre-Miramón elige el pino marítimo como especie principal en el cuartel B del monte Irisasi (Usurbil) por el buen aspecto que presentaba una repoblación cercana.

En ese mismo monte, en la memoria correspondiente a 1907/1908, se informa que además de las plantaciones de roble y pino marítimo programadas en la ordenación, se iban a continuar ensayos con coníferas exóticas, ya que se disponía de planta de *Pinus radiata* D.Don, *Pinus pinaster* Ait. de Córcega, *Cedrus deodara* G. Don fil. y *Cedrus libani*.

Entre las primeras repoblaciones de Mario Adán de Yarza, hay que citar el empleo en 1897 de 77.000 plantas de pino radiata, pino marítimo y alerce en el monte Pinoaga de Bedia.

De los registros existentes en Zubieta, solar de los Adán de Yarza, se obtiene que en la demarcación oriental durante los años 1897-1925 se plantaron 11 millones de coníferas, con una media de 400.000 plantas/año. El número de plantas de pino radiata puro era 4,1 millones, de mezcla de pino radiata y marítimo de Corté 4,4 millones y de pino marítimo de Corté 1,5 millones.

El informe de Antonio Ganuza (1902) para la Diputación comenta el escaso número de repoblaciones en montes comunales de Gipuzkoa e inventaría la presencia de *Abies alba, Picea abies, Larix decidua, Pinus pinea, Pinus sylvestris, Pinus montana* y *Pinus pinaster*.

Un Informe-Memoria de la Diputación de Gipuzkoa sobre las plantaciones que, en plan de ensayo, realizó su Servicio Forestal en parcelas de 100 montes de 28 municipios, resaltaba que Pinus pinaster suponía el 13% de las 625 ha repobladas en el período de 1906-1912, con 545.000 plantas.

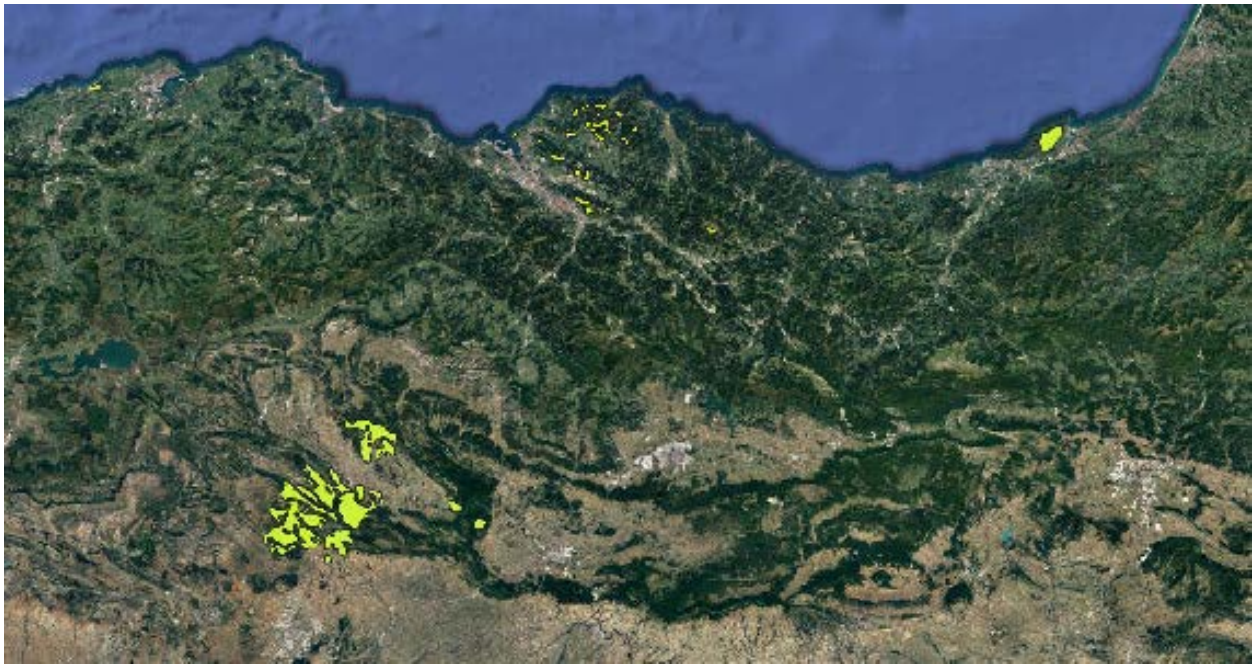
José Mª Adán de Yarza, sobrino de Mario Adán de Yarza, es citado en el libro «Corografía botánica» de Federico Gredilla (1913): «*las especies por el Sr. Adán importadas son: el Pinus insignis Dougl., Cupressus macrocarpa Hartw., Abies Douglasii Lindl., Thuya gigantea Nutt. y el pino de Corté ó sea el Pinus hamiltonii ó Pinus marítima Lamk., considerado hoy como variedad del Pinus pinaster Ait. De todas ellas las que dan mayores y más fructíferos resultados son el Pinus insignis, Pinus marítima y Cupressus macrocarpa; este último en los buenos terrenos, mientras que los otros dos, especialmente el segundo, en todos*».

En 1916, el Ayuntamiento de Durango autoriza al Servicio Forestal a instalar un vivero central para Bizkaia en el monte público La Dolometa, proyecto ejecutado por José Elorrieta entre marzo-mayo de 1916. Las especies inicialmente sembradas fueron *Pinus radiata* D.Don, *Pinus nigra hispánica* Arn. ssp, *Pinus nigra* Arn. *ssp laricio* Maire, *P. pinaster* Ait., *Larix kaempferi* y *Castanea crenata* Siebold & Zucc.

En 1919 se nombra a Julián Echenique nuevo ingeniero jefe del servicio forestal de Alava y en 1920 se reforestan 190.500 plantas en los montes alaveses, siendo *Pinus pinaster* la segunda especie (29%), sólo superada por *Pinus sylvestris* (42%).

En el marco del IV Congreso Sindical Regional Agrario del Cantábrico (Vitoria 1956), Martín Tosantos presentó una ponencia forestal en la que resaltaba que Bizkaia contaba con 50.000 ha de pino radiata (5.000 de ellas en MUP) y 2.000 ha de pino marítimo (todas ellas en montes privados).

El mapa forestal de Luis Ceballos (1966)[1] cifraba en 4.521 ha la extensión del pino marítimo en el País Vasco (3.160 ha en Bizkaia). En 1971, el IFN1 asignaba a esta especie 5.424 ha, solo en Bizkaia. Los sucesivos mapas forestales han ido aumentando lentamente esa superficie de pinar hasta las 6.767 ha del mapa forestal vasco de 2019 (53% en monte público): 827 ha en Álava, 1.620 ha en Gipuzkoa y 4.320 ha en Bizkaia.



Ubicación de las masas de pino marítimo según el mapa forestal de Ceballos.

Igualmente, se ha creído conveniente recoger los testimonios de tres ingenieros de Montes felizmente jubilados y que han ejercido de Jefes de Servicio de Montes en el tránsito entre los siglos XX y XXI, uno por Territorio Histórico: Manuel Ruiz Urrestarazu en Álava, Eduardo Aguirre Pascual en Bizkaia y Jorge Askasibar Zubizarreta en Gipuzkoa. Sus anotaciones, junto con las de María Teresa Pascual, gran conocedora de la mejora genética forestal vasca y actualmente en Basalan, han permitido publicar estas líneas a modo de recordatorio.

Parece estar claro que tanto las procedencias de Córcega (de fuste más recto), como las de las Landas, empleadas desde las primeras repoblaciones de fines del siglo XIX y especialmente en las décadas de 1920 y 1930, dieron lugar no sólo a formaciones boscosas interesantes, con buena regeneración natural en terrenos sueltos, sino también al mismo nombre de este pino marítimo, de influencia francesa.

Sobre el origen aquitano, La Papelera Española solía importar en los años 1973-77 sacos de semilla de *P. pinaster* de Las Landas, que preferentemente se utilizaba en Las Encartaciones, como la gran masa actual de consorcio del monte Grumeran (Galdames). Estos pinares de pináster de consorcio con la Papelera no presentaban una buena forma, de crecimientos medios entre 10-15 m^3/ha/año, troncos defectuosos y poca altura, aunque en algunos casos podrían achacarse esos defectos a la altitud, a la exposición norte o a daños provocados por la nieve o el ganado en los primeros años de la masa.

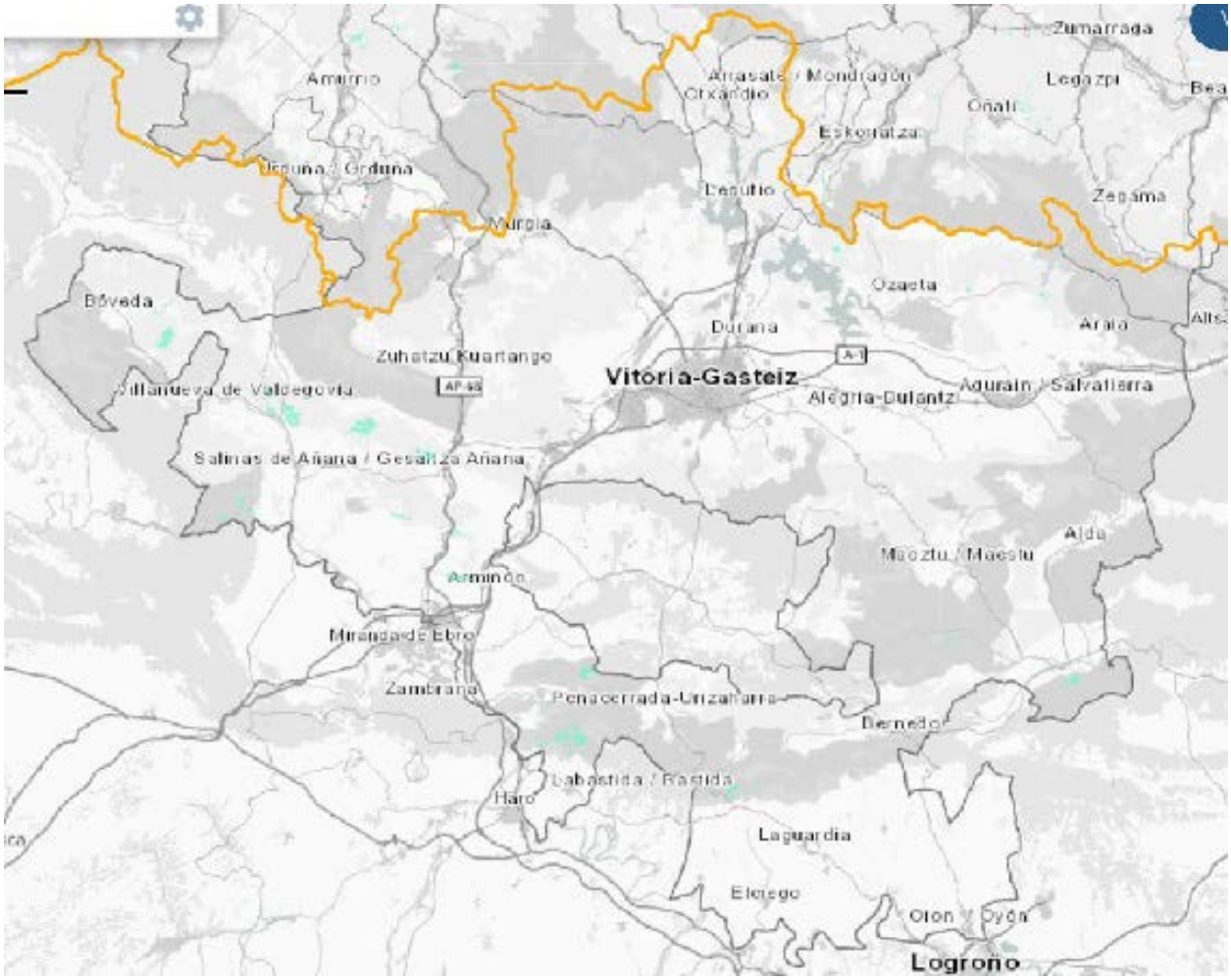
En cambio, otras plantaciones de la Diputación de Bizkaia, que utilizó ampliamente esta especie en montes con suelos arenosos, han destacado por la forma esbelta de los fustes, como las que se pueden encontrar en el

1 Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe400_informacion_disp.aspx

monte Covarón en Muskiz, en el monte Jatamendi en Bakio y en el monte Artxanda en Galdakao, procedían de importaciones de semilla de pino de Córcega.

Otras pequeñas plantaciones particulares en Gernikaldea también presentan fustes rectos y provenían del sequero de Gernika y de semilla importada. Y en esta zona es donde se ha podido apreciar la resistencia de la especie a la enfermedad de las bandas, tanto en árboles adultos con en ejemplares jóvenes de regeneración natural. Conviene recordar que en los últimos años son escasas las superficies plantadas con esta especie, generalmente reemplazada por el eucalipto.

En cuanto a los pinares alaveses y sin olvidar a la autóctona "pina", así llamada, del occidente alavés (desde Sobrón hasta Artziniega), de conformación algo tortuosa, destaca el Pinar de Artza, en Artzinega, plantado entre 1923 y 1935, siendo Ingeniero de la Diputación Julián Echenique Albero, que por su porte parece pino de Corté. Desde los



Ubicación (en verde) de las masas vascas de pino marítimo en las vertientes cantábrica y mediterránea.

años 1974 se emplearon en repoblaciones y siembras *Pinus pinaster* del suroeste de Álava (Valdegobía y Riberas), semillas de poblaciones del Valle del Tiétar (Ávila) y en menor proporción de la variedad *hamiltoni*.

Además de en Valdegobía y Riberas, se empleó también pinaster en el monte público de la Antigua Hermandad de Laguardia, destacando una siembra de semilla de la variedad *hamiltoni* a media ladera tras un incendio hacia 1990, en las cercanías de la ermita de Berberana, al N-NE del pinar viejo de los años 1930. De esa época, años 80-90, proceden también las extensas plantaciones de *Pinus pinaster* de la variedad *hamiltoni* entre los municipios de Salinillas de Buradón y Labastida, en los términos de Montemala y Tabuérniga.

Al norte del embalse de Ullibarri-Ganboa, entre Marieta y Landa, también se reforestó después de la Guerra Civil con *Pinus pinaster*, aunque trayendo semilla de zonas resineras de Castilla y León.

A lo largo de las últimas décadas, el programa de mejora genética francesa de *Pinus pinaster* comenzado en 1962 ha ido mezclando los caracteres más favorables del pino marítimo de Las Landas con los procedentes de rodales antiguos de pino marítimo *hamiltoni* o de Corté, variedad nativa de Córcega (Francia) pero plantada en diversas localizaciones de Francia continental.

Desde los años 1993-1996, los contratistas vascos empezaron a importar planta de pino marítimo procedente de mejora genética para emplear en las reforestaciones, lo mismo que empezó a hacer desde 2005 la Asociación de Forestalistas de Bizkaia. Hay que anotar que en Francia el material genético de *Pinus pinaster* está reconocido por su Ministerio correspondiente como semilla local no autóctona y se puede exportar legalmente dentro de la UE.

La ubicación actual en el País Vasco de estos pinares, naturales o plantados, está unida a las litologías con areniscas. Actualmente, los 10 municipios vascos con mayor superficie de pino marítimo suponen el 45% del total del País Vasco tanto en extensión como en existencias maderables estimadas. Galdakao (308 m^3/ha), Galdames (281 m^3/ha) y Larrabetzu (274 m^3/ha) son los municipios con mayores existencias maderables medias, frente a Valdegovia/Gaubea, con las menores (83 m^3/ha).

Superficie de pino marítimo (ha) por municipio y altitud

Municipio	0-200m	200-400m	400-600m	600-800m	<800m	Total ha
Hondarribia	334	154	16			504
Galdames	1	42	343	41		427
Amorebieta-Etx	118	218	66	2		403
Mungia	142	185	11			338
Galdakao	127	130	11			268
Valdegovia			64	110	51	225
Bakio	69	106	49			223
Larrabetzu	133	71				204
Lezama	86	83	2			170
Pasaia	98	48	8			154
Total CAPV	**2.061**	**2.621**	**1.350**	**563**	**114**	**6.708**

Existencias maderables estimadas (m3) por municipio y altitud

Municipio	0-200m	200-400m	400-600m	600-800m	<800m	Total m^3
Hondarribia	57.453	24.777	3.171			85.401
Galdames	326	12.528	97.122	10.174		120.150
Amorebieta-Etx	27.717	59.652	11.094	171		98.634
Mungia	36.386	45.363	1.944			83.693
Galdakao	39.000	40.254	3.185			82.438
Valdegovia			4.627	7.890	6.048	18.565
Bakio	16.036	28.476	13.310			57.823
Larrabetzu	37.883	18.018				55.901
Lezama	24.395	19.933	325			44.652
Pasaia	18.247	7.265	963			26.475
Total CAPV	**484.618**	**600.789**	**298.791**	**88.171**	**12.642**	**1.485.012**

Los proyectos europeos *Espacio Atlántico REINFFORCE* (2007-2013) y *POCTEFA Acclimafor* (2019-2022) han permitido a HAZI instalar plantaciones experimentales en montes públicos del País Vasco, destinadas a ir comparando en el futuro el crecimiento de diversas procedencias de *Pinus pinaster* (mejora genética francesa VF2 y VF3 y otras variedades comerciales) frente a plantas procedentes de semilla *indígena* (no autóctona) seleccionada por Basalan en diversos rodales sobresalientes de Bizkaia.

Esta selección basada en sus dimensiones, su rectitud del fuste y su escasez de ramas se realizó en 2019 y supuso la toma de semilla de un rodal sobresaliente que se cortó en Lazpide (Amorebieta-Etxano) y de dos pinos elegidos como plus en el MUP 170 *Burutoetzagana* (Galdakao). Ambos pinos, A y B, presentan un diámetro normal en torno a 70 cm y una altura total de unos 32 m y los rodales en los que se ubican fueron plantados respectivamente en 1960 y 1970.

Ubicación y aspecto de los pinos plus B y A en Galdakao.

Breves notas sobre la mejora genética francesa de *Pinus pinaster*

Las siguientes cronologías y anotaciones proceden de la *web* francesa https://www.planfor.fr/sylviculture,amelioration-genetique-du-pin-maritime.html.

1926: Instalación del primer arboreto de procedencias de pino marítimo de diferentes áreas naturales de Francia.

1960-1969 / 1972-1974: Campaña de selección para el cultivo y ajuste de árboles plus, que resultó en la plantación de 246 hectáreas de huertos semilleros de primera generación. La cantidad limitada y el alto costo de las semillas genéticamente mejoradas han cambiado el método de reforestación al reemplazar gradualmente la siembra por la plantación. La semilla se sembrará en el vivero para producir plantas genéticamente mejoradas. De hecho, 1 hectárea de siembra consume 3 kg de semillas o 45.000 semillas. En el vivero, 45.000 semillas sembradas dan origen a 40.000 plantas, por lo que unas 30 hectáreas serán reforestadas plantando en lugar de 1 hectárea por siembra directa.

1978-2000: Uso gradual en la reforestación mediante la siembra de semillas de huertos de primera generación (VF1). La variedad Landas x Córcega es el resultado de la polinización controlada de dos variedades de pino: origen Landas y origen Córcega.

1986-1995: Instalación de huertos semilleros de segunda generación en 200 hectáreas.

1998: Comienzo del empleo gradual de semillas de huertos de segunda generación.

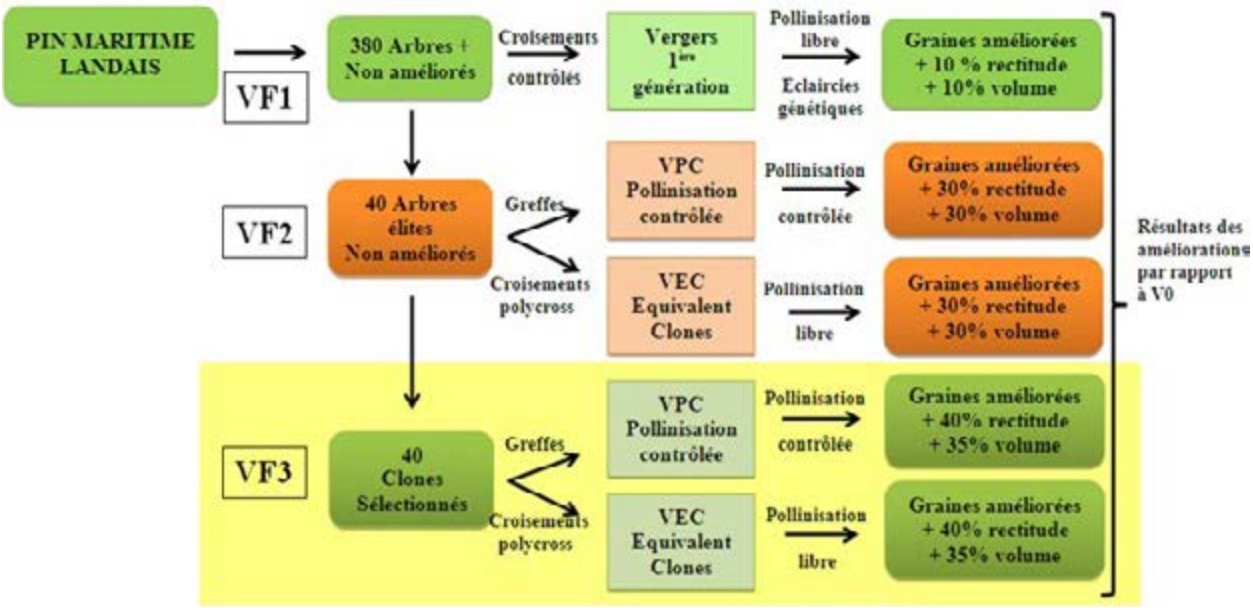
2003-2006: Instalación de huertos semilleros de tercera generación (VF3)

2006: Instalación por PLANFOR de un huerto de semillas de 3ª generación de 17,60 hectáreas en la ciudad de Carcans (33). La ruta de implantación elegida por PLANFOR permitirá una cosecha temprana de piñas en 2012-2013.

2012: Primera cosecha en huertos VF3.

2013: Comienzo del empleo gradual de semillas de huertos de tercera generación.

2025: Comienzo del empleo previsto de semillas de huertos de cuarta generación.



1.- CUBICACIÓN DE ÁRBOLES. UNA EXPERIENCIA EN EL PAÍS VASCO

Fernando Otazua Mendizabal
GEBE (Gipuzkoako Baso Elkartea)

Trato en estas líneas de exponer mi experiencia en el establecimiento y particularidades de un sistema de cubicación de la madera en pie en el País Vasco. Me centraré en Gipuzkoa toda vez que conozco de primera mano el desarrollo de esta labor en la Asociación de Propietarios Forestales de Gipuzkoa (GEBE) donde he desarrollado toda mi labor profesional.

1.- Primeros pasos 1986

GEBE nació a raíz de las inundaciones de 1983 desarrollando una labor encaminada a gestionar las ayudas para el restablecimiento de las infraestructuras dañadas. Tras un pequeño parón, se dotó a la Asociación de una estructura técnica para dar servicio a una masa social de 60 socios y con la idea de crecer en socios y servicios.

En aquellos tiempos, la venta de la madera era algo caótica. A la sensación general de los propietarios forestales de que la madera del monte no se podía vender a resultas (en función de la madera pesada en industria) por la desconfianza del propietario cimentada por malas experiencias (camiones de madera no contabilizados, malas pesadas, malas clasificaciones de la madera) se unía la necesidad de proceder a una cubicación imparcial que en la mayor parte de los casos era difícil conseguir.

En general, los cubicadores eran pocos y utilizaban en las mediciones la intuición derivada de la experiencia. La altura del árbol, por lo general, era al punto en que el árbol alcanzaba los 20 cm, habida cuenta de que la clasificación de la madera era para sierra (diámetro normal > 20 cm) o papelera (< 20 cm). Esta altura, como decía, por lo general era obtenida a ojo y la circunferencia a la mitad de la altura se obtenía a partir de la circunferencia a 1,3 m a la que se sumaba 60 cm y se dividía entre dos. Los más experimentados tasadores sumaban más de 60 o menos de 60 en función de las características del arbolado y consecuencia de la experiencia acumulada. También había tasadores que derribaban el árbol medio y medían la altura maderable del árbol y la circunferencia en el centro. En Gipuzkoa, esta segunda modalidad era bastante extendida y tenían una particularidad en relación con los otros Territorios (Araba y Bizkaia) y es que, si medían la circunferencia en el centro de la altura del árbol con corteza o eliminada ésta, se obtenían metros cúbicos a la cuarta con corteza o metros cúbicos a la cuarta sin corteza. Si tenemos en cuenta que el fundamento de la medida a la cuarta es asimilar la circunferencia en el centro al perímetro de un cuadrado inscrito (que no se corresponde con la realidad) de tal modo que el volumen obtenido se aproximara a la madera que se obtendría en el aserrado, esta distinción entre metro cúbico a la cuarta con corteza o sin corteza no tiene ningún sentido ya que en el volumen obtenido serían eliminados los costeros, por lo que el metro cúbico sería siempre sin corteza. Ahora bien, este tipo de mediciones están tan arraigadas que hoy en día se siguen usando por los compradores de madera bien sean rematantes o industriales.

Como decía, la inexistencia de tasadores controlados llevaba a situaciones ridículas como el hecho de que el comprador de madera exigiera para cerrar el trato la medición de tal o cual tasador o lo que podía ser más sangrante, que el comprador de la madera tuviera su tasador oficial.

En aquellos tiempos, la Administración Forestal, que recae en las Diputaciones Forales, exigía, para la tala del arbolado, la notificación, que no permiso. El guarda forestal tramitaba la notificación y estimaba el volumen de madera que se iba a cortar. Luego llegarían los fuegos de 1989 que llevaron a la prohibición de corta de madera verde instaurándose la necesidad del permiso de corta que se mantiene a día de hoy.

Con este panorama, GEBE creó un servicio de tasación dirigido a los socios. Se estableció una metodología y el uso de aparatos para la toma de alturas. Se utiliza la forcípula con medición de dos diámetros en cruz en lugar de la medición de la circunferencia con cinta métrica. Se toma el diámetro a todos los árboles de la parcela. En cuanto a la altura a medir a los árboles, se obtiene la altura a la punta con lo que se elimina la arbitrariedad de estimar dónde alcanza el árbol un determinado diámetro. Se mide un mínimo del 10% de los árboles de cada clase diamétrica. El aparato utilizado en esos tiempos era el hipsómetro que normalmente dispone de dos escalas a 15 y 20 m. La distancia se medía con cinta autorrecogible de 25 m. La medición de la distancia conllevaba gran dificultad como consecuencia de la vegetación. Por otro lado, en los inicios se obtenía la altura directamente posicionándose el medidor a la distancia de 15 o 20 m en horizontal. Habida cuenta de la orografía del terreno con fuertes pendientes, la corrección de la pendiente y la restricción de la distancia hacía que esta labor resultara realmente penosa ya que después de realizar los cálculos de la distancia paralela al terreno a la que había que colocarse para realizar la medición, sucedía que no se veía la punta al árbol. La necesidad agudiza la cabeza y de esta situación pasamos a coger una altura a una distancia cualquiera que luego corregíamos en gabinete. Se apuntaba la distancia a la que nos posicionábamos y se hacia una primera lectura a los ojos de la persona que se encontraba en la base del árbol (de altura similar al que realizaba la medición o de lo contrario al punto en el que se situaran los ojos del que realiza la medición) con la escala de los 20 m. Esta primera lectura nos da la pendiente del terreno ya que cada unidad de la escala de los 20 m viene a ser un 5% de pendiente. Seguidamente se hacia la lectura a la punta del árbol. La suma de las dos lecturas nos da la altura de un árbol situado a la distancia que nos habíamos situado pero medido con una escala que da la altura de un árbol situado a 20 m. Con esos datos podíamos obtener la altura real en oficina habiendo mejorado y mucho el trabajo de campo. Se multiplicaba la primera lectura por 0,05 y calculábamos su arc tangente. Obtenido el ángulo del terreno se obtenía su coseno y se multiplicaba por la distancia medida sobre el terreno. Teníamos ya la distancia horizontal por lo que ya solo quedaba dividir por la distancia de la escala con la que habíamos obtenido la altura, en nuestro caso 20, y el resultado lo multiplicábamos por la altura obtenida en campo y finalmente se le suma la altura a los ojos de la persona que realiza la medición.

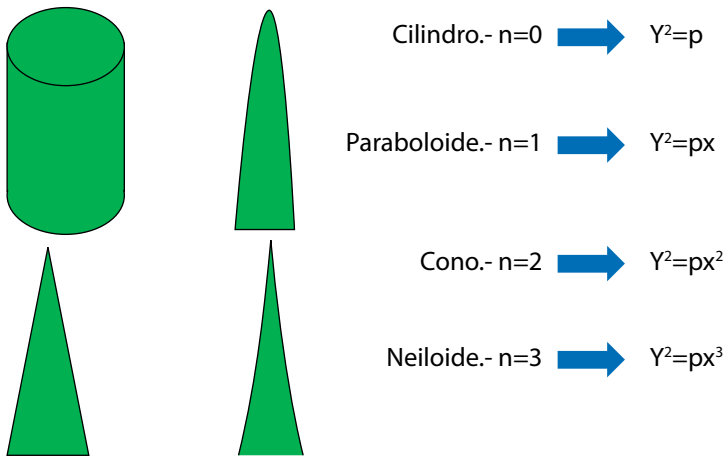
La cubicación se realizaba utilizando tablas de cubicación obtenidas a partir de la tala y medición en el suelo de una potente muestra de árboles y aplicando un modelo estadístico de mínimos cuadrados.

Los datos aportados por las mediciones así realizadas convencieron a los propietarios y se peleó para que las mediciones fueran asumidas y conocidas por los compradores. En un inicio, para cada venta de un lote se realizaba la medición del comprador y la medición que nosotros realizábamos para el propietario. No fueron pocas las discusiones entre los resultados obtenidos por unos y por otros, pero desde GEBE siempre se ofrecía la posibilidad de realizar comprobaciones en el monte para defender cada parte su medición. Que yo recuerde, en cinco ocasiones se fue al monte a realizar comprobaciones y en todas ellas pudimos reafirmarnos en las mediciones que apuntábamos. Propietarios que realizaron tasaciones con equipos tradicionales y con la Asociación y las cuales diferían en los volúmenes y que finalmente vendieron con el volumen obtenido por GEBE fueron la mejor propaganda. En poco tiempo, pasamos de una masa social inicial de 60 socios a los más de 1.000 socios empujados principalmente por este nuevo servicio que hemos mantenido hasta el día de hoy en el que agrupamos a más de 2.600 socios y más del 60% de la superficie forestal privada de Gipuzkoa.

2.- Tipos dendrométricos

Un hecho habitual entre los tasadores tradicionales era la no diferenciación de especies para la determinación del volumen de madera. Es decir, se utilizaba el mismo método para cubicar un Pino laricio que un Pino insignis. Consecuentemente se hablaba de densidades de madera para el Pino laricio que resultaban cuando menos llamativas. Lógicamente, si obtenemos la circunferencia en el centro de la troza maderable igual que para el Pino insignis (circunferencia a 1,3 m más 60 entre dos) estaremos dando una circunferencia mucho menor que la que corresponde a una madera de Pino laricio.

No se tenía en cuenta los tipos dendrométricos. Todas las formas responden a una fórmula del tipo $Y^2=px^n$. Dando valores a n obtendríamos los distintos tipos:



Una sección cualquiera a la distancia x de la punta del árbol tendrá una superficie:

$$S=\pi y^2=\pi p x^n$$

La sección de la base que corresponde a una altura h del árbol tendrá por expresión:

$$S_0=\pi p h^n$$

La sección que corresponde a la mitad de la longitud del tronco del árbol, valdría:

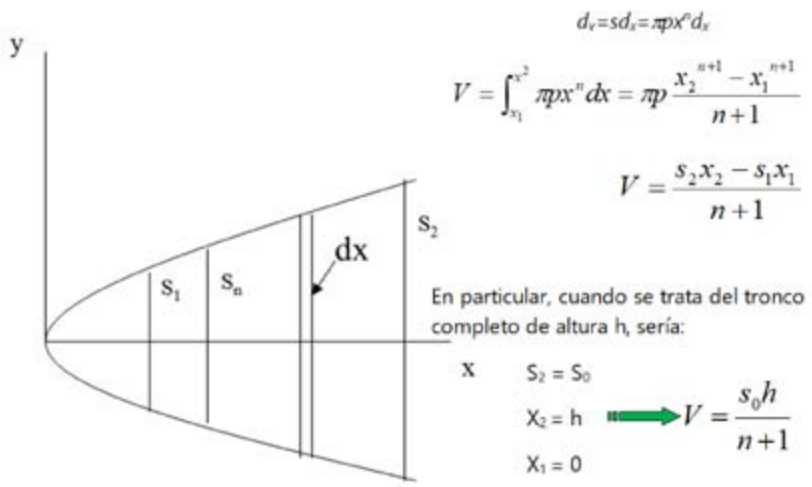
$$S_m=\pi p(h/2)^n=(1/2)^n S_0$$

Dando valores a n, tendremos para secciones y diámetros:

Cilindro	$S_m=S_0$	$d_m=d_0$
Paraboloide	$S_m=1/2S_0$	$d_m=0{,}71d_0$
Cono	$S_m=1/4S_0$	$d_m=0{,}50\ d_0$
Neiloide	$S_m=1/8S_0$	$d_m=0{,}35\ d_0$

Es decir, dependiendo del tipo dendrométrico de que se trate, la relación que viene siendo utilizada para la obtención del diámetro en la mitad para las diferentes especies será más o menos exacta en función del tipo dendrométrico de que se trate. Por lo general, los árboles adoptan diferentes tipos en el mismo tronco.

El volumen de un tronco en función del tipo dendrométrico de que se trate será:



Aplicando la fórmula obtenida a los diferentes tipos dendrométricos:

Cilindro.- $V = S_0 h$

Paraboloide.- $V = \frac{S_0 h}{2}$

Cono.- $V = \frac{S_0 h}{3}$

Neiloide.- $V = \frac{S_0 h}{4}$

Todos estos tipos dendrométricos tienen una expresión común para la obtención del volumen en función de la altura a la cual el diámetro se hace la mitad del diámetro normal. Se le conoce como fórmula de Pressler:

$$V = \tfrac{2}{3}\, S_0 h_1$$

Parámetros dendrométricos del árbol

Diámetro normal.- Diámetro a 1,3 m. del suelo

Altura total.- Altura a la punta del árbol

Altura de fuste.- Altura utilizable para madera. Normalmente 7 cm

Espesor de corteza

Flecha: Distancia del eje de la troza en relación con la vertical

Parámetros dendrométricos de una masa forestal

Diámetro medio cuadrático medio.- Es la media cuadrática de los árboles de la masa

$$d_m = \sqrt{\sum \frac{d_1^2 n_1}{n}}$$

Altura media.- Altura correspondiente al árbol de diámetro cuadrático medio

Altura dominante.- Altura de los 100 árboles más gruesos por ha.

Area basimétrica.- Es la suma de las áreas de las secciones de los árboles a 1,3 m. de altura del suelo y referida a una superficie de terreno. Normalmente el área basimétrica viene dada en metros cuadrados por hectárea.

$$A_b = \sum \frac{\pi}{4} d_1^2 n_1 = \frac{\pi}{4} \sum d_1^2 n_1$$

3.- Cubicación de un árbol apeado y un árbol en pie

Árbol apeado

Tradicionalmente, el árbol apeado se ha cubicado obteniendo la sección en el centro de la troza maderable (diámetro >20 cm) y multiplicada por la longitud total de la troza. Como veremos, esta forma de cubicar da un volumen por defecto. Esta disminución del volumen real es mayor cuando la longitud de la troza es mayor.

Hay dos fórmulas tradicionales que se aplican a la cubicación de las trozas:

Fórmula de Huber $V = s_m l = \frac{\pi}{4} d_m^2 l$

Fórmula de Smalian $V = \frac{s_1 + s_2}{2} l = \frac{\pi l}{8}(d_1^2 + d_2^2)$

Las fórmulas de Huber y Smalian son exactas para las trozas cilíndricas y paraboloides. En el caso de trozas cónicas y neiloídicas se producen errores por defecto con Huber y por exceso con Smalian. En el caso de trozas cónicas;

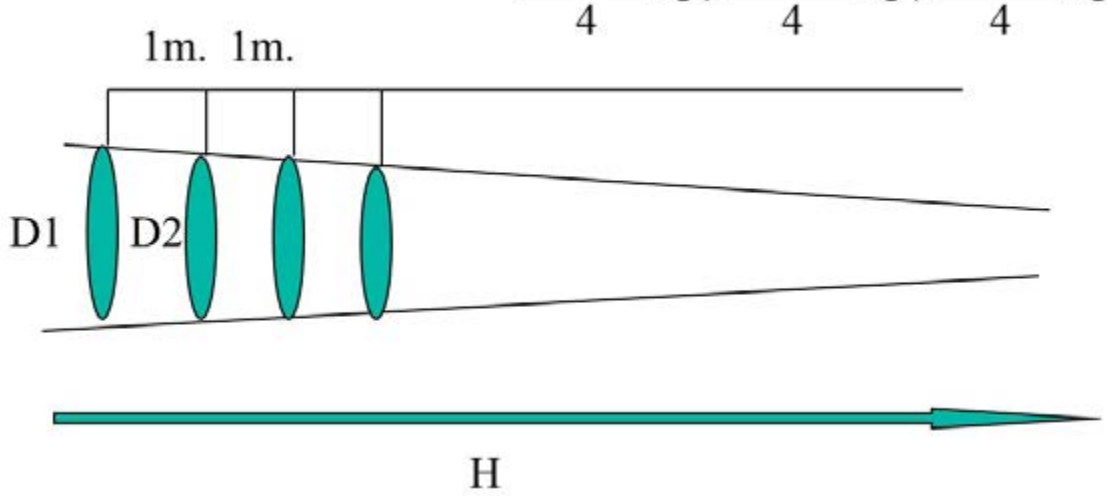
El error por defecto aplicando Huber es de $E_H = \frac{\pi p l^3}{12}$

El error por exceso aplicando Smalian es de $E_S = \frac{\pi p l^3}{6}$

En trozas cónicas, el error por exceso aplicando Smalian podría llegar a ser el doble que el error por defecto aplicando Huber y dichos errores aumentan exponencialmente con la longitud de la troza.

Desde GEBE, cuando se ha derribado un árbol para su cubicación como consecuencia de que no existían tablas de cubicación obtenidas en el País Vasco, se ha utilizado la fórmula de Huber en trozas de un metro.

$$\frac{\pi * D_1^2}{4} * 1 + \frac{\pi * D_2^2}{4} * 1 + \frac{\pi * D_3^2}{4} * 1 + \cdots\cdots$$



Árbol en pie

Dos medidas son fundamentales: el diámetro normal y la altura total.

La medición del diámetro no es problema, pero sí la altura máxima cuando se quiere obtener hasta un determinado diámetro.

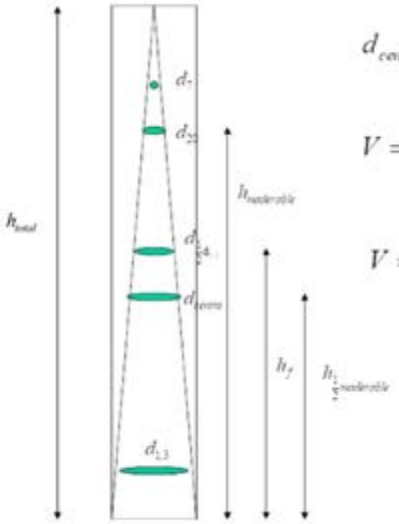
El hipsómetro proporciona la altura allí donde apuntemos

El relascopio permite obtener la altura hasta un diámetro prefijado.

La cubicación la obtenemos mediante la fórmula de Pressler ó el uso de coeficientes mórficos específicos para la especie (Se define como el cociente entre el volumen del árbol y el de un cilindro de diámetro y altura igual a los del árbol) ó ecuaciones de cubicación.

En la toma de alturas de los árboles hay que tener precaución y detectar si un árbol se inclina hacia la persona que mide o su inclinación hace que se aleje del mismo, habida cuenta de que en el primer caso obtendremos una altura por exceso y en el segundo caso por defecto. Las diferencias pueden ser sustanciales. Si necesitamos medir

la altura de un árbol con exactitud, lo más conveniente es medirlo desde dos direcciones opuestas y obtener la media de las dos mediciones.

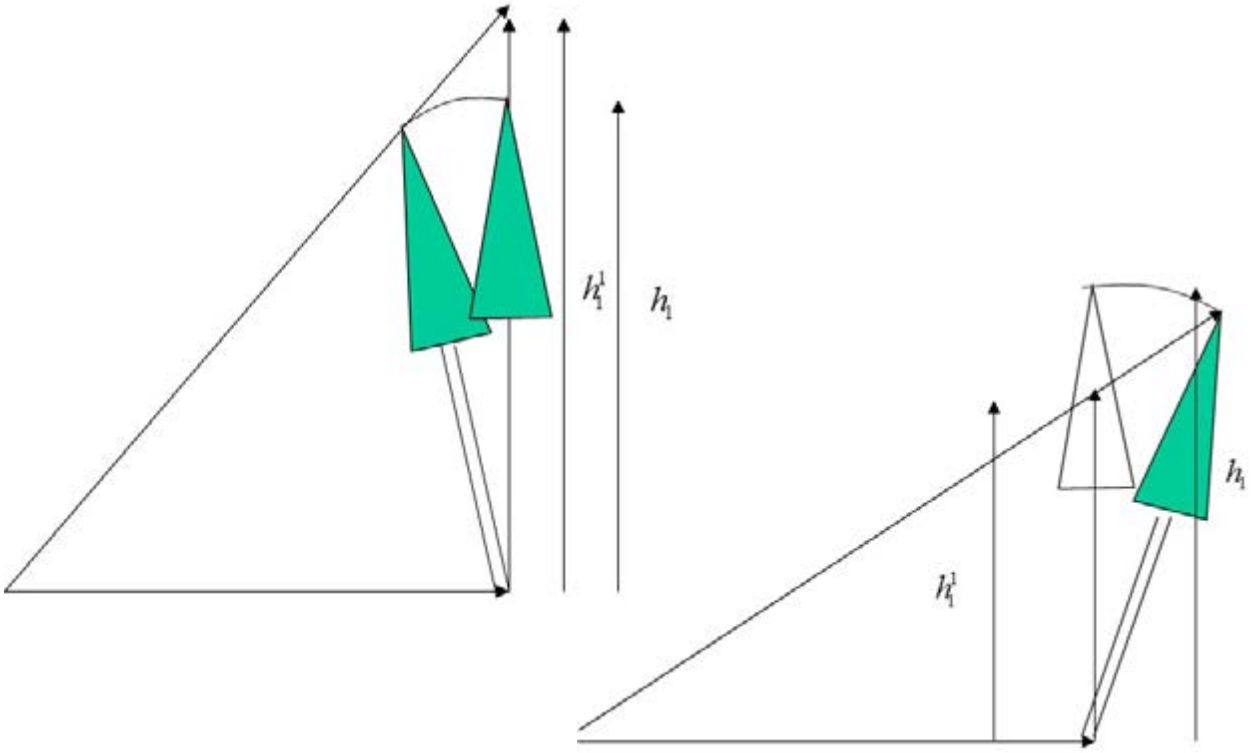


$$d_{centro} = \frac{d_{1.3} + d_{20}}{2} \qquad V = \frac{\pi d^2_{centro} h_{moderable}}{4}$$

$$V = \frac{\pi d^2_{1.3} h_{total}}{4} coef\ mórfico$$

$$V = \frac{2}{3}\left(\frac{\pi d^2_{1.3} h_f}{4}\right)$$

Los aparatos de medición han evolucionado y siguen evolucionando. Se ha eliminado la cinta métrica que, como decía, en las condiciones habituales de nuestros montes es un elemento que genera mucha incomodidad. Los hipsómetros modernos tipo Vertex o Nikon son elementos que se van haciendo imprescindibles para la realización de las cubicaciones de montes dirigidas a la venta de la madera en pie.



4.- Establecimiento de un Registro Oficial de tasadores

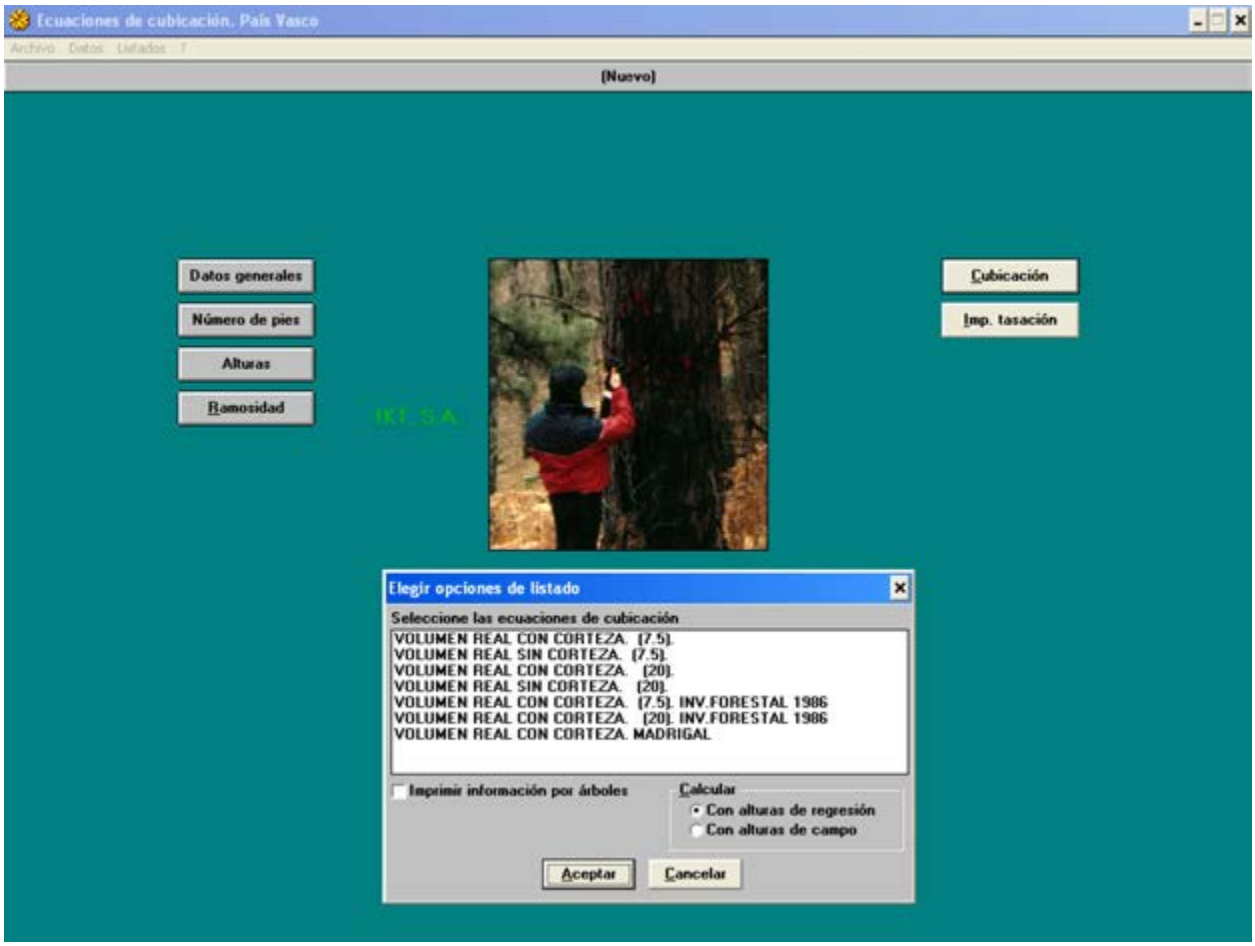
Un hito importante en el tema de la estandarización de las mediciones de la madera fue el acuerdo adoptado en la Mesa Intersectorial de la madera de implementar un Registro Oficial de Tasadores. Se inició su gestación a finales de 1994 y finalizó en 1995. En Gipuzkoa se concretó con la publicación del Decreto Foral 1/1996 de 9 de Enero sobre cubicación de aprovechamientos forestales siendo similares los Decretos publicados en Araba y

Bizkaia. El acuerdo fue justificado por la necesidad de mantener vivo el Inventario Forestal y afianzar los volúmenes de los aprovechamientos. Por parte de los representantes de la Propiedad Forestal, suponía la responsabilidad en las mediciones de la madera que se ponía a la venta.

En los Decretos publicados no se exigía dar el volumen de madera, habida cuenta de las diferentes formas de cubicar imperantes, pero si se firmaba por el tasador oficial el número de árboles por diámetro, así como la media de las alturas a punta por clase diamétrica. Esta información es suficiente para obtener el volumen de madera a partir de unas tablas de cubicación.

Los Decretos publicados incluían el establecimiento de una Comisión de Control que debía comprobar, aleatoriamente, la veracidad de la información apuntada en los Impresos de Tasación. En dicha Comisión intervenían una representación de los diferentes subsectores que integraban la Mesa Intersectorial, así como la Administración competente en la gestión del Registro de Tasadores, en este caso las Direcciones de Montes de las respectivas Diputaciones Forales. El buen funcionamiento, desde el inicio de publicación del Decreto en Gipuzkoa, hizo que se consolidara el Impreso de Tasación en el cumplimiento de sus funciones.

Al mismo tiempo y en paralelo, la empresa pública IKT desarrolló un programa informático dirigido a los tasadores oficiales que, además de elaborar el Impreso Oficial de Tasación, ofrecía la posibilidad de cubicar el monte con las fórmulas de cubicación existentes para las diferentes especies. Así mismo, establecía una serie de parámetros que, obtenidos de forma visual y/o automática a partir de los datos introducidos, pudiera definir la calidad de los árboles medidos.



Las incorporaciones al Registro se solicitan a la Dirección de Montes de cada una de las Diputaciones. Dicha incorporación es automática para los solicitantes que acreditan estudios y/o conocimientos teóricos y/o prácticos. Dichos conocimientos podrán ser sustituidos por la realización de una prueba de aptitud o un curso de formación que a día de hoy se viene realizando con carácter periódico.

Posteriormente, la USSE[1] presentó un proyecto Europeo dentro del Programa RECITE 2 denominado EUROSILVASUR en el que participaban diversas regiones de Francia, España y Portugal. Fue definitivamente aprobado por la Comisión en Junio de 1999 con una duración de tres años. Entre las Acciones a desarrollar presentadas,

1 USSE = Unión de Selvicultores del Sur de Europa, https://www.usse-eu.org

la Acción 2, iba encaminada a la unificación de criterios de cubicación, homologación de medidas y creación de un Observatorio y un Atlas forestal.

En el País Vasco dicho proyecto sirvió para unificar criterios en la cubicación y en el establecimiento consensuado de los parámetros que definen la calidad de la madera en pie. En concreto se realizaron reuniones en el monte en el que se visitaron plantaciones y se derribaron árboles en Llodio (05-05-2001) en Iurreta (10-05-2001) y en Oñati (07-06-2001) participando las Asociaciones de Propietarios Forestales, Rematantes, Industrias, IKT y tasadores acreditados. Tras estas reuniones se celebró un Seminario en Derio el 30 de Enero de 2002 en el que se repasaron los datos obtenidos y se extrajeron una serie de conclusiones, de entre las que destaca la necesaria ampliación de la muestra de árboles para mejorar las tablas de cubicación, la posibilidad de introducir un nuevo parámetro como es el diámetro a la altura de 4 m o la creación de diferentes tablas de cubicación en función de las calidades de estación. Se definieron los parámetros que pueden dar una idea de la calidad de la madera a partir de una serie de datos fáciles de obtener en la propia medición realizada por el tasador y que se concretan en:

El diámetro medio cuadrático de la masa

La relación altura dominante-edad

El nº de verticilos entre 1,3 m y 6 m

El diámetro máximo de rama dentro de los cuatro primeros metros.

En el caso del Pino insignis, la combinación de estos parámetros debía agruparse de tal modo que se obtuvieran cuatro calidades para la madera en pie.

Con posterioridad, IKT (1989-2012) y luego HAZI han ido ampliando la muestra de árboles para la mejora de las tablas de cubicación de Pino insignis y la obtención de tablas de cubicación para el resto de especies. La aplicación de nuevas tecnologías no destructivas, como el láser terrestre, ha facilitado la realización de esta labor. Así mismo, quedaba pendiente el cálculo de los volúmenes esperados para los diferentes destinos de la madera.

5.- Cálculo de volúmenes maderables para diferentes especies del País Vasco

Una herramienta importante para el sector, en el tema de las cubicaciones y mediciones, ha sido el establecimiento de funciones a partir de las cuales nos permiten estimar la altura del fuste a la cual se encuentra un determinado diámetro y funciones de razón que nos permiten estimar el porcentaje del volumen total que se encuentra por encima de un diámetro determinado. Luis Mario Chauchard y Alejandro Cantero son los autores de estos trabajos.

En los inicios, la madera se clasificaba como madera de sierra (diámetro mayor de 20) o de papelera el resto. En la actualidad, el árbol maduro contiene madera que en el mejor de los casos acabará en tres industrias diferentes. Para que el comprador de esa madera pueda ofertar un precio por la madera en pie y dado que los precios de la madera entregada en esos tres destinos difieren de forma importante, tiene que saber del volumen total existente y en función también de los largos de la madera que solicitan los diferentes destinos, el porcentaje que va a ir a cada uno de ellos. Estas fórmulas le permiten hacer estas estimaciones.

Para finalizar, transcribo el ejemplo de aplicación que se adjunta a la publicación de estas funciones para el Pino insignis:

$R = 1 - 0{,}323372\ (df^{3{,}36274} / dn^{3{,}05443})$ *Razón de volúmenes (1)*

$hr = (0{,}997014 - 0{,}0644698\ dr^{2{,}25})^{31{,}55}$ *Función altura maderable (2)*

$df = dn\ ((hr^{1/31{,}55} - 0{,}997014)/-0{,}0644698)^{1/2{,}25}$ *(3)*

Imaginemos un Pino insignis que presenta las siguientes medidas

dn = 40 cm

ht = 26 m

df pretendido = 20 cm

Los largos de trozas comercializables se consideran: 2,10 m; 2,55 m; 4,10 m y 4,55 metros.

Paso 1: Cálculo de la altura maderable a la que se encuentra la punta delgada pretendida (20 cm) *(función 2)*

TABLA DE ALTURAS MADERABLES							
df:	**20**	**cm**					
	Altura Total [m]						
dn	20	22	24	26	28	30	32
35	10,1	11,2	12,2	13,2	14,2	15,2	16,2
36	10,5	11,6	12,6	13,7	14,7	15,8	16,8
37	10,9	12,0	13,0	14,1	15,2	16,3	17,4
38	11,2	12,3	13,4	14,6	15,7	16,8	17,9
39	11,5	12,7	13,8	15,0	16,1	17,3	18,4
40	11,8	13,0	14,2	15,4	16,5	17,7	18,9
41	12,1	13,3	14,5	15,7	16,9	18,1	19,4
42	12,4	13,6	14,8	16,1	17,3	18,5	19,8
43	12,6	13,9	15,1	16,4	17,7	18,9	20,2
44	12,9	14,1	15,4	16,7	18,0	19,3	20,6
45	13,1	14,4	15,7	17,0	18,3	19,6	20,9

Paso 2: Cálculo del largo útil del fuste disponible hasta el diámetro a punta delgada de 20 cm (15,4 m).

Dos rollos de 4,55 m de largo + 1 rollo de 4,10 m + 1 rollo de 2,10 m, alcanzan 15,30 m, quedando una diferencia de 0,10 m para otro destino.

Paso 3: Cálculo del diámetro a punta delgada o final de un fuste de 15,3 m *(función 3)*

df = 20,1 cm.

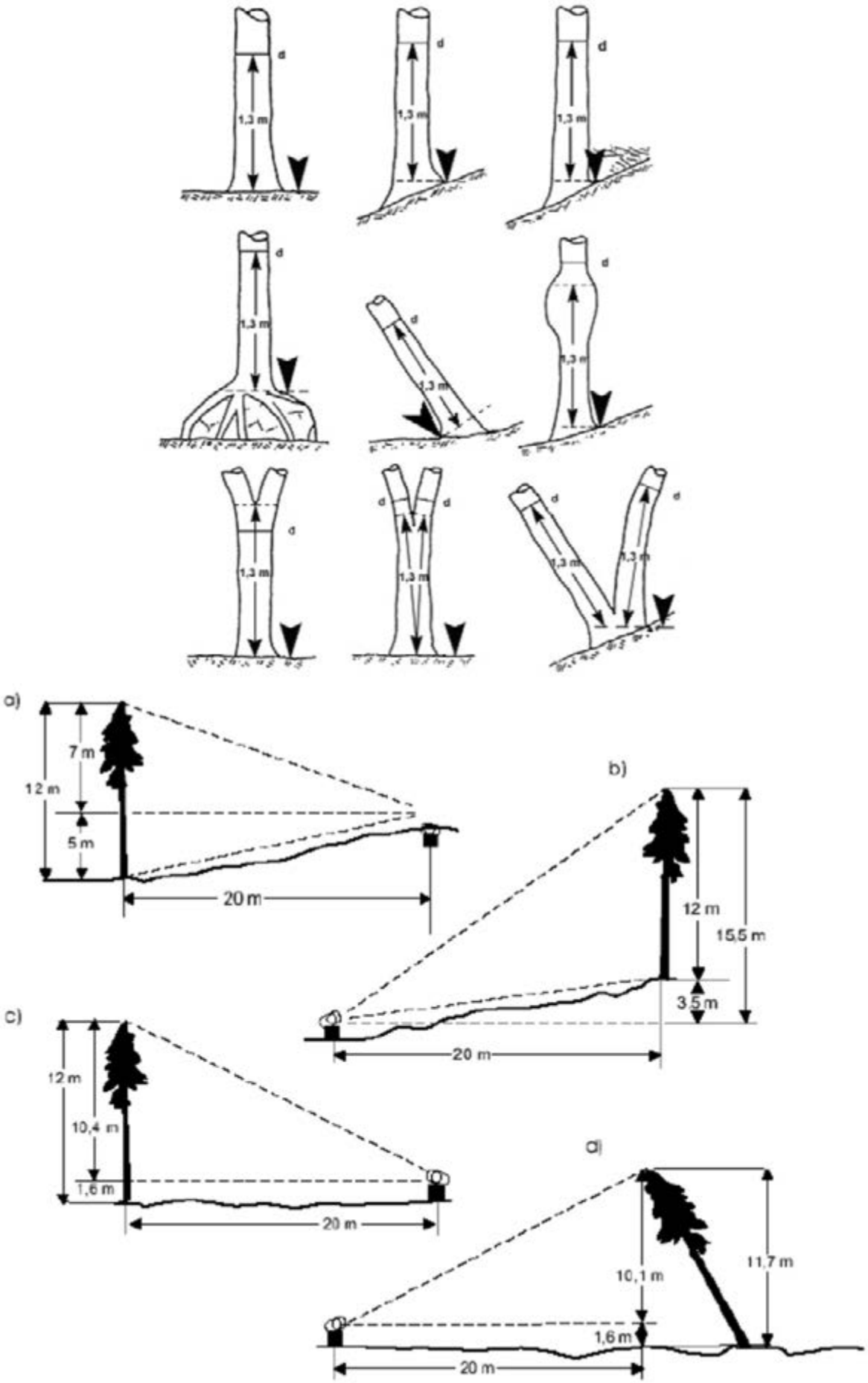
Paso 4: Cálculo del volumen total, con corteza:

Volumen Total [dm3 c/c] = exp(-3,01274 + 1,86004 * Ln(dn) + 1,01378 * Ln(ht)) (4)

Nota: extraída del informe "Ecuaciones de cubicación para pino radiata en el País Vasco" HAZI, Vitoria. Tamaño de la muestra: 808 árboles, R2aj: 99,4 %.

Paso 5: Cálculo del volumen maderable ahora a punta delgada de 20,1 cm, con corteza *(función 1 y 4).*

Volumen Maderable = 1,151 m³ c/c



Normas de medición del perímetro/diámetro y de la altura total, entresacadas respectivamente de http://unigis.sbg.ac.at/files/Mastertheses/Full/1499.pdf y de http://www.reddccadgiz.org/documentos/doc_66453255.pdf

hazi

2.- VARIACIONES DE LA RELACIÓN ALTURA-DIÁMETRO

Alejandro Cantero Amiano
HAZI Fundazioa

Los arbolados forestales son dinámicos, cambian a lo largo del tiempo. Los árboles siempre crecen en cuanto a grosor de sus fustes (diámetro o perímetro) y a las dimensiones de su copa (altura), ya que suene crecer compitiendo con los vecinos y en busca de la luz. Factores como la espesura o densidad a la que vegeta un arbolado y su ritmo específico de crecimiento según la calidad o estación condicionan ese ritmo de crecimiento en altura.

La curva de diámetro-altura o curva de alturas de un arbolado es una función que trata de cuantificar la relación existente entre los diámetros normales y las alturas totales de los árboles que forman ese arbolado, del tipo h=f(d). El diámetro normal, a 1,3 m o "a la altura del pecho" (d ó D, normalmente en cm), también es llamado DAP o DBH. Esa curva no es constante en el tiempo para ese arbolado, ya que puede variar según perturbaciones naturales (como derribos) o la selvicultura realizada (densidad inicial de plantación, mezcla de especies, podas, claras, abonados). Dentro de la misma especie, existen otros parámetros que hacen variar esa curva, como los efectos de la mejora genética, la edad, la calidad de la estación o la exposición a agentes causantes de daños, bióticos o abióticos-climatológicos.

Es importante ajustar bien esa ecuación h=f(d), porque en muchas tasaciones se emplean ecuaciones de cubicación del tipo V=f(d,h). Como en muchos inventarios se miden los diámetros normales de todos los pies, pero sólo una muestra de alturas, contar con una buena ecuación h=f(d) puede ser clave para realizar una cubicación ajustada.

En una masa homogénea de la misma especie, coetánea o regular, con una curva de alturas típica, se suele ajustar una ecuación polinómica, exponencial o logarítmica, de forma que a los pies de mayor diámetro les corresponden mayores alturas. A la derecha de la curva, con los mayores diámetros, se suele tender a una asíntota plana o de baja pendiente.

Como muestran Pardé y Bouchon (Dendrométrie 2º ed., 1988) y Mercedes Bertomeu (Manual de Dasometría, 2011), a medida que una masa regular envejece, su curva de alturas se desplaza hacia la derecha (mayores diámetros en el eje x) y hacia arriba (mayores alturas en el eje y), de forma que los árboles medidos en inventarios sucesivos presentan, para el mismo diámetro normal, alturas cada vez mayores.

El análisis de la curva altura-diámetro se relaciona con varios aspectos de la gestión forestal:

- En la dasometría y cubicación de arbolados, ya que no resulta aconsejable emplear siempre las mismas ecuaciones para estimar la altura media de un arbolado o para cubicar ese arbolado. En este capítulo se va a tratar de analizar esa variación temporal y espacial.
- En la estabilidad de los arbolados. Un parámetro clásico para estimar el riesgo de derribo según la edad y la selvicultura seguida en una masa forestal es el índice de esbeltez (h/d*100, relación altura/diámetro). Valores altos, por encima de 80-100 dependiendo de la especie, suelen estar relacionados con un alto riesgo de derribos.

- En la calidad de la madera, ya que los árboles más esbeltos, los más altos y a la vez de menores diámetros normales, desarrollan entrenudos más largos, mayor porcentaje de madera libre de nudos y mayores módulos de elasticidad en sus trozas basales. La genética, la especie, la calidad de la estación, la edad y la selvicultura influyen en estos parámetros.

Ante la falta de parcelas permanentes de experimentación de pino marítimo en el País Vasco, se van a emplear los datos de otras coníferas semejantes: pino radiata, pino laricio de Córcega y abeto Douglas. En las siguientes páginas se van a emplear datos procedentes de distintos proyectos europeos en los que han participado IKT y HAZI a lo largo de los últimos años: Espacio Atlántico REINFFORCE 2007-2013, LIFE HEALTHY FOREST 2016-2019, SUDOE PLURIFOR 2016-2019 y POCTEFA Canopée 2016-2019. Estos proyectos han permitido remedir diversas parcelas permanentes de distintas coníferas instaladas desde 1990.

El Inventario Forestal Nacional (IFN) también permite disponer de un gran número de árboles y parcelas remedidos desde hace décadas.

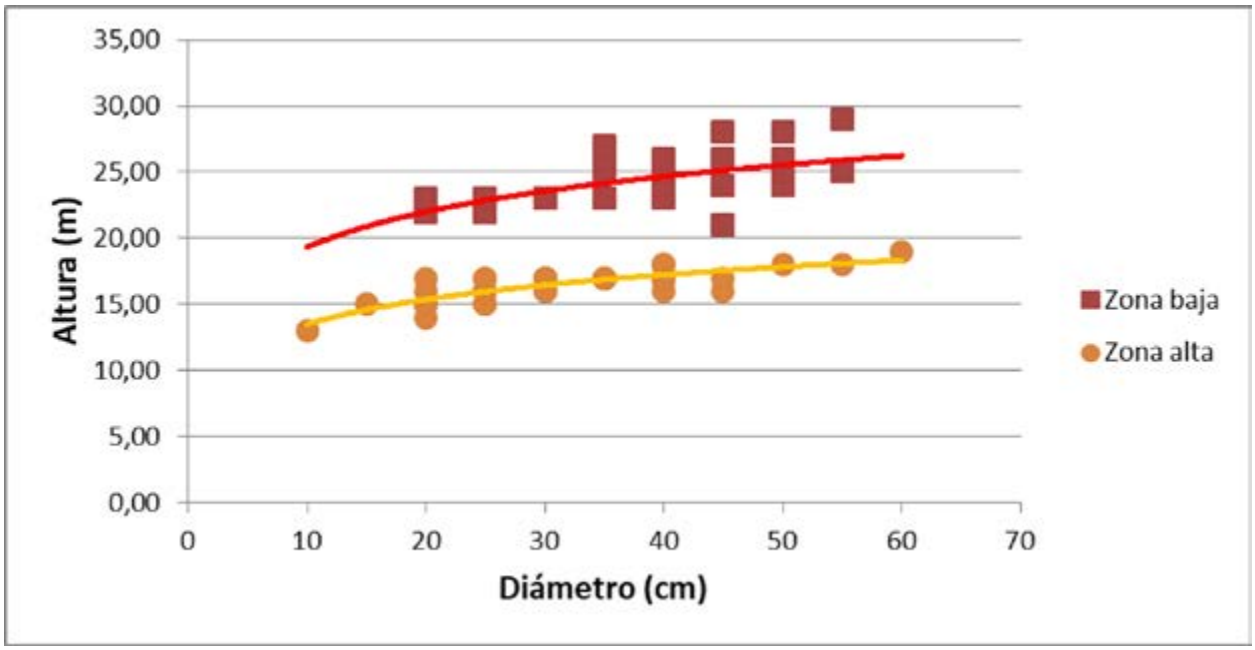
Remedición de una parcela de abeto Douglas del proyecto REINFFORCE en Ataun.

Remedición de una parcela IFNN (IFN del Norte) de pino marítimo en Durango.

1.- Variación a nivel local/monte

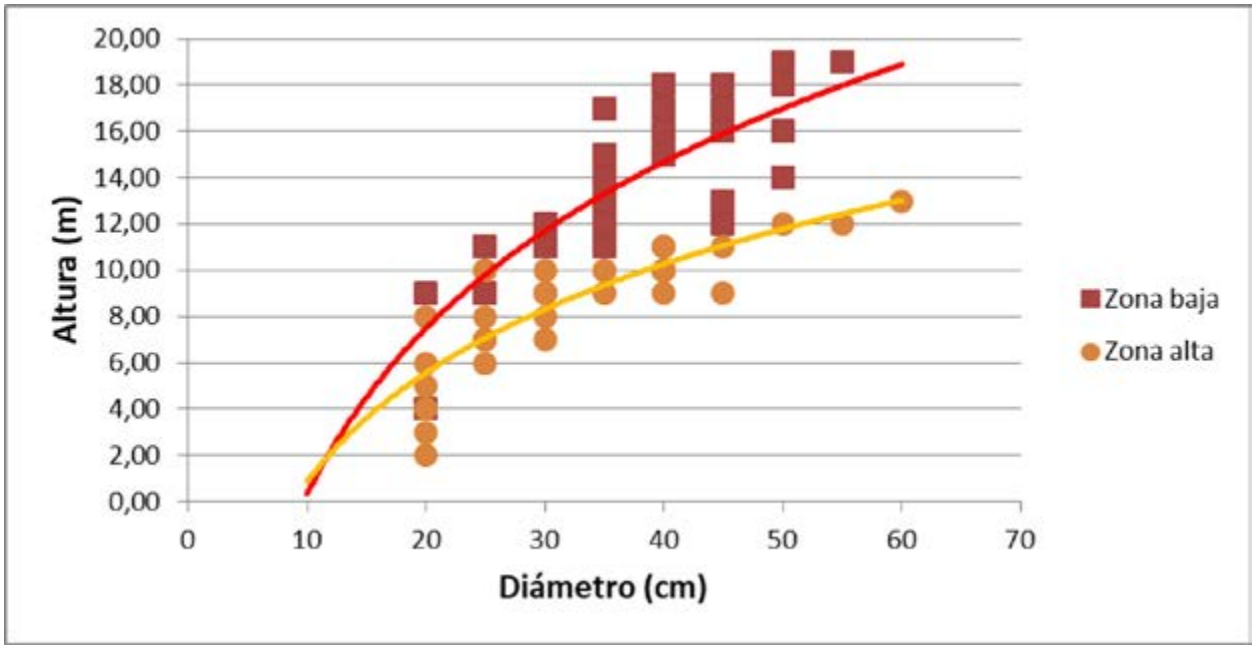
Las curvas de diámetros-alturas son un instrumento útil en los inventarios forestales. En su mayoría, tanto en parcelas de muestreo como en inventarios pie a pie, se suelen medir todos los diámetros de los árboles incluidos y una muestra de alturas representativas, que suelen abarcar un mínimo del 10% de los pies medidos en sus diámetros y que deben incluir pies de las clases extremas, inferiores y superiores. Obviamente, las alturas fuera de rango u outliers, como los fustes rotos, puntisecos o anómalos (forma extraña, situados en los bordes, de gran diámetro o escasa altura, …) no deben incluirse en la muestra de alturas para evitar desajustes de la curva, sobre todo en sus extremos.

Estas curvas permiten cubicar mediante ecuaciones V=f(d,h) todos los árboles, ya que a los árboles cuya altura no se ha medido en campo se les asigna la altura correspondiente a esa curva de alturas. Es el mismo fundamento de las cubicaciones incluidas en muchos planes de ordenación forestal o de programas de tasación forestal como CubicaWeb (https://cubica.hazi.eus/).



Se aconseja construir una única curva para cada rodal monoespecífico, dado que dependen de diversos factores como la especie principal, su edad, su calidad de estación o la existencia de daños bióticos o abióticos. Como ejemplo de estas curvas, se muestra ejemplos elaborados para Pinus pinaster en el proyecto de ordenación del monte Irisasi (IKT, 1998). El cantón 119, plantado en 1962 y con 36 años en el año de inventario, presentaba una gran superficie (44,64 ha). La existencia de dos zonas con calidad muy diferenciada en la altura de los pinos obligó a elaborar dos curvas: la zona de menor altitud (300-450 m), con mejores suelos, presentaba mayores diámetros y alturas, mientas que la zona más cercana a la cumbre de Andatza (450-550 m) presenta suelos arenosos más someros y una mayor exposición al viento y a la nieve, lo que se deriva en un menor desarrollo de los pinos.

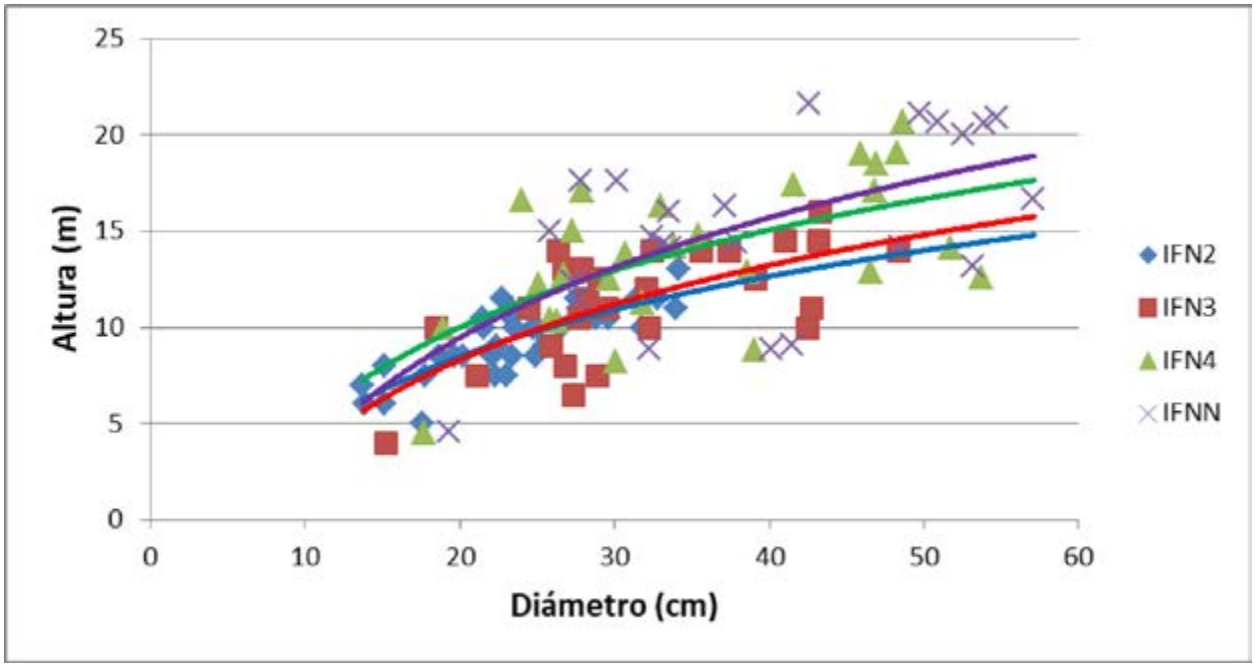
En este mismo inventario de 1998 no sólo se tomaron alturas totales, sino también se midieron las alturas maderables o alturas de fuste de los pinos muestreados en la distintas parcelas, es decir, la altura hasta 20 cm en punta delgada. La citada existencia de dos zonas con calidad muy diferenciada también se reflejaba en la curva de alturas de fuste.

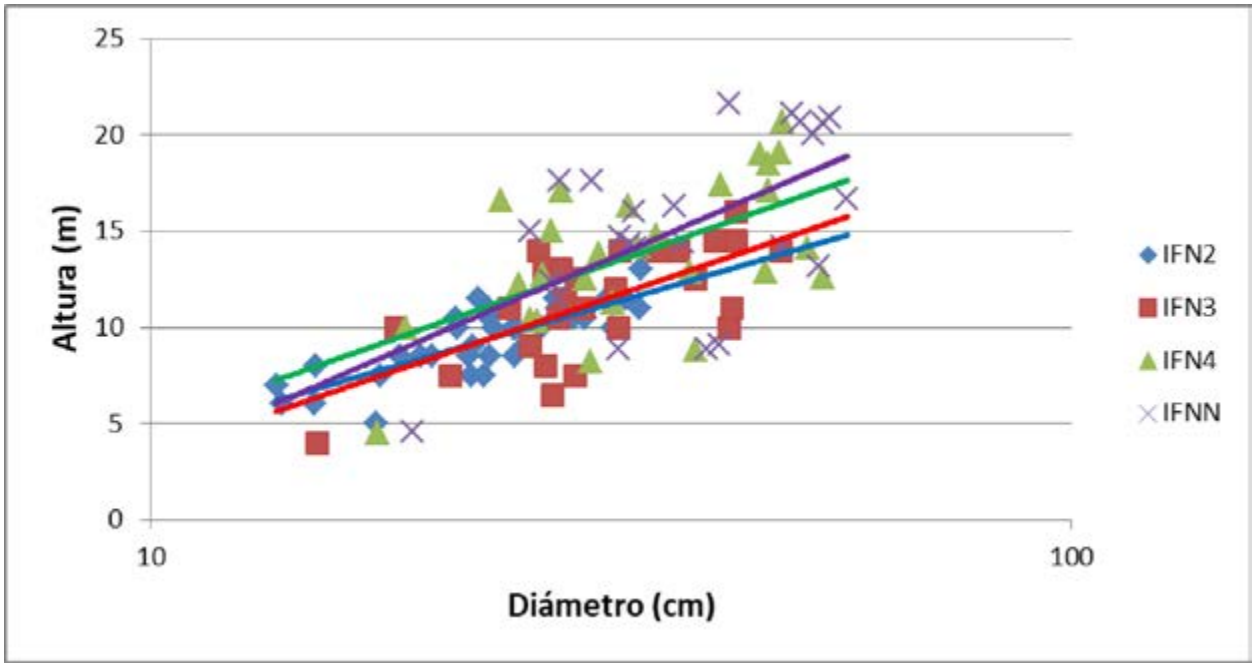


Sin embargo, estas curvas de alturas no son invariables, no sólo porque pueden variar en función de la muestra de alturas medidas en campo, sino fundamentalmente porque a lo largo del tiempo se deben recalcular y adecuarse al arbolado existente en cada momento.

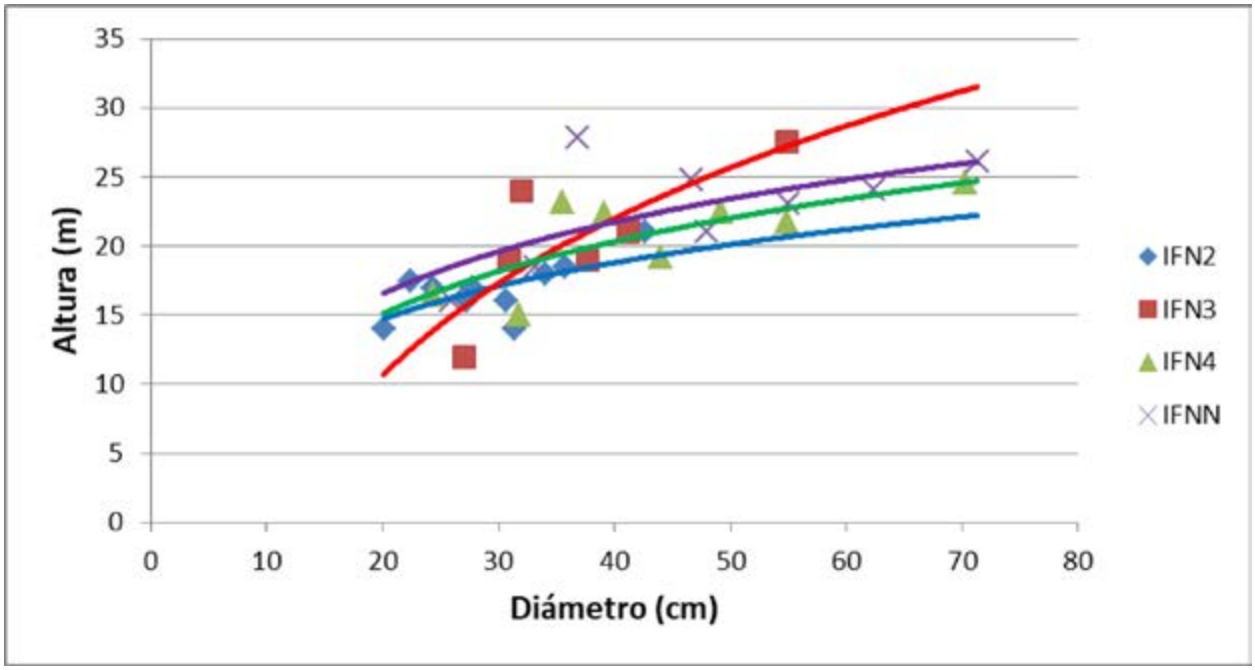
Como ya se ha comentado, en un arbolado coetáneo o regular la curva de alturas se desplaza con la edad hacia la derecha (mayores diámetros) y hacia arriba (mayores alturas). Obviamente, los árboles crecen en diámetro y altura, pero todos no lo hacen al mismo ritmo y ello supone que a lo largo del tiempo no se pueda emplear la misma ecuación h=f(d) en el mismo arbolado, sino que hay que readaptarla a las nuevas condiciones.

Ejemplos gráficos de ese desplazamiento de la curva de alturas los proporcionan las parcelas del Inventario Forestal Nacional (IFN), remedidas desde hace décadas. Por ejemplo, los pinos marítimos de la parcela 0385 de La Coruña (provincia 15) han sido remedidos desde 1987 (IFN2) hasta 2018 (IFNN). Se aprecia bien el citado desplazamiento de la curva de alturas, tanto en escala lineal (gráfico superior) como en escala logarítimica (gráfico inferior).

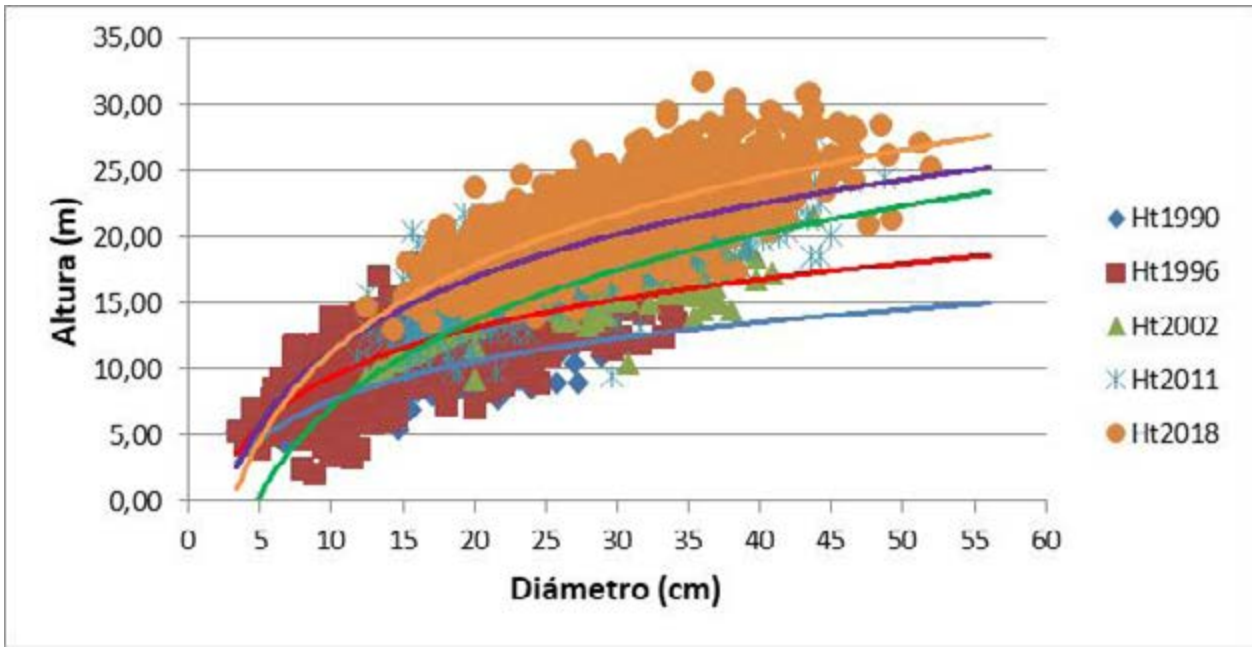


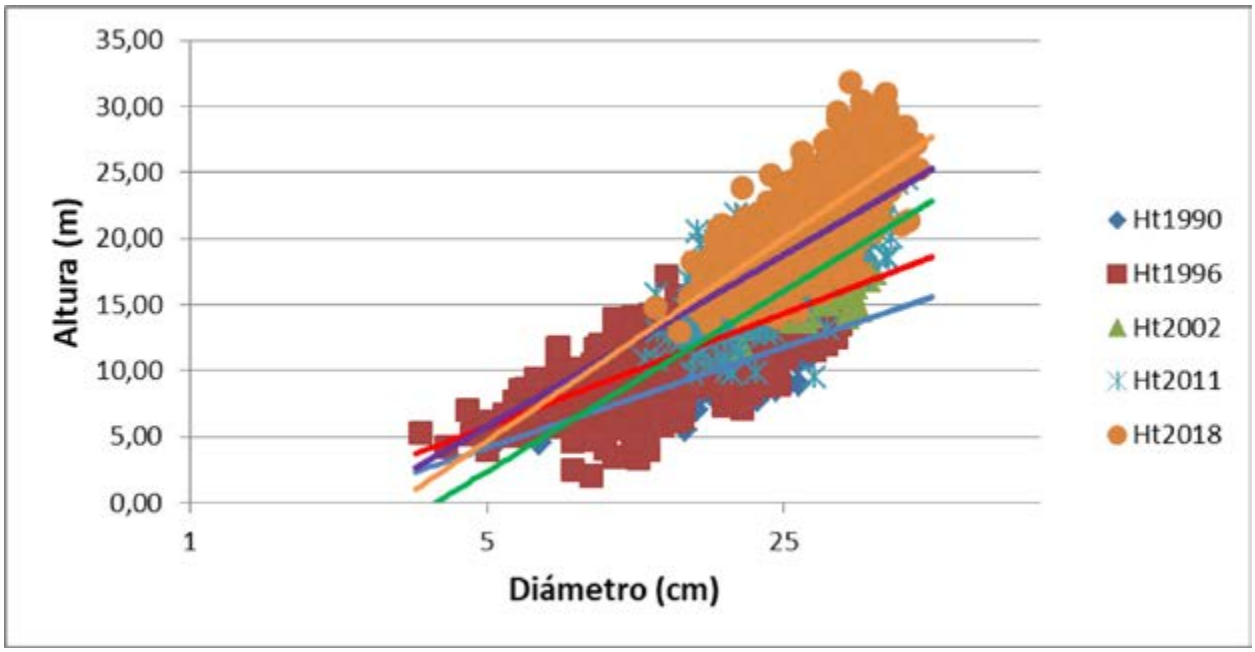


Sin embargo, si la parcela cuenta con pocas mediciones de alturas o si ha podido haber errores en alguna de las remediciones es posible encontrar curvas extrañas. Es el caso de la parcela 0305 de La Coruña en el IFN3.

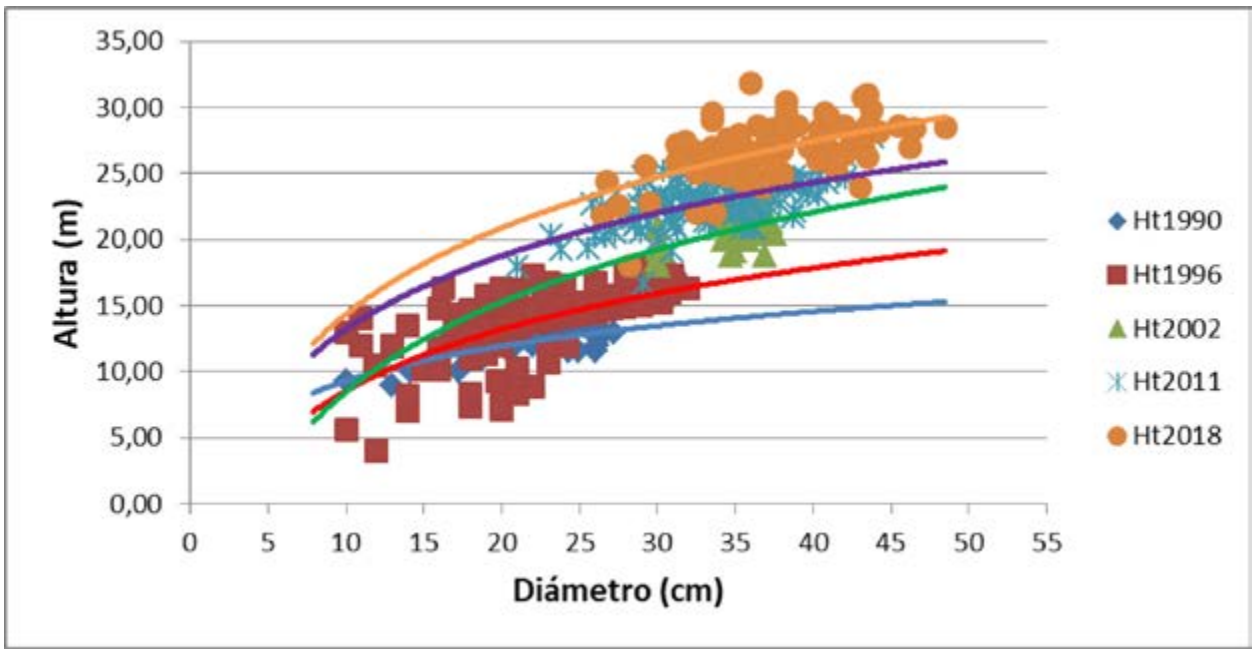


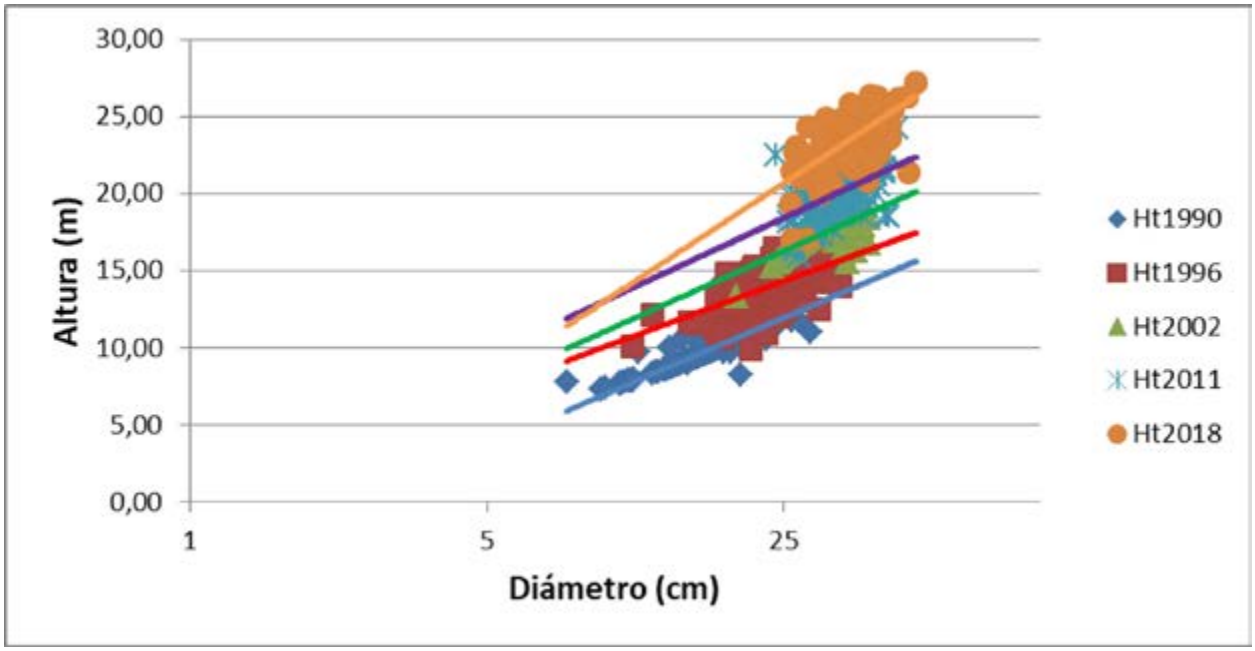
Los 3.200 pinos laricios de las 8 parcelas de Gipuzkoa remedidas durante los proyectos REINFFORCE y POCTEFA Canopée a lo largo de 30 años permiten apreciar también ese desplazamiento de la curva de alturas.



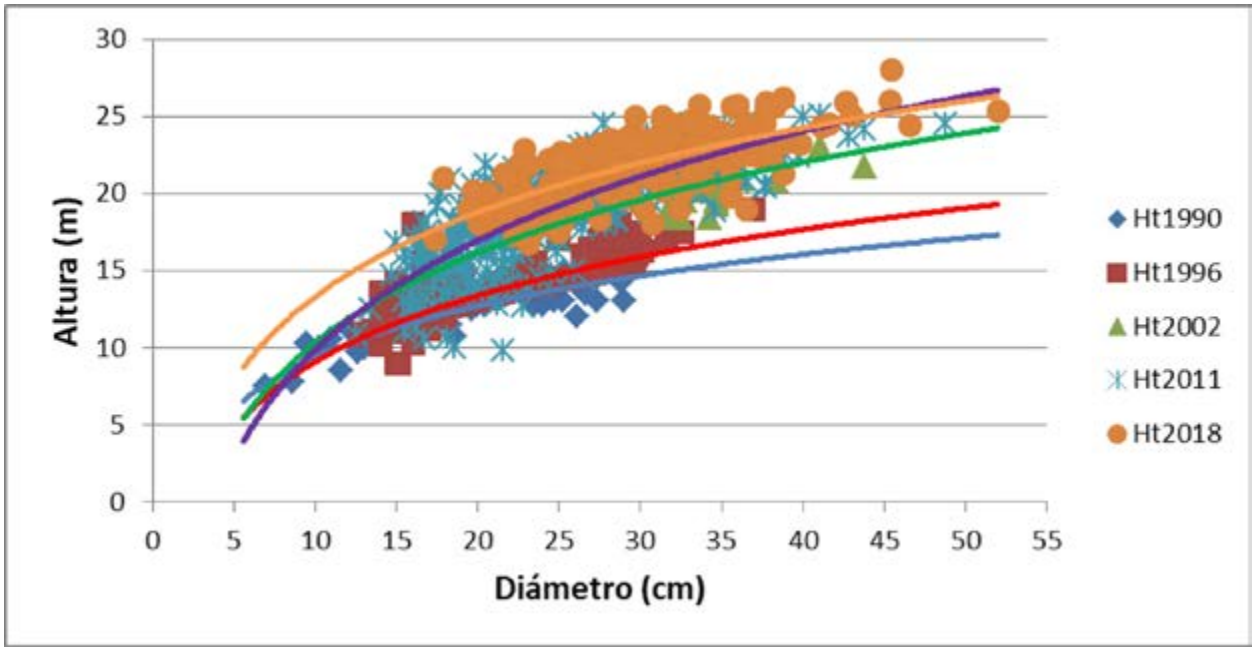


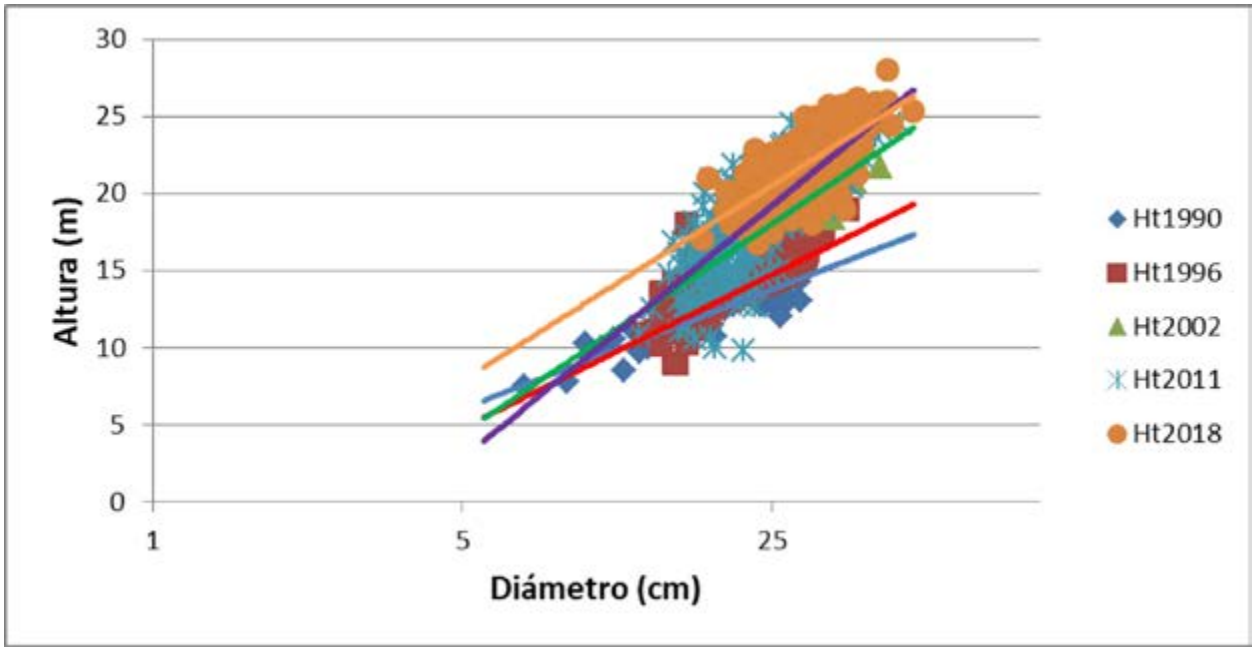
Si se analizan las alturas de los pinos laricios de la parcela 106 (Ataun), que es la de mejor calidad y una de las más aclaradas (actualmente presenta 370 pinos/ha), las curvas de alturas se distinguen bien, con un buen escalonamiento entre sí.



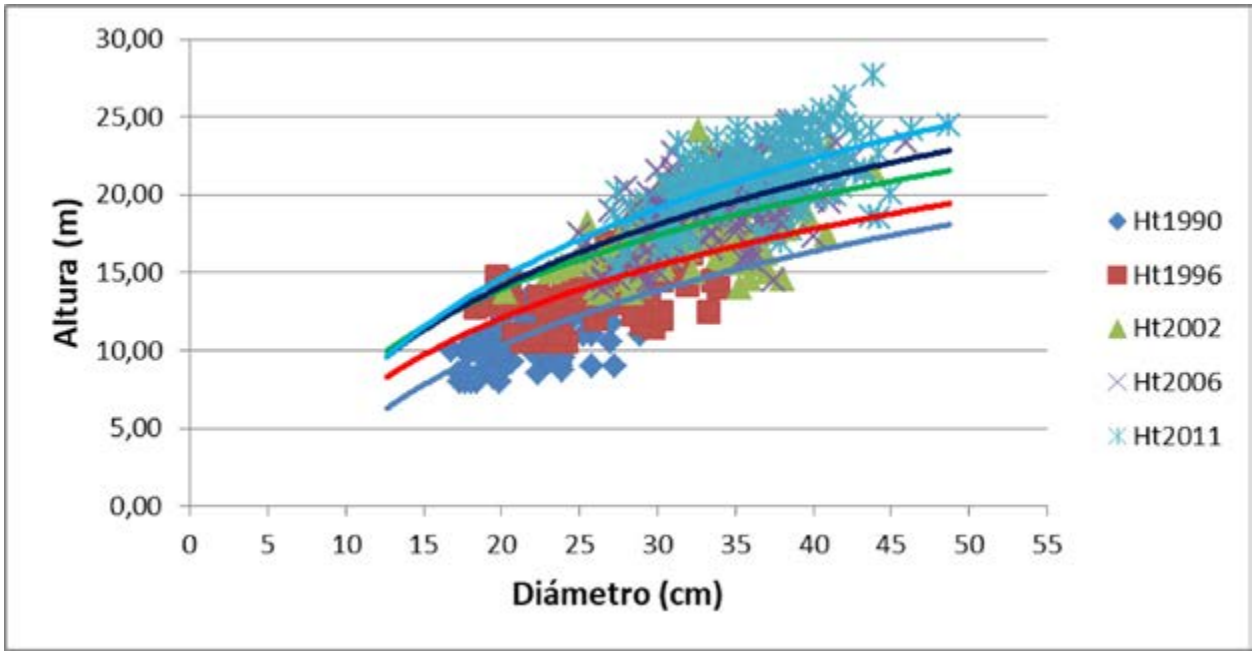


Por el contrario, si sólo se analizan los pinos laricios de la parcela 108 (Andoain), que es la única parcela nunca aclarada (presenta unos 1.000 pinos/ha y 900 m3/ha), las curvas de alturas se siguen distinguiendo entre sí, pero tienden a converger en el origen de las coordenadas (donde se ubican los árboles de menor tamaño) y, también, hacia una asíntota superior en las mediciones más recientes.

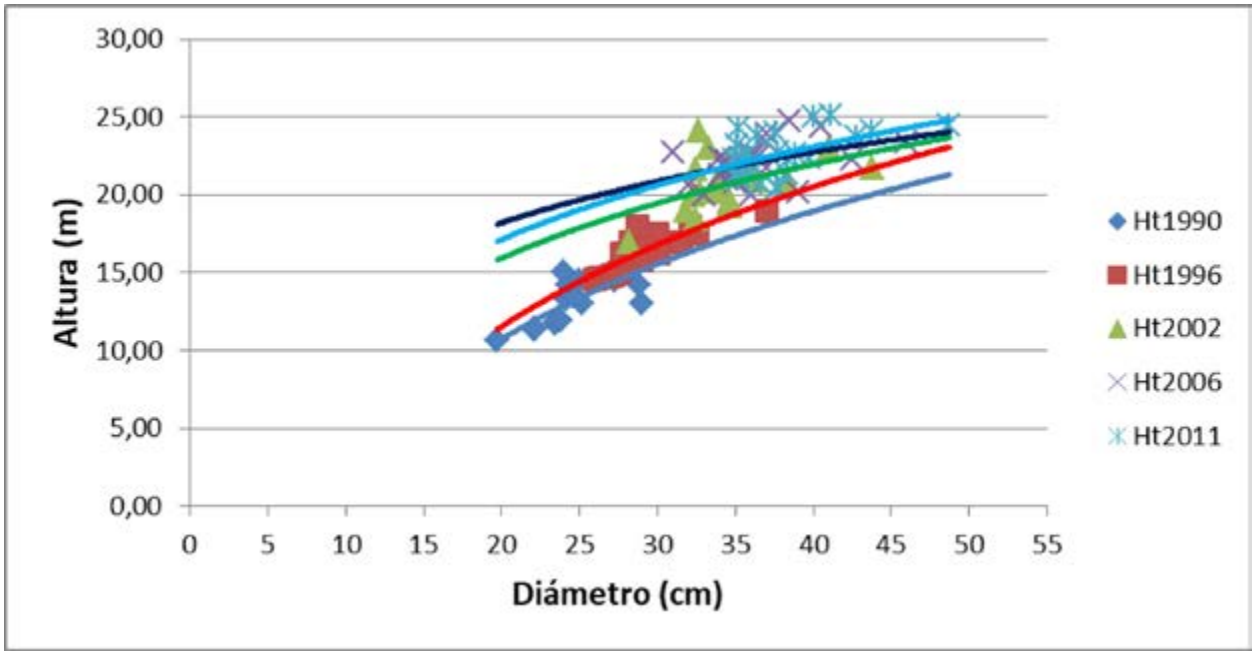




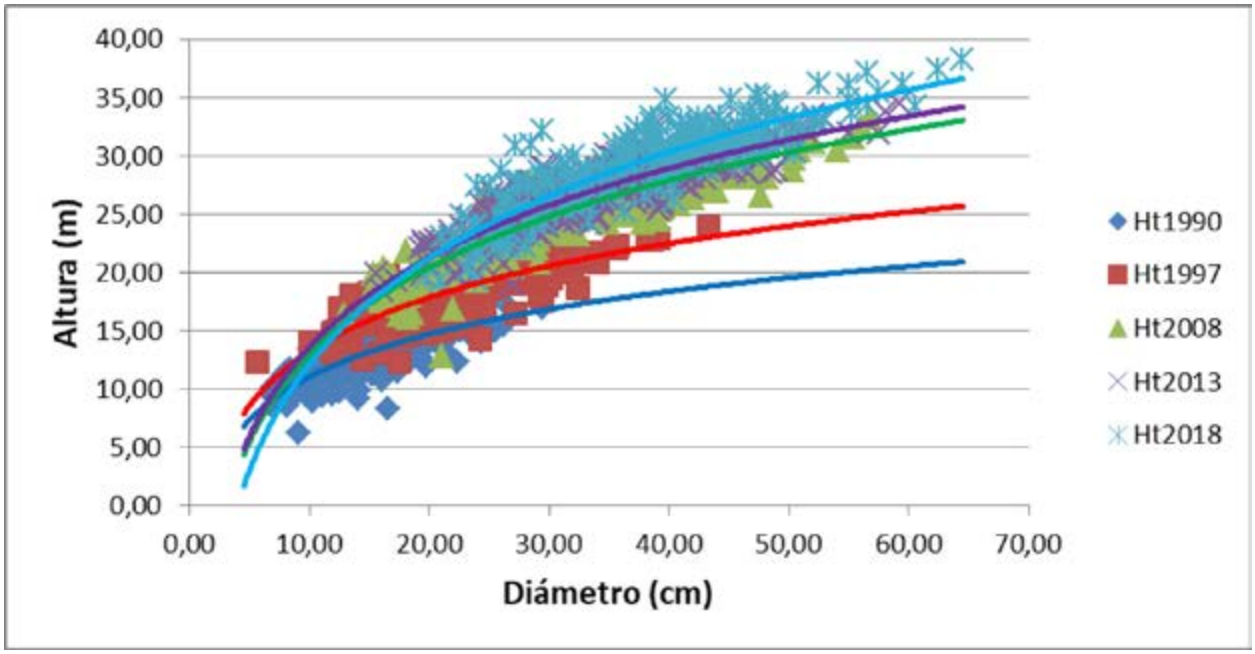
Tomando sólo los 20 pinos laricios dominantes de cada una de esas 8 parcelas remedidas, se aprecia también el citado desplazamiento de la curva de alturas.



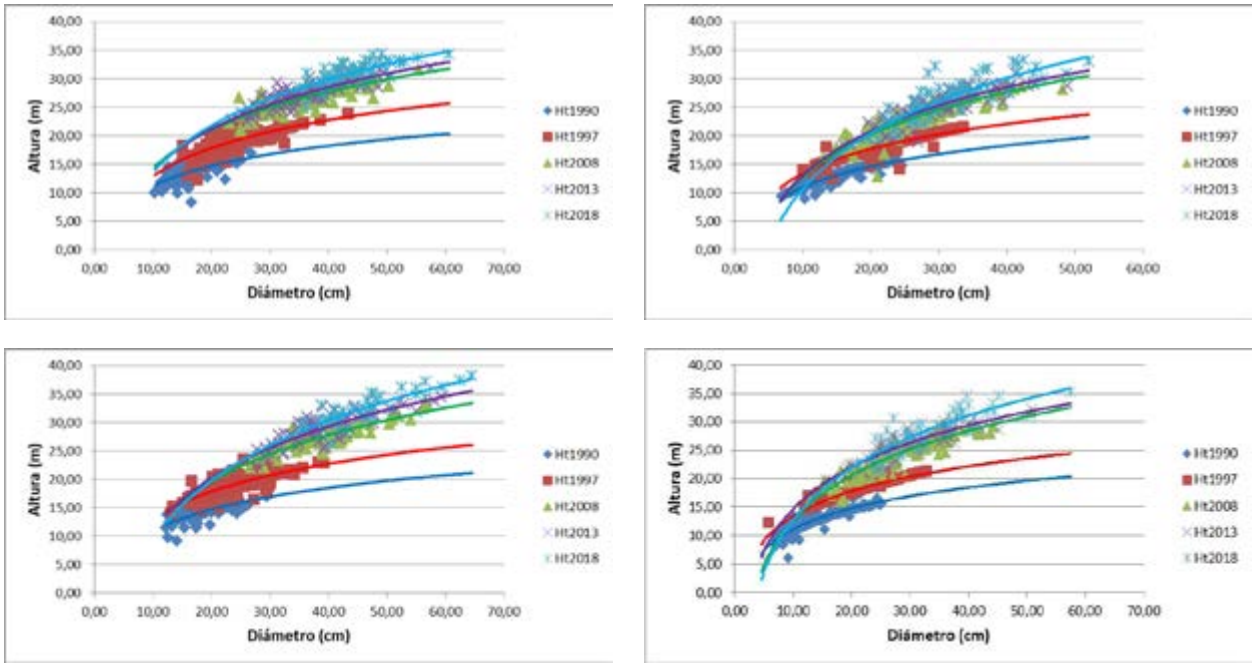
Y como ejemplo, analizando los pinos laricios dominantes de la citada parcela 108, la única parcela nunca aclarada, las curvas de alturas se sigue apreciando el desplazamiento de la curva de alturas y la disminución de su pendiente en los diámetros superiores (asíntota).



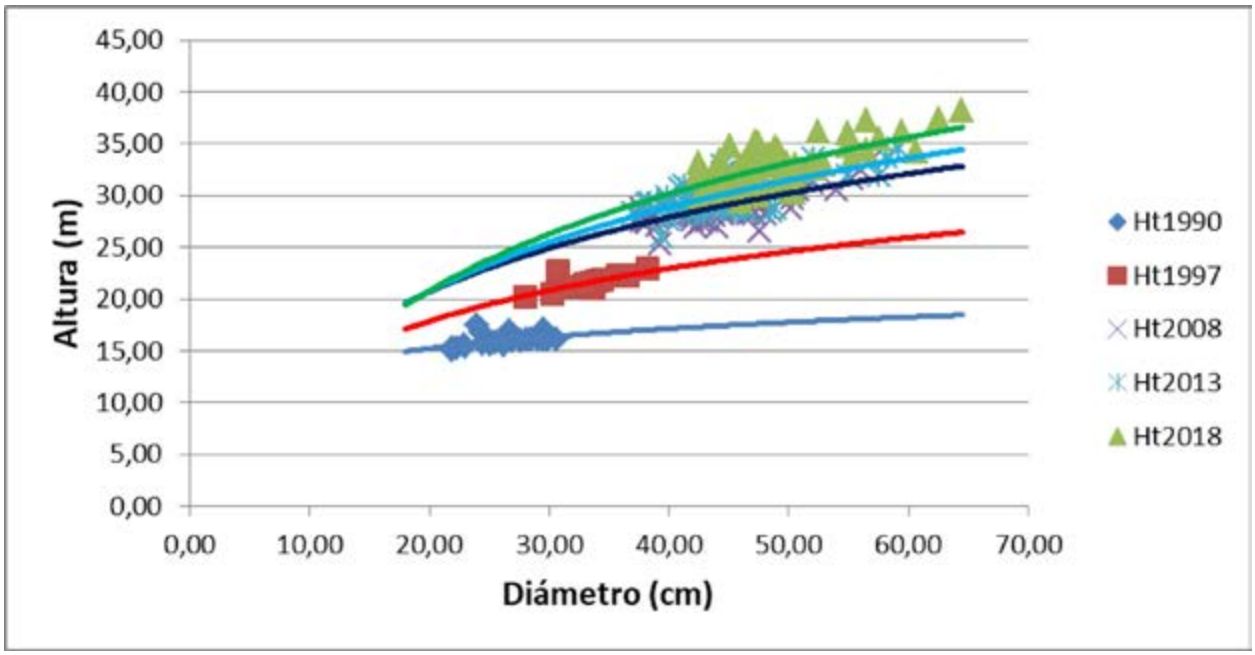
Por su parte, las alturas de los 950 abetos Douglas incluidos en las 4 parcelas de Ataun (Gipuzkoa) plantadas en 1969 y remedidas durante los proyectos REINFFORCE y POCTEFA Canopée también permiten apreciar ese desplazamiento de la curva de alturas y esa aproximación de todas en el origen de las coordenadas.



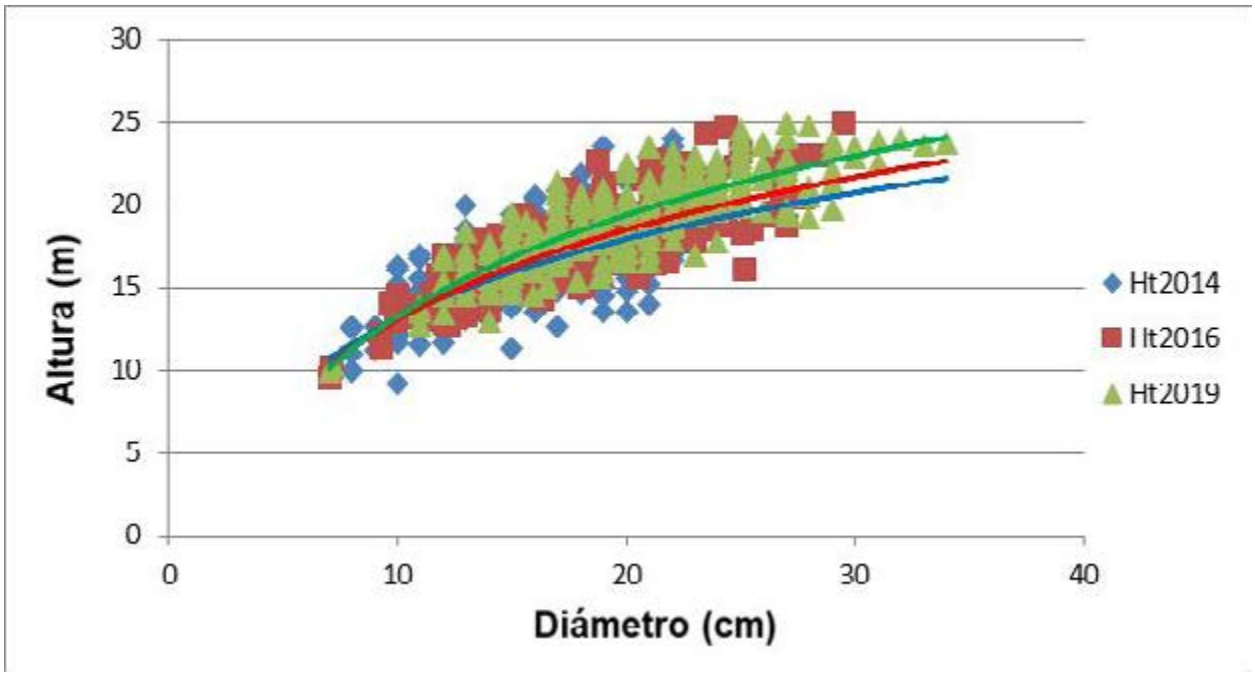
Las dos gráficas de la izquierda muestran la evolución en las 2 parcelas de Douglas aclaradas (densidad actual 230-250 pies/ha), mientras que a la derecha se muestran las 2 parcelas no aclaradas (densidad actual 700-980 pies/ha).



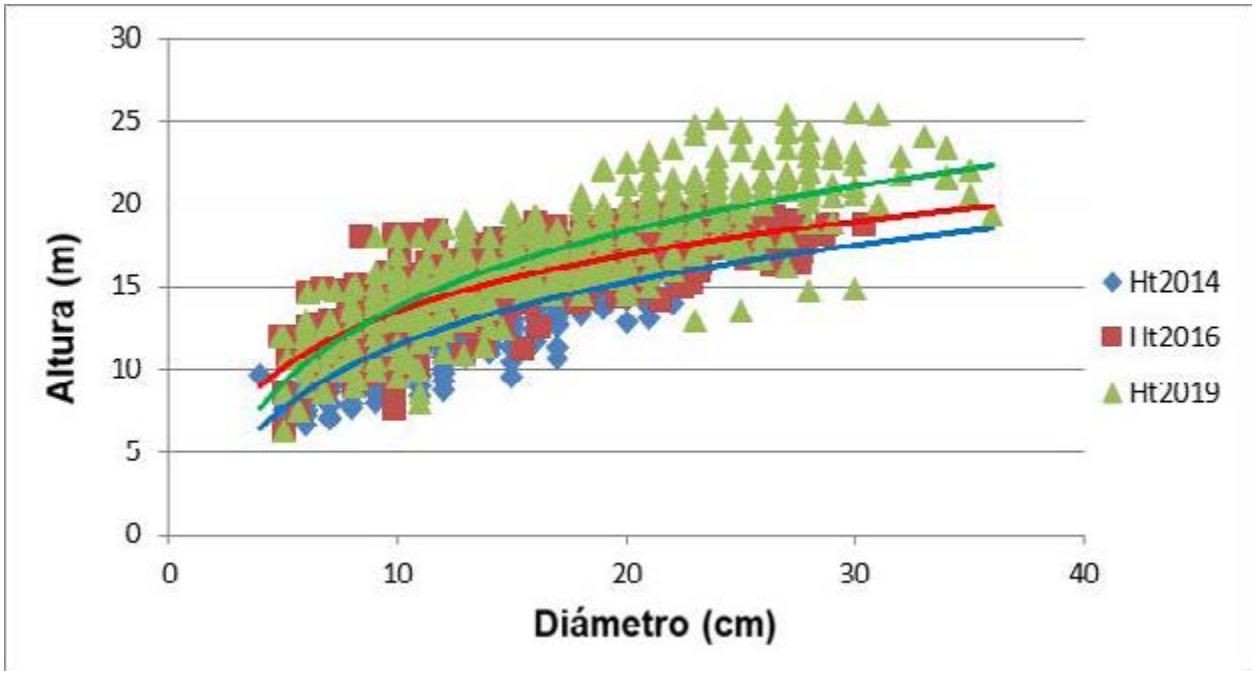
Y tomando sólo los abetos Douglas dominantes de cada una de esas 4 parcelas remedidas, se aprecia también el citado desplazamiento de la curva de alturas.



En el proyecto HEALTHY FOREST se han remedido recientemente varias parcelas jóvenes de pino radiata situadas en el País Vasco, bajo distintas densidades y diversos grados de ataque por hongos defoliadores. El seguimiento de estos rodales o parcelas coetáneos permite comprobar la evolución de estas curvas de alturas según la edad. Por ejemplo, en la parcela de Luiando, con más de 900 pinos radiata en una masa sana y bien aclarada, las variaciones en las curvas de alturas son de escasa entidad a lo largo de un quinquenio.



En cambio, en la parcela de Laukiz1, con más de 1.600 pinos radiata en una masa enferma y nunca aclarada, las variaciones en las curvas de alturas han sido importantes, por efecto de los pinos dominantes, que han crecido de forma apreciable a lo largo de un quinquenio.

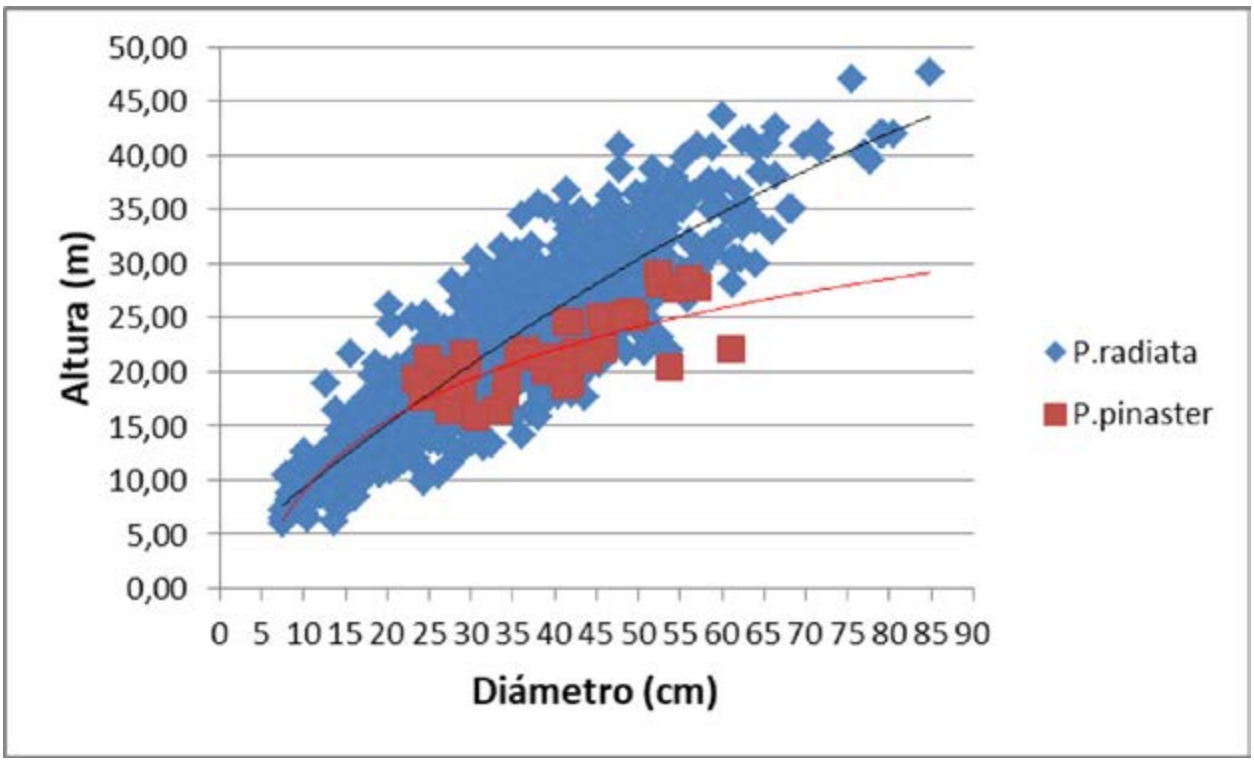


2.- Variación a nivel macizo

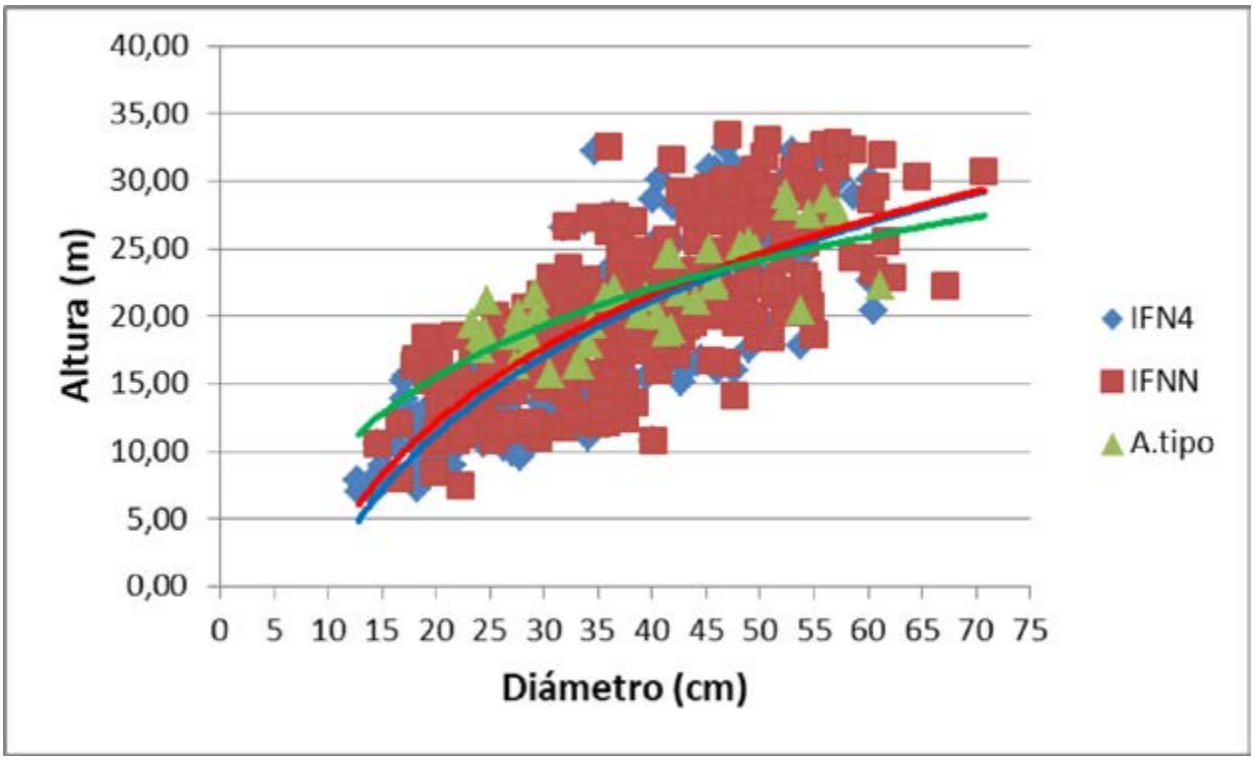
Si se analiza una zona forestal más amplia que un solo rodal o un monte, aumenta obviamente la variabilidad en alturas. Es el caso de, por ejemplo, la curva de alturas de una especie forestal concreta para un territorio o macizo forestal. Suelen mostrar las alturas correspondientes a árboles de diversas edades y calidades de forma que emplear estas curvas para asignar una altura a un pie de diámetro concreto resulta muy aventurado.

Son curvas complejas en su toma de datos, ya que tienen que elegirse bien los árboles para que la muestra sea representativa de un macizo. Por ejemplo, abajo se comparan las curvas de alturas de árboles tipo empleados para elaborar las ecuaciones de cubicación para Pinus radiata (837 pinos muestreados) y para Pinus pinaster (42 pinos) en el País Vasco[1].

1 Empleo del láser escáner terrestre para la construcción de nuevas ecuaciones de cubicación en el País Vasco. Comunicación 7CFE01-090. Plasencia, junio 2017.

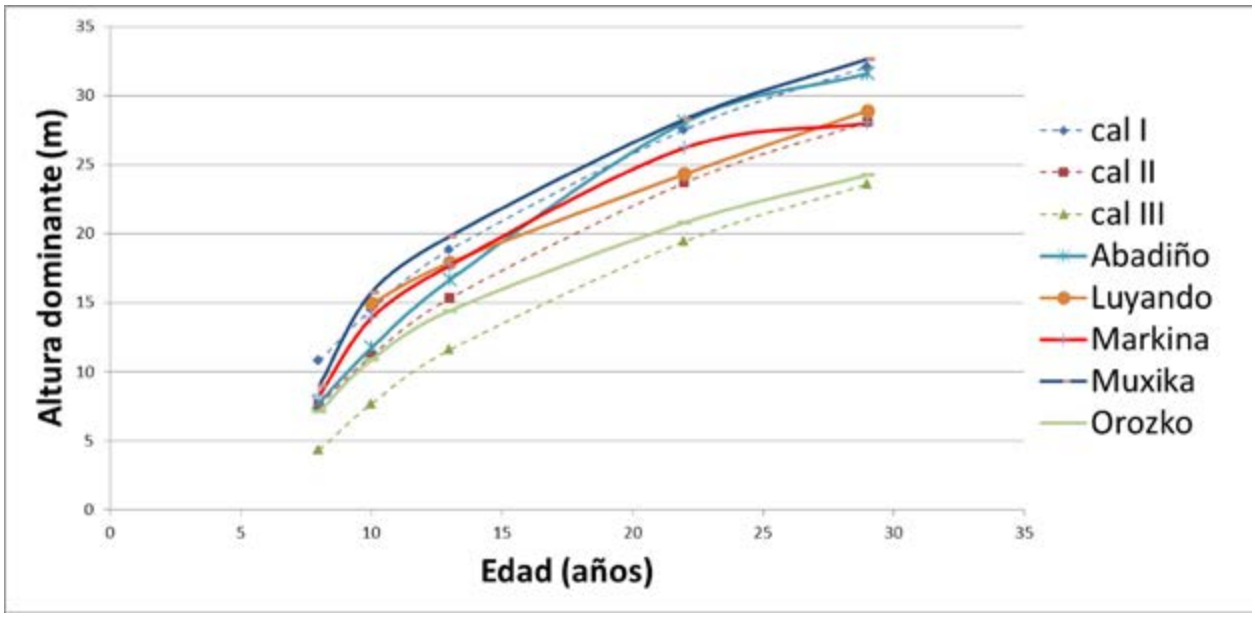


Las patentes diferencias en las alturas de ambas especies derivan de su distinto ritmo de crecimiento y de los distintos suelos en los que se suelen emplear en reforestación: más profundos y arcillosos en pino radiata y más someros y arenosos en pino marítimo. Si se comparan la citada muestra de alturas de árboles tipo de Pinus pinaster empleados para elaborar esa ecuación de cubicación en el País Vasco y la muestra de 284 pinos marítimos remedidos en Bizkaia entre IFN4 e IFNN, se comprueba la semejanza entre estas curvas regionales o disponibles a nivel de macizo vasco. Esta semejanza, presumiblemente, indica la buena representación de la muestra elegida de diámetros y alturas para elaborar la citada ecuación de cubicación de pino marítimo.

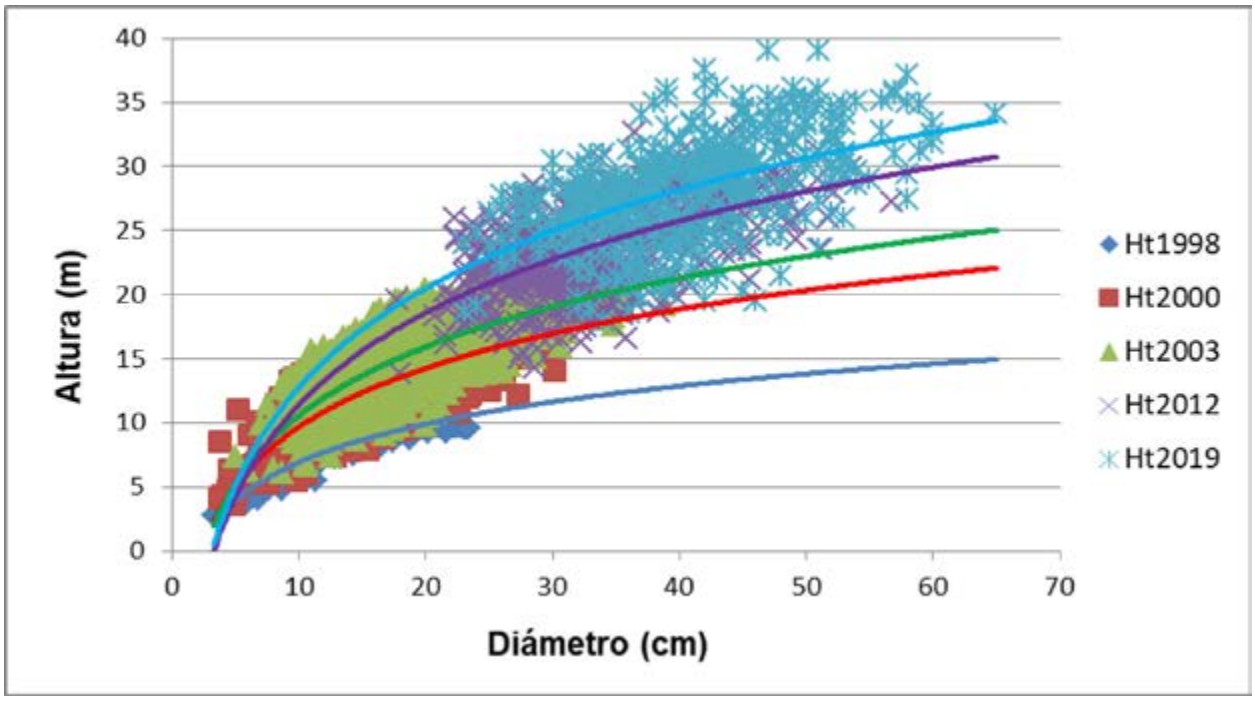


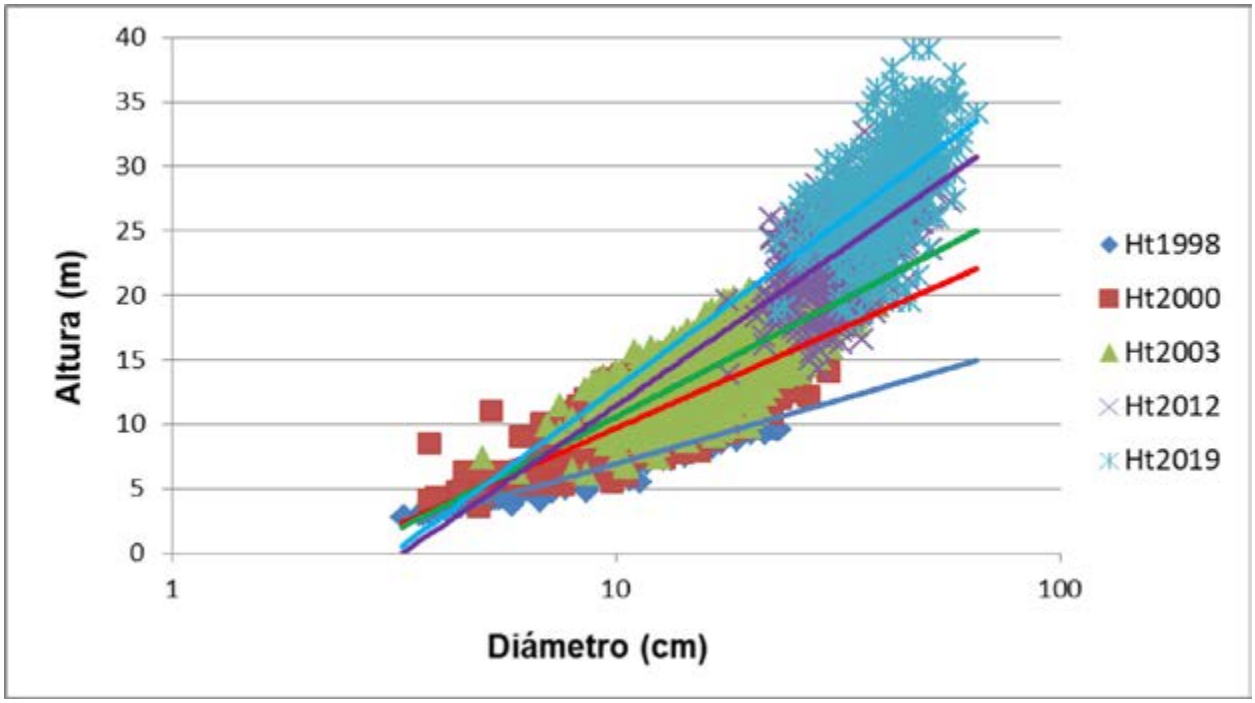
Se puede considerar que la suma de los datos de diversos rodales o parcelas variadas en una misma zona forestal permite construir curvas de alturas a nivel regional. Por ejemplo, en las 5 parcelas de pino radiata levantadas en

1990 y remedidas en el marco de los proyectos REINFFORCE y HEALTHY FOREST se puede ir analizando las variaciones en su altura dominante (Ho), comparando con las 3 clases de calidad de las conocidas tablas de producción para Pinus radiata de Madrigal y Toval (1975). En este caso, las curvas de altura dominante tienen la forma Ho=f(t), tal y como se suelen presentar en las tablas disponibles de producción de una especie para una región concreta. En la evolución de estas parcelas remedidas de pino radiata, se comprueban ciertas variaciones en la asignación más reciente de algunas parcelas en clases de calidad según su altura dominante/edad en cada inventario concreto. En parcelas como las de Abadiño o Markina, el reciente descenso en clase de calidad es achacable al ataque de hongos defoliadores en el verano de 2018. La parcela de Muxika, por el contrario, no ha sido afectada por ese ataque y mantiene su clasificación dentro de la máxima clase de calidad (I).

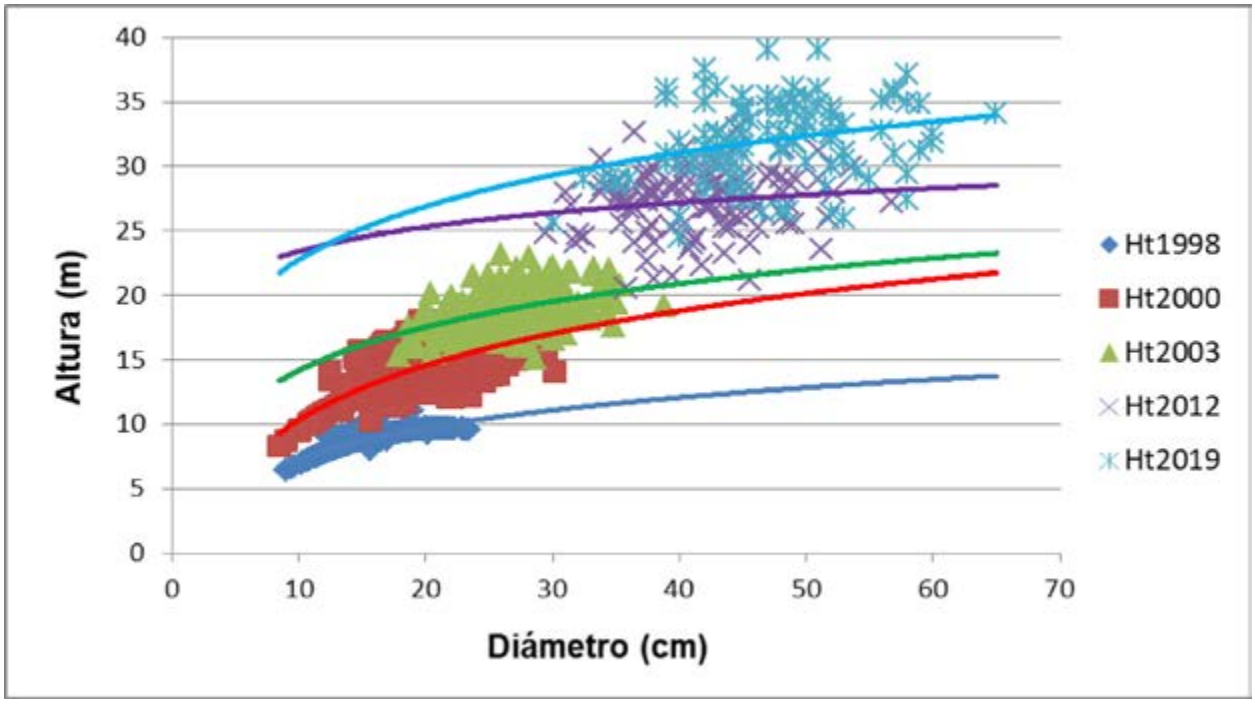


En el conjunto de subparcelas remedidas en esas 5 localizaciones, se cuenta con unos 5.910 pies situados en parcelas de pino radiata con varias densidades y calidades. Se constata el citado desplazamiento de la curva de alturas hacia arriba y hacia la derecha.

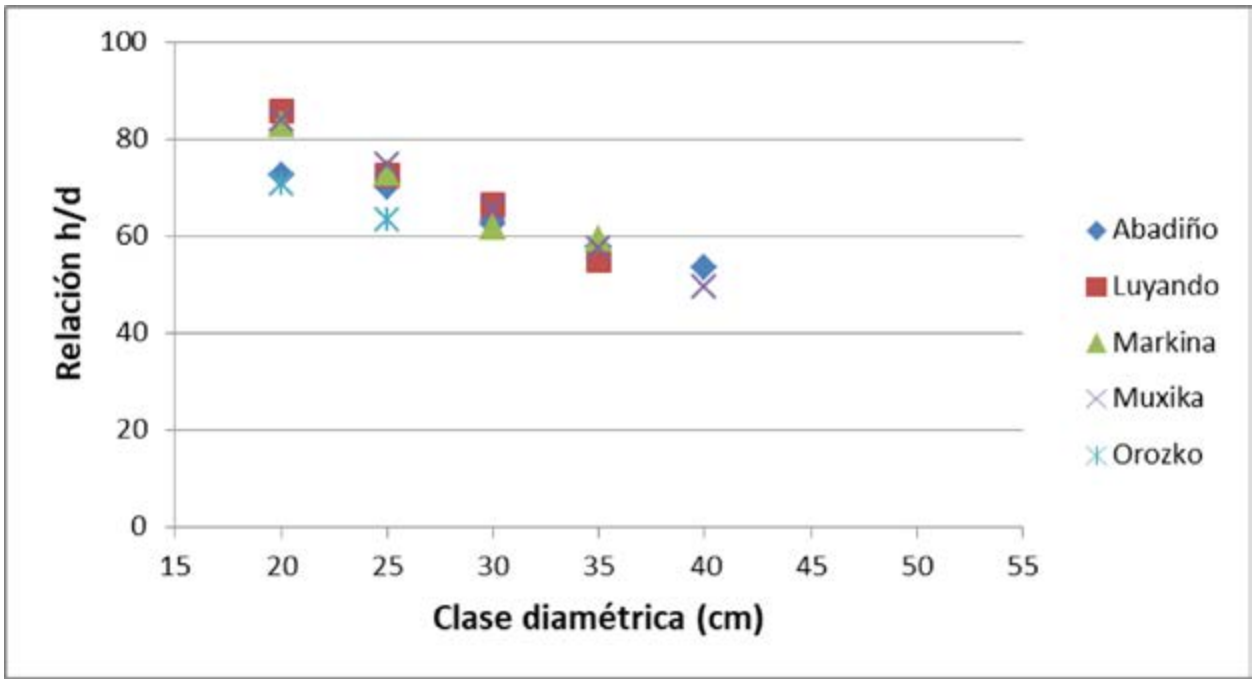




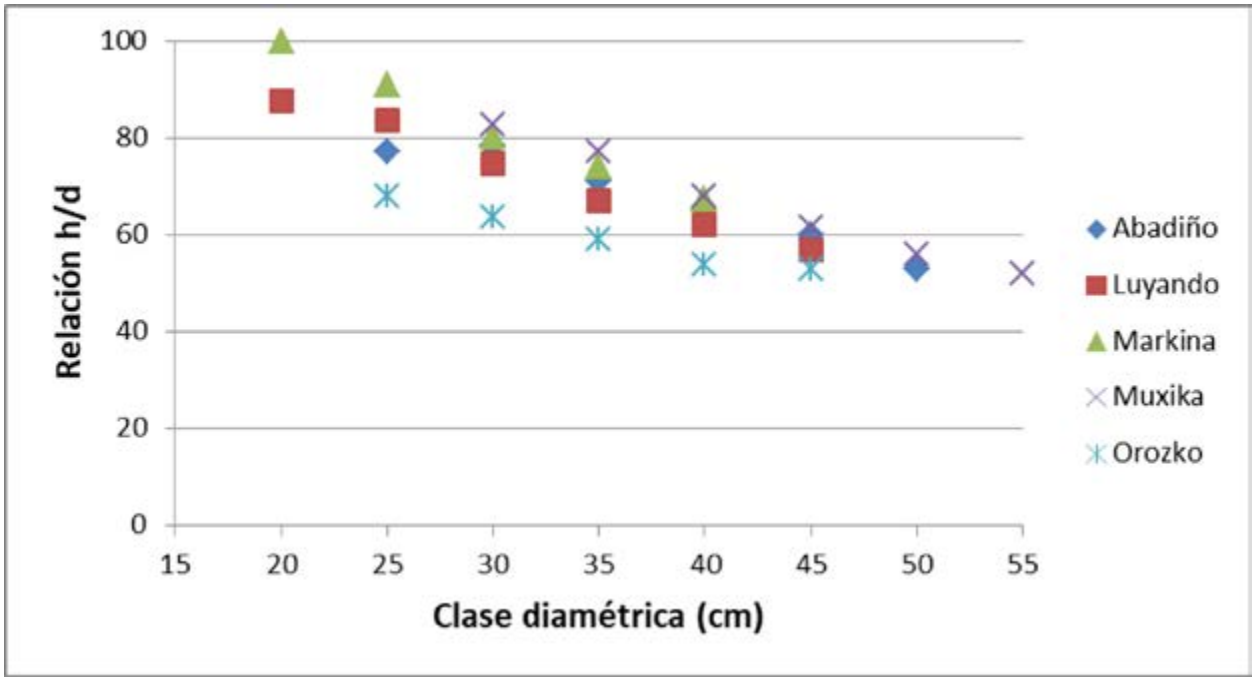
Si sólo se representan los pinos de la citada parcela de Muxika, la de mejor calidad media, se muestra la evolución de alturas de más de 1.160 pinos radiata.



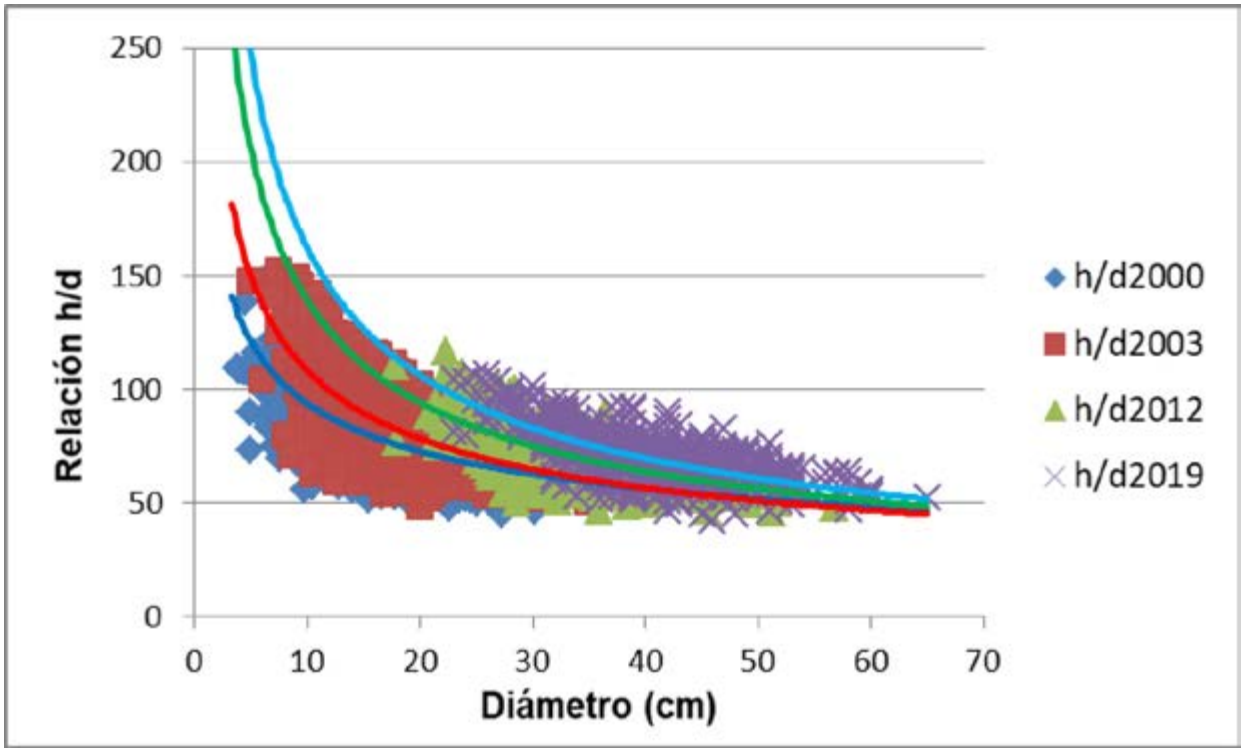
Como se ha comentado, la calidad de estación o clase de calidad de un arbolado influye en la curva h/d. Por ejemplo, las citadas parcelas de Abadiño y Muxika, que han venido siendo asignadas a la mejor calidad (clase I) gracias a su menor cota media (171 m), se distinguen frente a la media de subparcelas de Orozko, de peor calidad (clase III) y situadas a mayor altitud (451 m). En el muestreo de 2000, Orozko destaca por su menor relación h/d frente a las de mejor calidad:

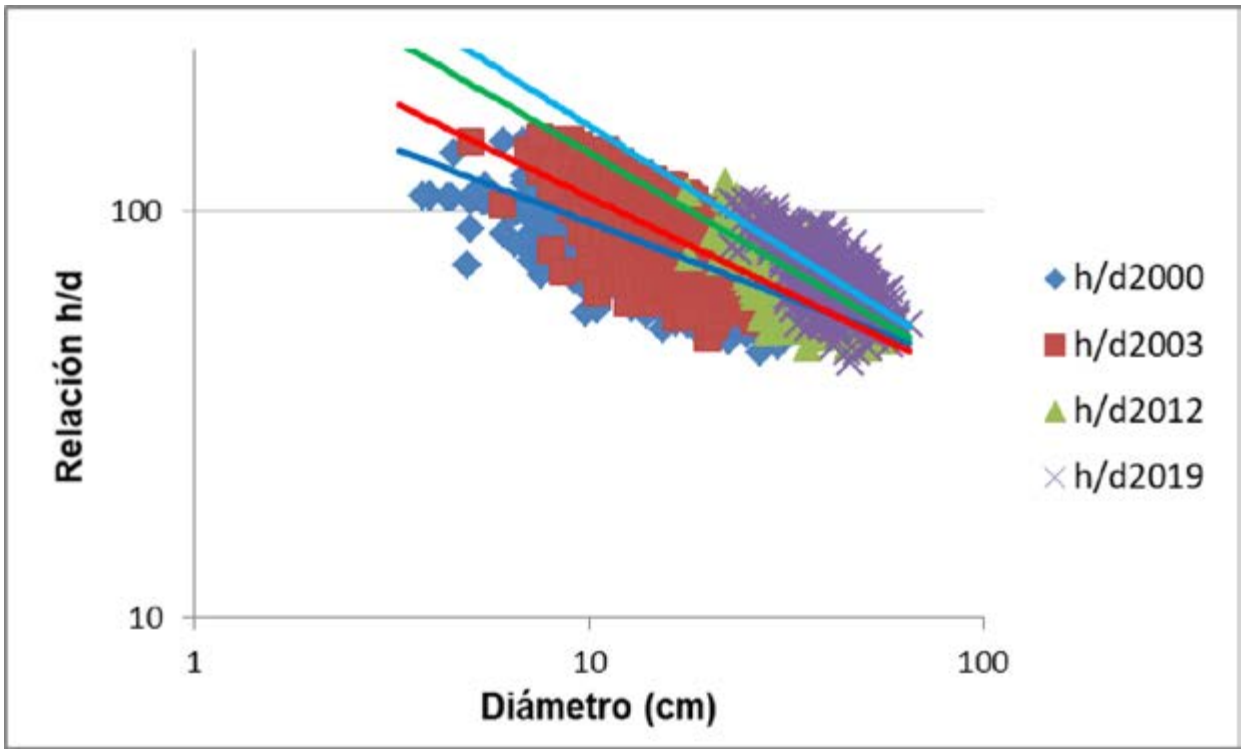


Y en el muestreo de 2012, Orozko destaca aún más por su baja relación h/d, dado que su crecimiento medio en altura ha sido inferior al resto:

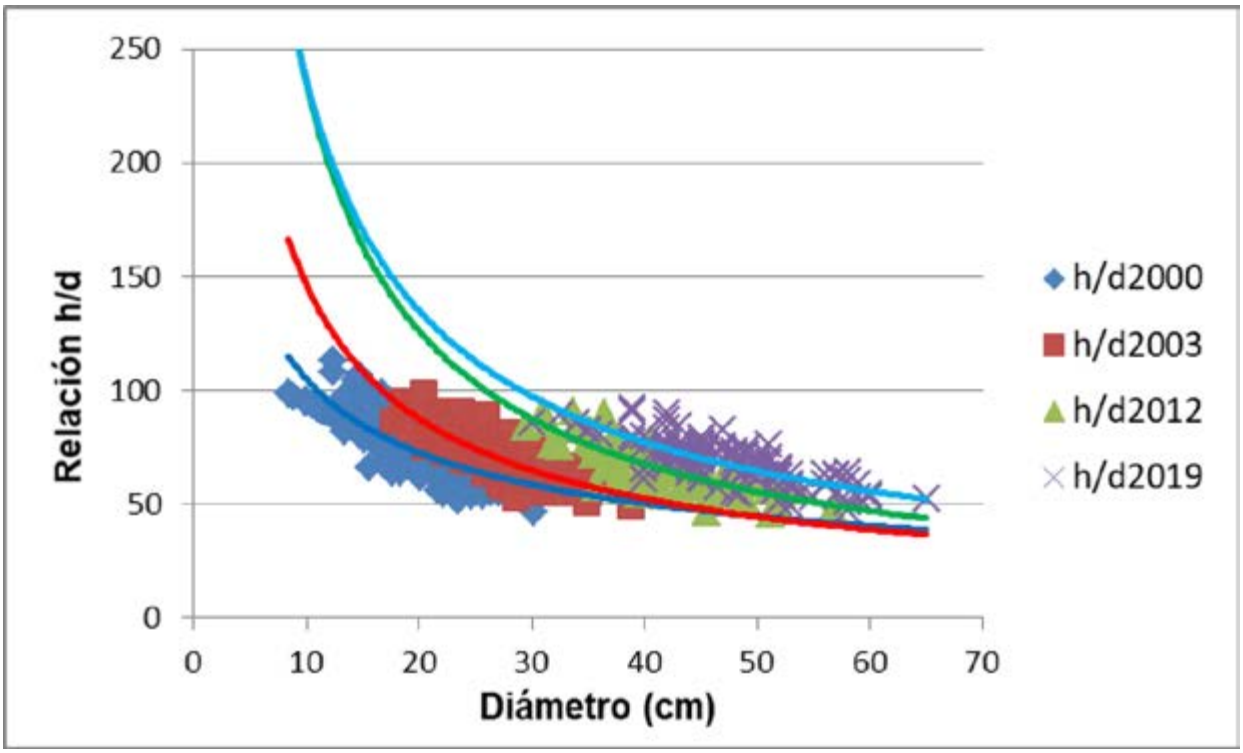


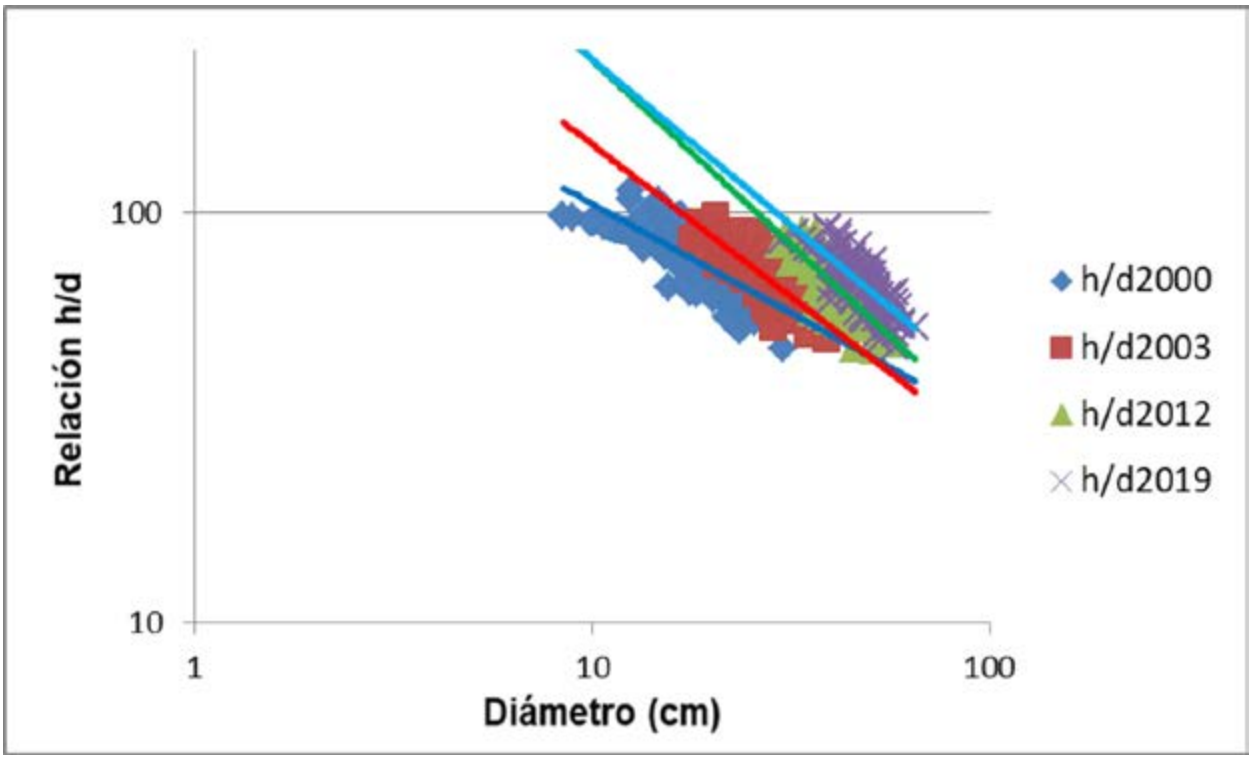
Si se analiza el índice de esbeltez o relación h/d de cada pino radiata a lo largo del tiempo, se comprueba que en general va aumentando con la edad, en escala lineal y logarítmica.



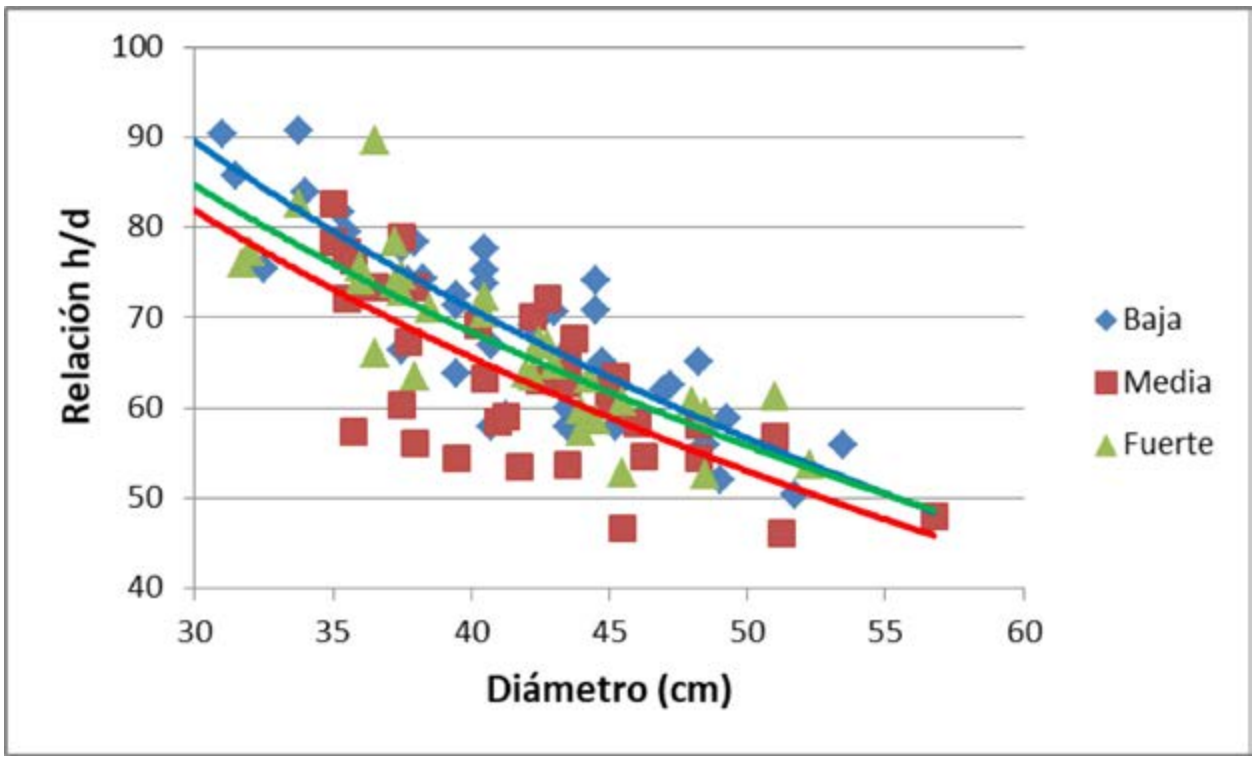


Si sólo se analizan los pinos de la parcela de mejor calidad (Muxika), esta tendencia al aumento a lo largo del tiempo se mantiene.

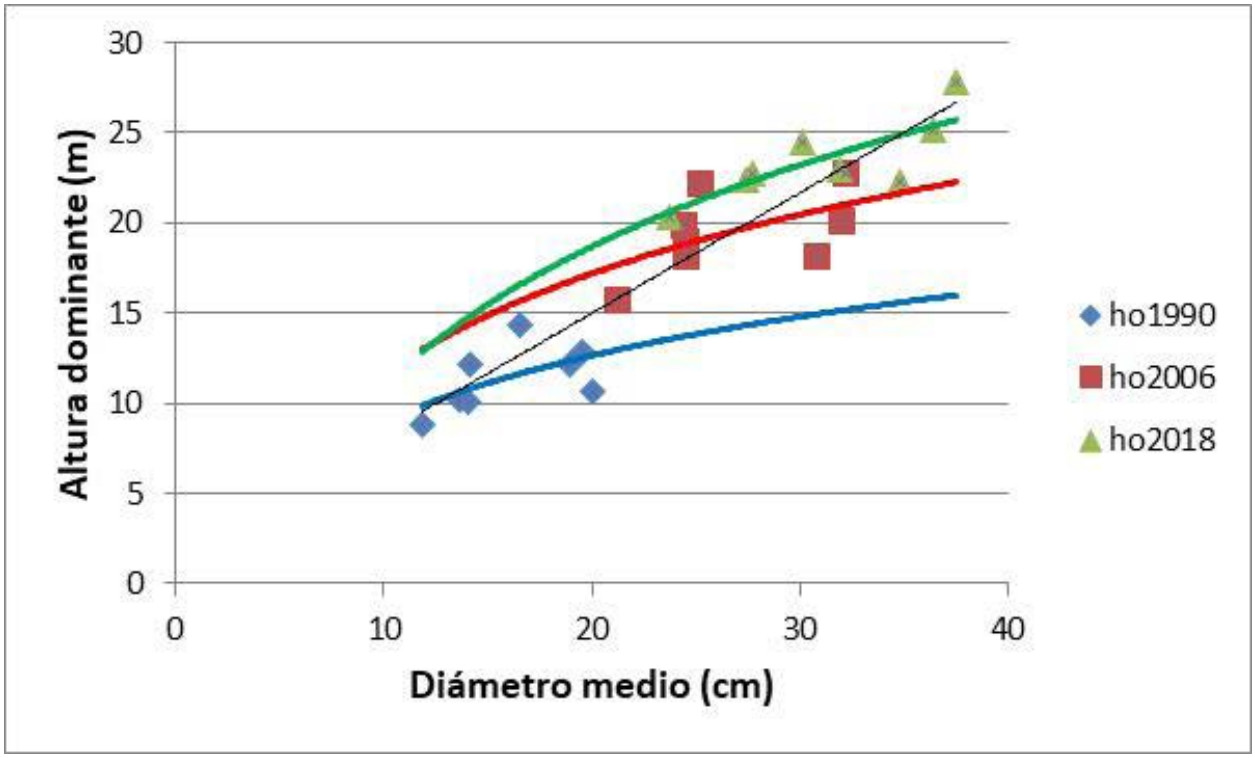


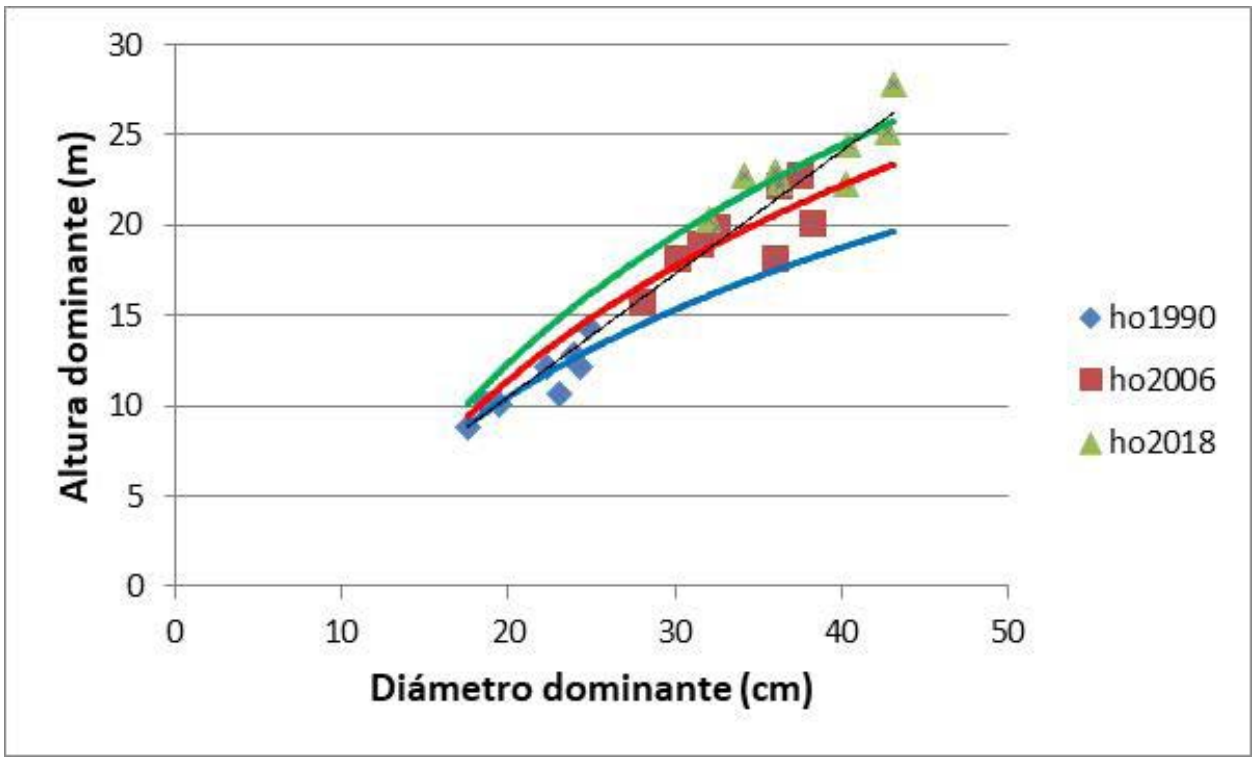


Tomando en esta misma parcela de Muxika los mismos datos de 2012, se pueden comparar los 39 pinos situados en las 3 subparcelas de Baja intensidad de aclareo (densidad actual de 260 pies/ha) frente a los 39 pinos situados en las 3 subparcelas de Media intensidad de aclareo (densidad de 240 pies/ha) y a los 32 pinos situados en las 3 subparcelas de Fuerte intensidad de aclareo (densidad de 213 pies/ha). Se observa que en los diámetros menores (30-45 cm), los pinos incluidos en las parcelas menos aclaradas presentan mayores alturas y, por tanto, mayores valores de índice de esbeltez. En los diámetros mayores, por el contrario, esas diferencias tienden a desaparecer.

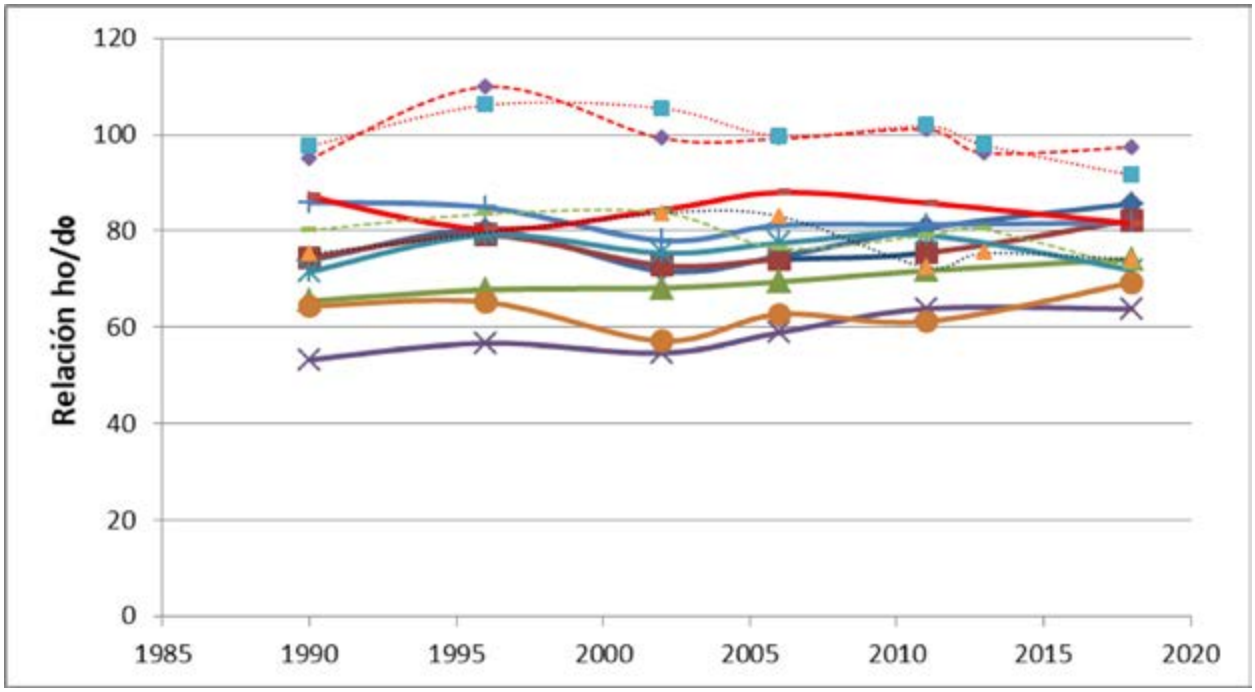


El análisis de las 8 parcelas de pino laricio de unos 50 años medidas en 1990, 2006 y 2018 en el marco de los proyectos REINFFORCE y POCTEFA Canopée proporciona tendencias en la relación ho/d a lo largo de unos 30 años. Tanto si se analiza el diámetro medio de cada parcela como su diámetro dominante (la media de los 100 pinos/ha más gruesos), se comprueba que las curvas correspondientes a cada año de medición no concuerdan con la suma de todas las mediciones (recta de color negro).

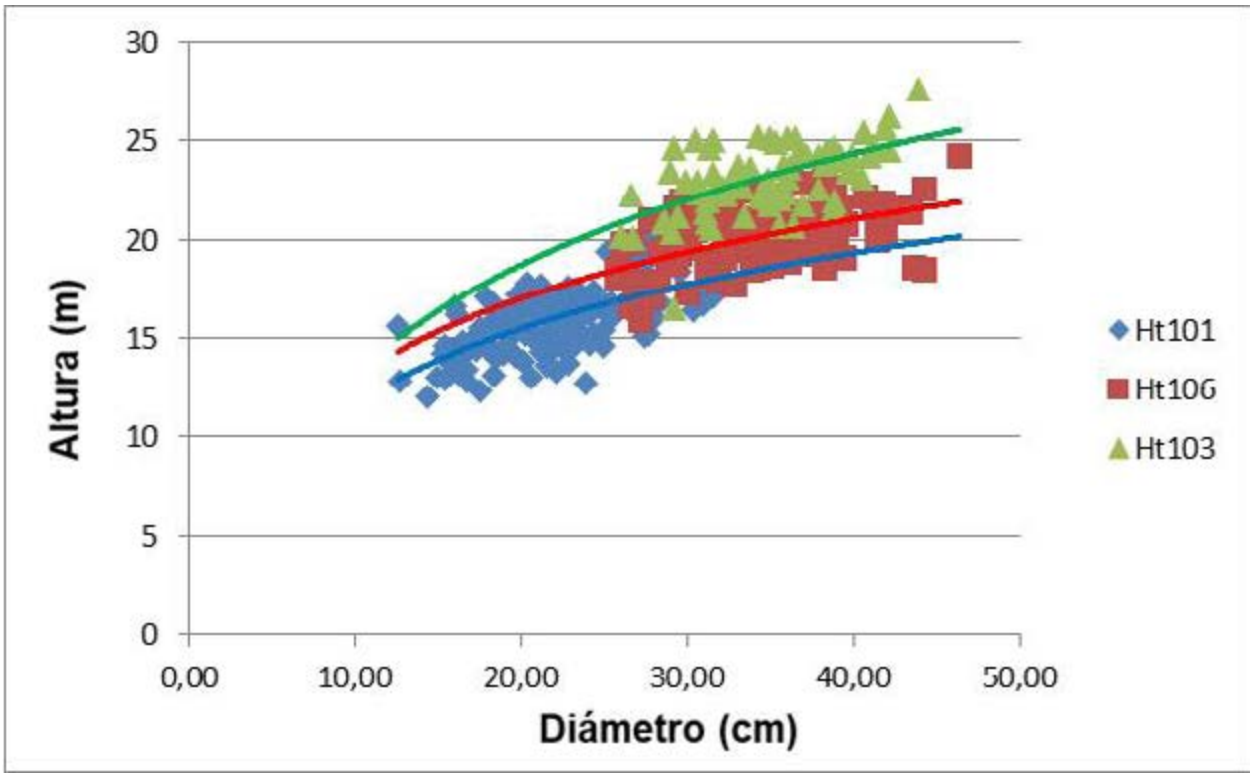


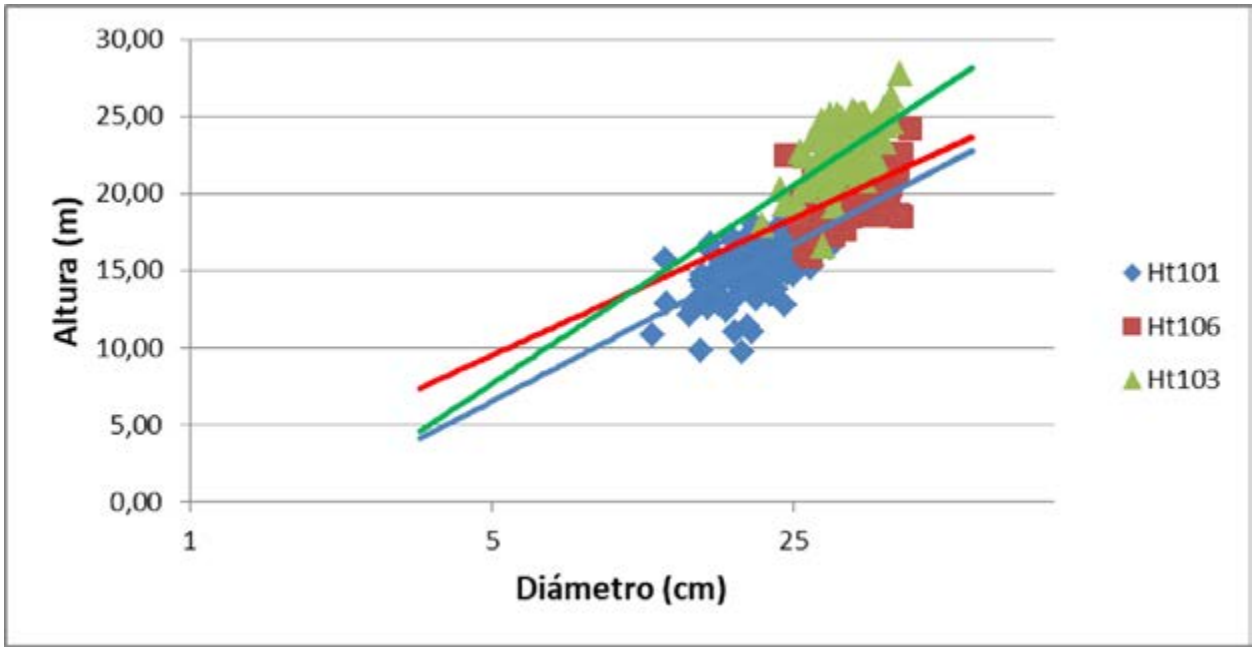


En el siguiente gráfico se aprecia la evolución del índice de esbeltez ho/do y un pequeño aumento del índice de esbeltez de los pies dominantes conforme aumenta la edad en las distintas parcelas de los proyectos REINFFORCE y POCTEFA Canopée: las 8 parcelas de pino laricio aparecen con trazo continuo y las 4 de abeto Douglas con discontinuo. Se han señalado en color rojo las 3 parcelas en las que no se han realizado nunca claras, pudiendo comprobar que existe un límite superior en los valores máximos de ho/do.

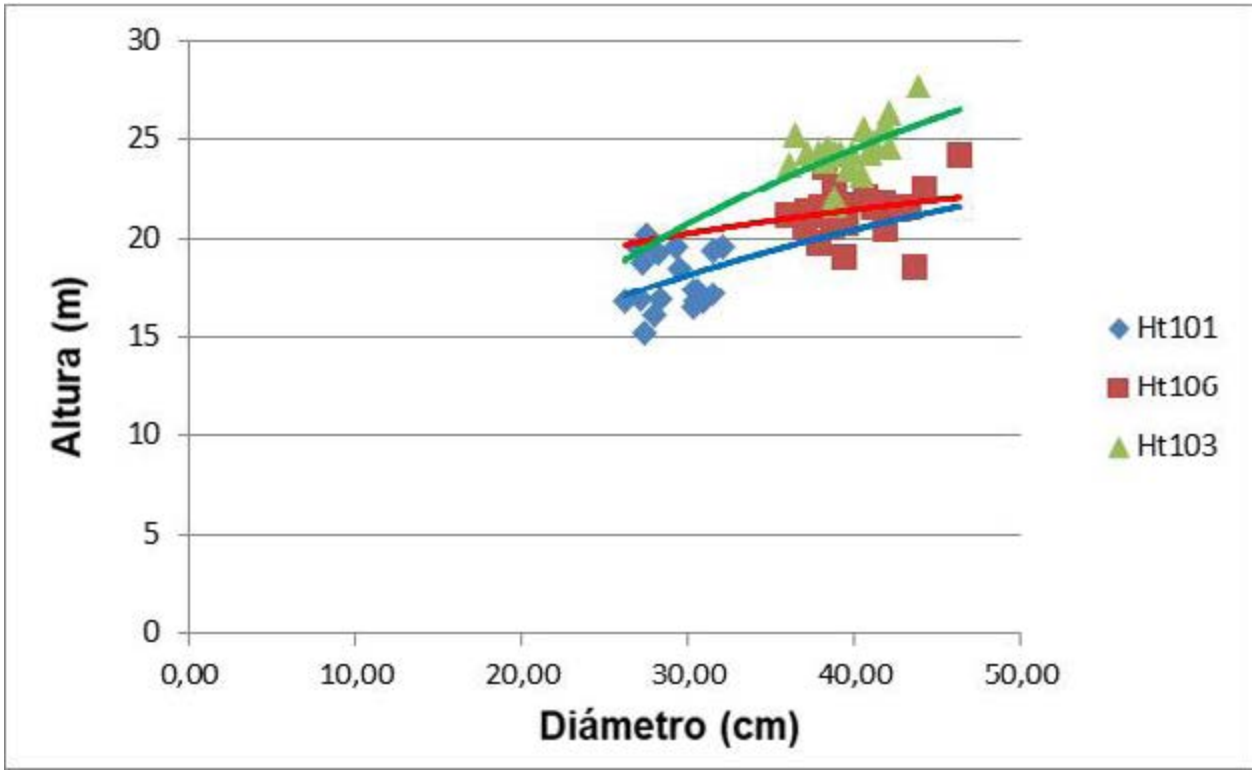


Para analizar la influencia de la calidad de estación, se pueden tomar sólo los pinos laricios de 3 parcelas de calidad variable: parcela 101 (clase YC12), parcela 106 (YC16) y parcela 103 (YC20). Tomando como ejemplo los datos de 2011, se comprueba que el desplazamiento de la curva de alturas como consecuencia de la edad es similar al que se refleja comparando un pinar de baja calidad (parcela 101) con otros de mejor productividad.





Y se vuelve a comprobar esa influencia de la calidad de estación en el desplazamiento de la curva si sólo se grafican los pinos dominantes de esas 3 parcelas.



3.- Variación a nivel regional: el pino pináster en el Norte

Una vez comprobadas las variaciones locales de las curvas de alturas dependiendo de varios factores, se plantea la comprobación de esas variaciones tomando conjuntos de datos más amplios, como puede ser el análisis regional de las miles de parcelas del IFN de *Pinus pinaster* atlánticas, remedidas en el Norte de España: Galicia, Principado de Asturias, Cantabria y País Vasco.

Galicia ha venido aportando más del 90% de las existencias totales de pino marítimo (o *Pinus pinaster* atlántico) en los distintos IFN, alcanzando en el IFN3 el máximo del 93,5% del total de existencias de pino atlántico.

Los distintos ciclos ya realizados del IFN español, responsabilidad histórica del Ministerio de Agricultura (MAPA) y hoy del Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO), han sido:

- Primer inventario forestal nacional (IFN1) 1966-1975 (trabajo de campo en Galicia realizado en 1972)
- Segundo inventario forestal nacional (IFN2) 1986-1996 (Galicia en 1987)
- Tercer inventario forestal nacional (IFN3) 1997-2007 (Galicia en 1998)
- Cuarto inventario forestal nacional (IFN4), comenzado en 2008 y que se encuentra actualmente en realización, pero que ya incluyó en su momento las regiones norteñas entre 2009 (Galicia) y 2012 (País Vasco)
- Inventario forestal nacional del Norte (IFNN) 2017-2018 (Galicia en 2018), también llamado IFEPNP (Inventario Forestal de Especies Productivas del Norte Peninsular)

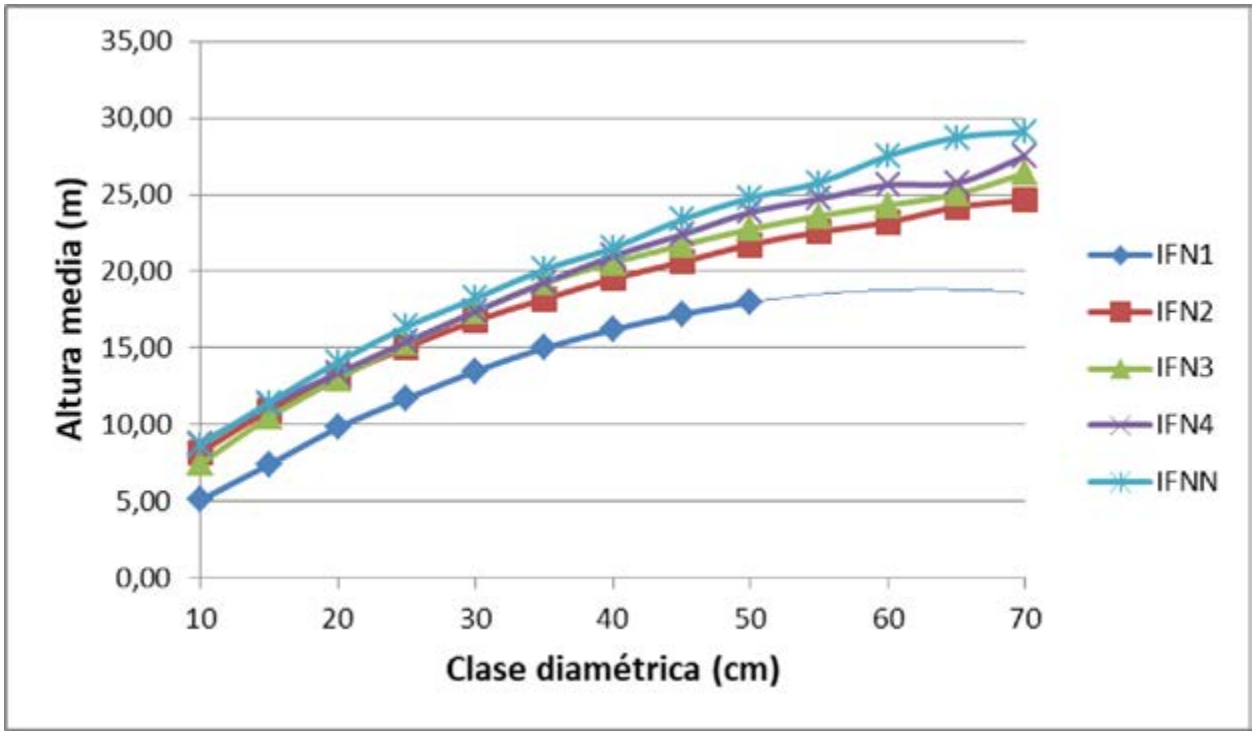
Hay que tener en cuenta que en el IFNN sólo han tenido en cuenta las masas productivas puras y mezclas entre ellas de la región biogeográfica atlántica, así que los datos globales de pino marítimo del IFNN no se pueden exactamente comparar con el del resto de inventarios, sino sólo como aproximación o a nivel de comparación de árboles o parcelas individuales. Como referencia, las estimaciones de superficie global dominada por pino marítimo ascendían a unas 475.000 ha en IFN4, mientras que en IFNN sólo alcanzan las 370.000 ha.

La evolución de las cifras totales de pino marítimo en el Norte ("pinares atlánticos") son las siguientes:

Inventario	PIES MAYORES	VCC (m^3)	IAVC (m^3/año)	Vmed (m^3/pie)
IFN1	417.020.392	47.211.176	7.192.599	0,113
IFN2	221.342.577	51.087.848	3.680.591	0,231
IFN3	202.321.385	52.314.445	3.491.770	0,259
IFN4	216.341.643	62.934.587	3.826.288	0,291
IFNN	162.686.122	48.812.236	2.877.743	0,300

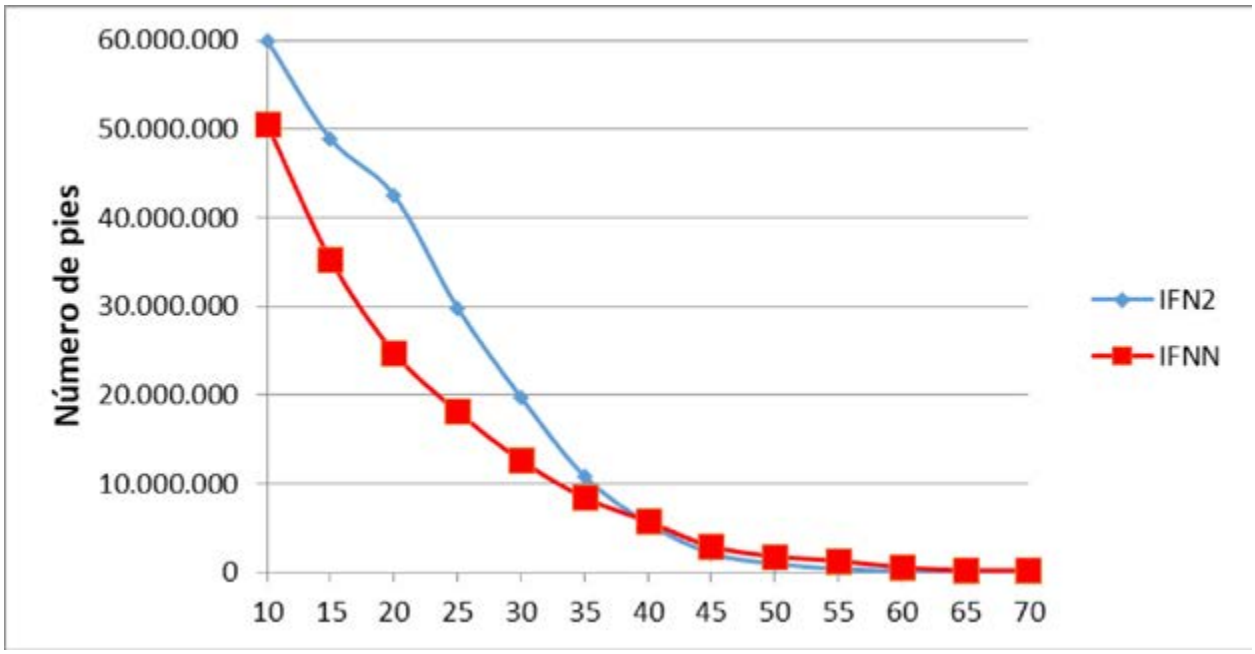
En teoría, el conjunto de esas miles de parcelas repartidas a lo largo de cientos de miles de hectáreas puede asimilarse a una gran masa irregular, de edad y calidad variada, pero la variabilidad que se refleja en el anterior cuadro induce a pensar que no es así. Diversos factores de difícil cuantificación en cuanto a su influencia relativa (mejora genética, abonado, cambios en la densidad inicial de plantación, alargamiento de los turnos de corta,…) se traducen en un considerable aumento de las alturas medias correspondientes a los pinos de las distintas clases diamétricas, con un desplazamiento de la curva de alturas a lo largo del tiempo como si todo un macizo fuera una gran masa regular coetánea que va envejeciendo.

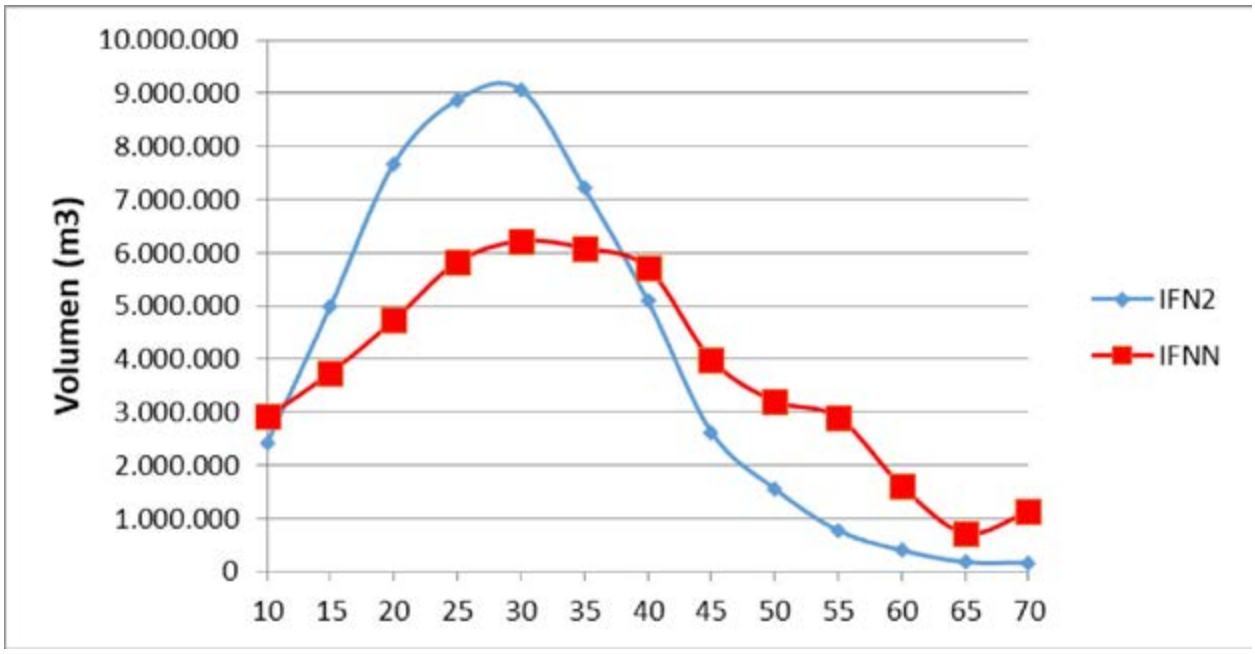
Altura media (m) de *Pinus pinaster*					
CD (cm)	IFN1	IFN2	IFN3	IFN4	IFNN
10	5,10	8,20	7,46	8,81	8,67
15	7,40	10,94	10,49	11,27	11,46
20	9,80	13,13	13,00	13,37	14,10
25	11,70	15,06	15,32	15,41	16,39
30	13,50	16,79	17,39	17,39	18,25
35	15,00	18,20	19,25	19,27	20,12
40	16,20	19,53	20,59	20,99	21,53
45	17,20	20,61	21,69	22,37	23,36
50	18,00	21,75	22,75	23,84	24,79
55		22,56	23,60	24,72	25,79
60		23,20	24,31	25,62	27,53
65		24,18	25,04	25,76	28,73
70		24,64	26,40	27,53	29,10
Alt.media(m)	9,11	14,97	15,94	16,59	17,48



Este fenómeno de desplazamiento de la curva de alturas a escala regional, basado en parcelas del IFN, ha sido también constatado en otros Territorios y tanto en coníferas plantadas como en bosques naturales[2].

La transformación de la estructura de estos pinares atlánticos ha sido drástica en estas últimas décadas. En los 30 años discurridos entre IFN2 y el último IFNN (2018) las clases diamétricas inferiores han disminuido en su cuantificación, lo contrario que las superiores.



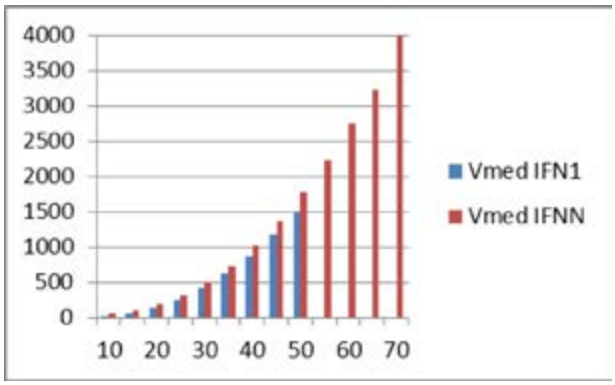


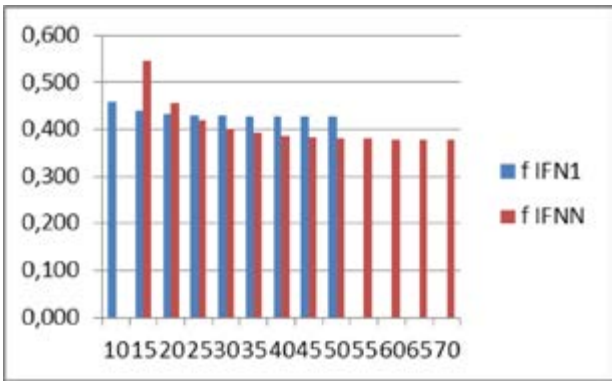
Se pueden deducir de estas curvas diversos hechos: paulatino envejecimiento del conjunto de estos pinares y menor regeneración natural y artificial, junto con un acentuado descenso en su crecimiento total.

Estos profundos cambios en la estructura de los pinares atlánticos también se reflejan en la forma media de los pinos marítimos inventariados en Galicia. El citado aumento de las alturas medias de esos pinos supone un mayor volumen medio (Vmed) y unos menores coeficientes mórficos de sus troncos (f=cociente entre el volumen total con corteza del tronco y el volumen de un cilindro cuya sección es la sección normal del árbol y cuya altura es h).

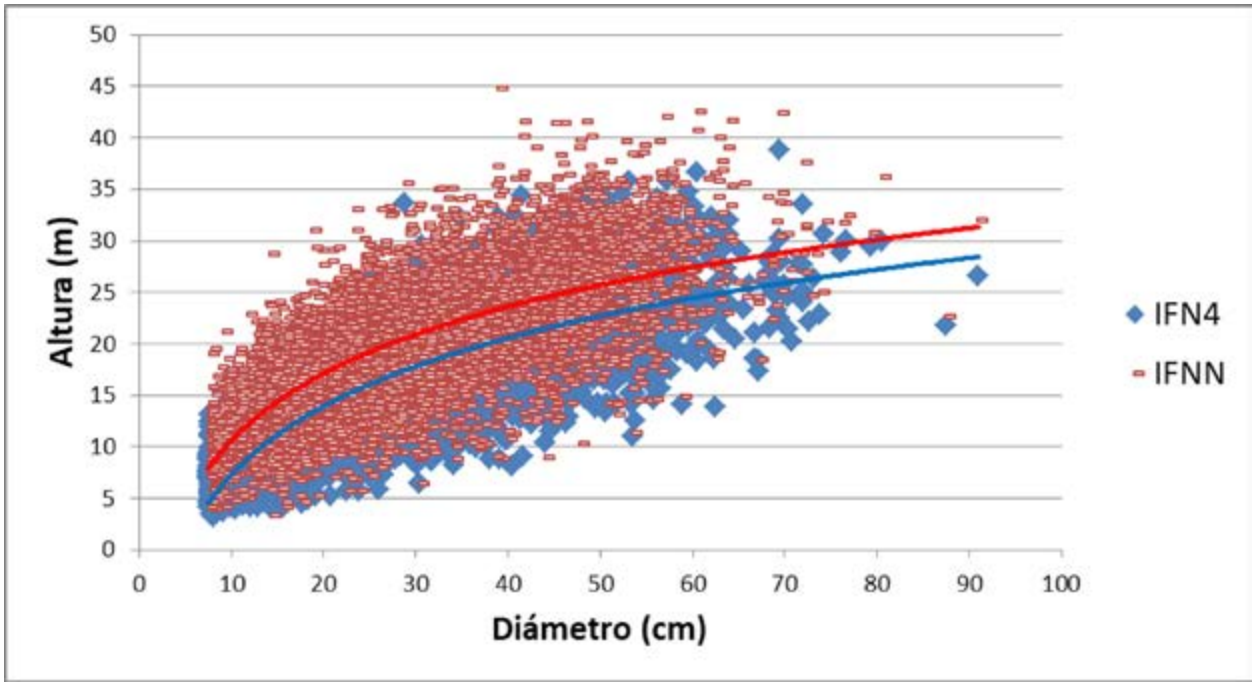
2 Variación de la relación altura-diámetro a lo largo del tiempo en un macizo forestal. Comunicación 6CFE01-480. SECF. Vitoria, junio 2013.

CD (cm)	Vmed (dm³/pie) IFN1	Vmed (dm³/pie) IFNN	Coef.morf. IFN1	Coef.morf. IFNN
10	18,40	57,61	0,459	
15	57,56	106,03	0,440	0,524
20	133,46	190,79	0,433	0,431
25	247,18	321,41	0,430	0,399
30	409,09	492,37	0,429	0,382
35	617,22	721,93	0,428	0,373
40	869,32	995,47	0,427	0,368
45	1.166,92	1.359,94	0,427	0,366
50	1.506,51	1.764,84	0,426	0,363
55		2.212,45		0,361
60		2.814,11		0,362
65		3.388,28		0,355
70		4.611,44		0,353





Los pinos marítimos remedidos en el último IFNN ya muestran ese desplazamiento de su curva de alturas en los 9 años transcurridos desde el IFN4.

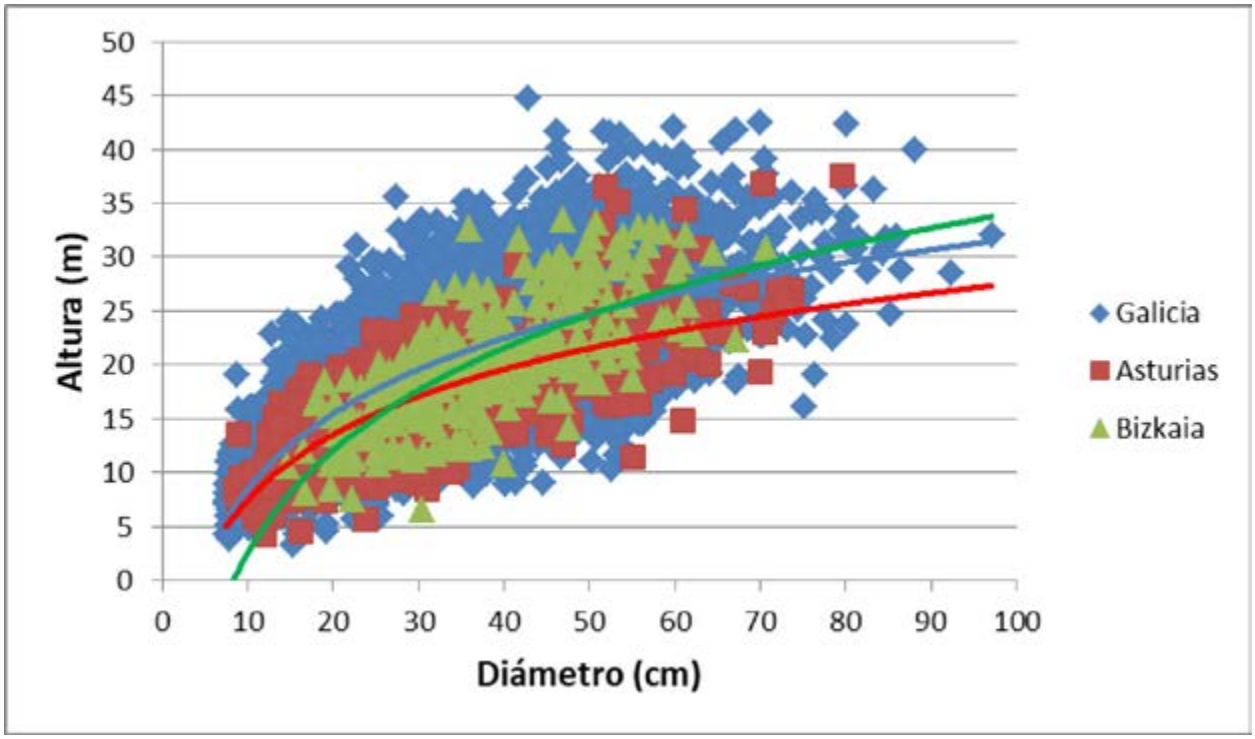


Estos 9.215 pinos marítimos remedidos entre los IFN4 e IFNN permiten estimar el crecimiento medio alcanzado en estos 9 años transcurridos en el periodo 2009-2018:

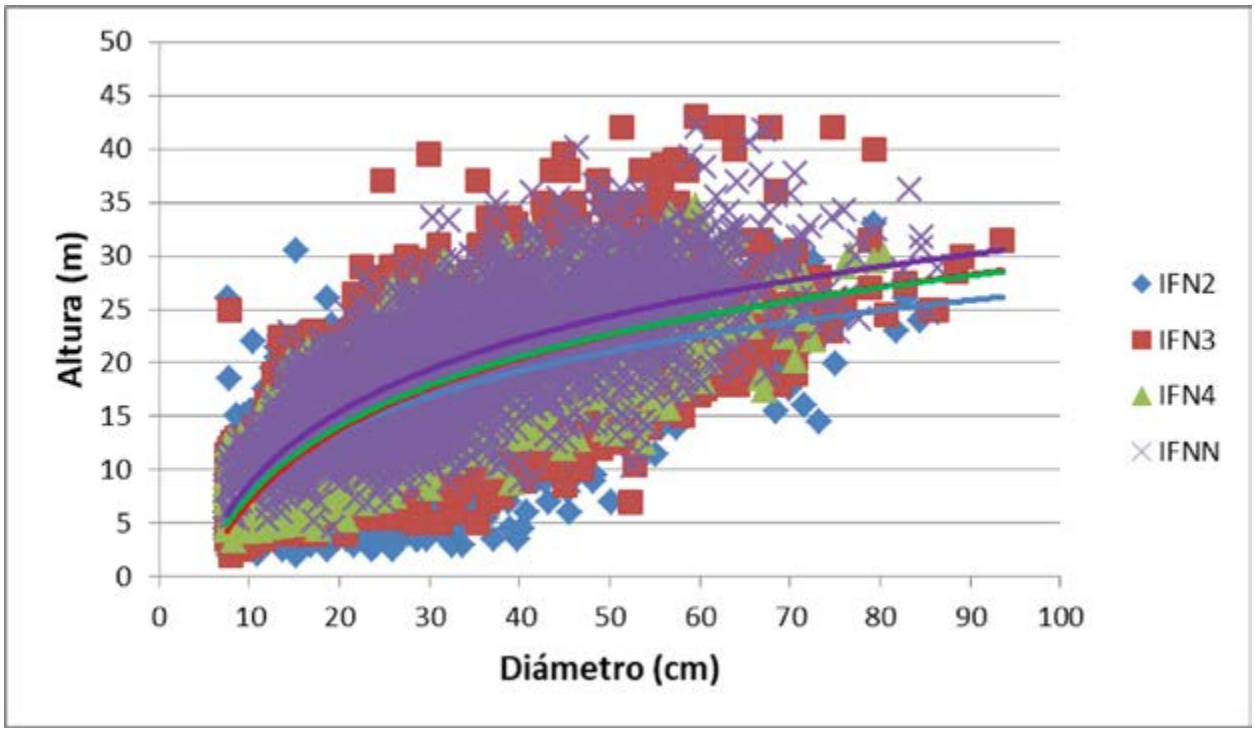
CD IFN4	Crec.diametral (cm/año)	Crec.altura (m/año)	Vmed IFN4 (m^3)	Vmed IFNN (m^3)	Crec. volumen (m^3/año)
10	0,396	0,305	0,060	0,106	0,005
15	0,491	0,378	0,108	0,205	0,011
20	0,531	0,390	0,189	0,346	0,017
25	0,541	0,352	0,311	0,525	0,024
30	0,535	0,328	0,488	0,760	0,030
35	0,532	0,315	0,716	1,053	0,038
40	0,535	0,322	1,019	1,447	0,048
45	0,539	0,329	1,352	1,879	0,058
50	0,546	0,318	1,764	2,386	0,069
55	0,613	0,359	2,184	3,001	0,091
60	0,763	0,366	2,658	3,772	0,124
65	0,786	0,574	2,972	4,482	0,168
70	0,850	0,390	4,155	5,737	0,176
Total	**0,527**	**0,348**	**0,596**	**0,882**	**0,032**

Provincia	Crec.diametral (cm/año)	Crec. altura (m/año)	Vmed IFN4 (m^3)	Vmed IFNN (m^3)	Crec.volumen (m^3/año)
Coruña, A	0,575	0,359	0,644	0,968	0,036
Gipuzkoa	0,469	0,274	0,324	0,470	0,016
Lugo	0,419	0,295	0,524	0,743	0,024
Ourense	0,475	0,311	0,455	0,655	0,022
Asturias	0,490	0,317	0,508	0,739	0,026
Pontevedra	0,586	0,423	0,713	1,092	0,042
Bizkaia	0,531	0,294	0,764	1,051	0,032

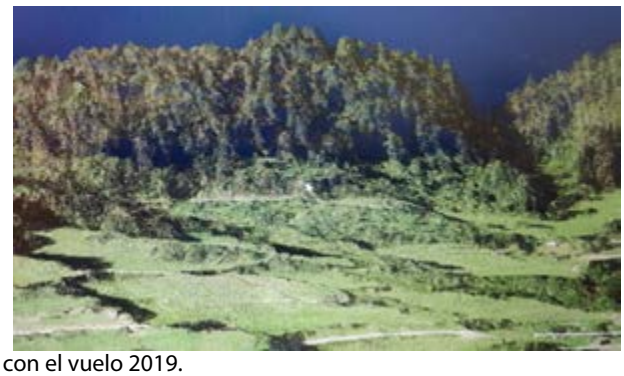
Las diferencias regionales en cuanto a las alturas de los pinos remedidos en el IFNN también pueden ser apreciadas gráficamente. Galicia y Bizkaia presentan unas mayores alturas medias en sus pinos frente a Asturias, lo que viene a indicar una dominancia de masas de mejor calidad o de mayor edad.



El análisis histórico del conjunto de todos los pinos marítimos de La Coruña (provincia 15) también permite apreciar el desplazamiento de la curva de alturas con la edad.



En el caso del País Vasco, se han estimado alturas dominantes y otros parámetros calculados para cada hectárea arbolada gracias al vuelo LiDAR 2017 del proyecto LIFE HEALTHY FOREST y se dispone de los cálculos realizados por fotogrametría en el marco del proyecto POCTEFA Canopée (2019). Los resultados obtenidos en cuanto a crecimiento medio anual de la altura dominante de las masas de pino marítimo en estado monte bravo, latizal y fustal muestran la influencia de factores físicos como la altitud, pendiente del terreno o profundidad media del suelo, además, obviamente, de la edad media.



Modelo de copas de los árboles (MDS) mediante fotogrametría con el vuelo 2019.

Clase de altitud (m)	Sup. (ha)	Volumen medio 2019 (m^3/ha)	Altura dominante 2019 (m)	Crec. medio 2017-2019 (m^3/ha-año)	Crec. medio Alt. domin. 2017-2019 (m/año)
0-200	1.943	247,28	20,57	10,08	0,59
200-400	2.316	247,77	20,70	9,53	0,58
400-600	1.195	240,12	20,20	8,13	0,49
600-800	544	161,47	14,72	5,10	0,29
>800	114	110,23	11,04	6,28	0,49
Total	**6.112**	**236,82**	**19,91**	**9,02**	**0,54**

Clase de pendiente (%)	Sup. (ha)	Volumen medio 2019 (m^3/ha)	Altura dominante 2019 (m)	Crec. medio 2017-2019 (m^3/ha-año)	Crec. medio Alt. domin. 2017-2019 (m/año)
0-20	676	210,87	18,12	7,67	0,41
20-30	1.595	239,54	20,08	8,93	0,54
30-50	2.915	239,99	20,13	9,17	0,56
>50	926	243,81	20,45	9,85	0,61

Clase de prof. suelo (%)	Sup. (ha)	Volumen medio 2019 (m^3/ha)	Altura dominante 2019 (m)	Crec. medio 2017-2019 (m^3/ha-año)	Crec. medio Alt. domin. 2017-2019 (m/año)
0-30	256	185,04	16,14	5,71	0,17
30-50	4.168	243,65	20,40	9,34	0,57
>50	1.689	228,75	19,36	8,82	0,53

Clase de edad (años)	Sup. (ha)	Volumen medio 2019 (m^3/ha)	Altura dominante 2019 (m)	Crec. medio 2017-2019 (m^3/ha-año)	Crec. medio Alt. domin. 2017-2019 (m/año)
1-10	354	106,58	10,79	9,49	0,68
21-30	1.368	180,89	16,29	9,29	0,61
31-40	1.522	241,76	20,40	8,42	0,49
41-50	932	286,08	23,20	8,08	0,41
51-60	545	323,30	25,48	8,74	0,48
61-70	257	326,14	25,61	10,53	0,56
71-80	314	325,91	25,63	10,12	0,53

Alturas (m) de los pinos próximos a las parcelas SiGCa-PIMA de Larrabetzu (Bizkaia) según la fotogrametría obtenida a partir del vuelo 2019.

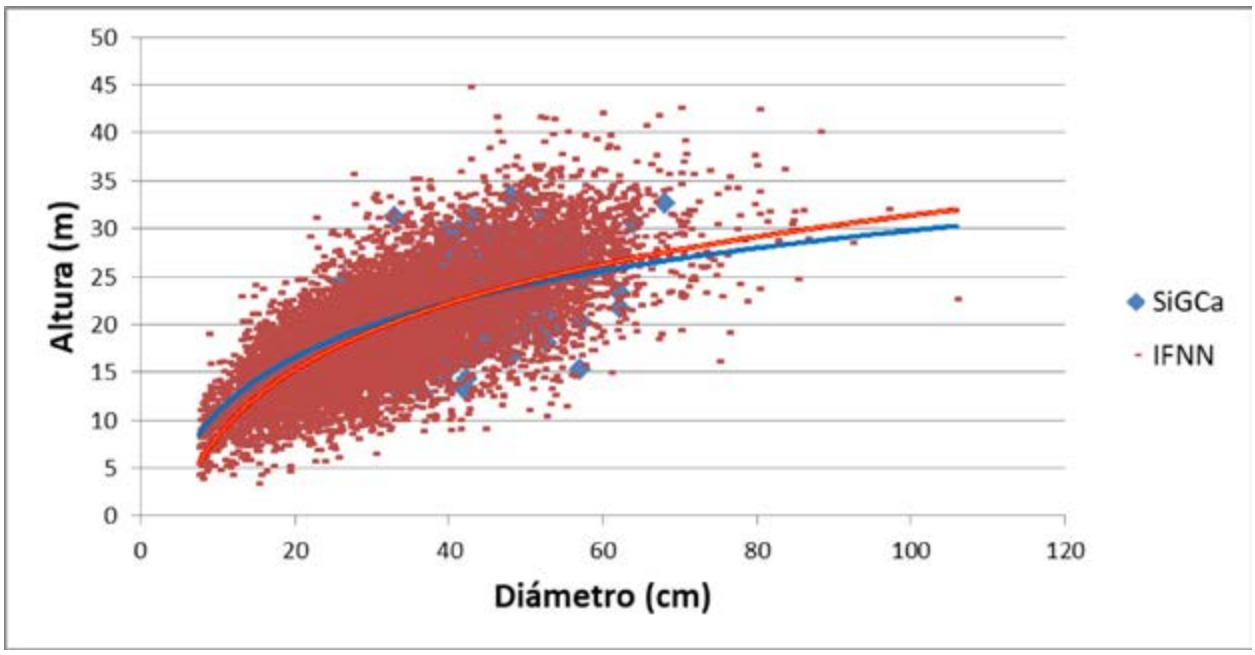
4.- Conclusiones

Como se ha ido comprobando, no parece aconsejable emplear una única ecuación invariable h=f(d) para un arbolado que evoluciona a lo largo del tiempo, siendo preferible tomarla como una fotografía de un momento concreto y en unas condiciones concretas.

Diversos factores (mejora genética, selvicultura, edad, especie, calidad de la estación o exposición a agentes de daños, bióticos o abióticos) se unen para acelerar esa evolución, de forma que se debe repetir periódicamente el correcto muestreo de diámetros-alturas.

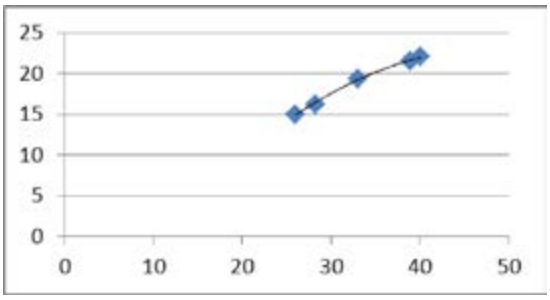
Es el caso del presente proyecto SiGCa-PIMA, hay que analizar si los pinos escogidos constituyen una muestra representativa del conjunto de Pinus pinaster del Norte de España, tanto en sus diámetros como en sus alturas. Para poder comparar, se dispone de los últimos inventarios IFN4 e IFNN, los cuales constituyen los trabajos más recientes disponibles y coincidentes con el área de trabajo del proyecto SiGCa-PIMA.

En la gráfica y en la tabla se aprecia que efectivamente la muestra escogida de pinos marítimos incluidos en el proyecto SiGCa-PIMA es representativa del total de pinos del Norte, ya que las curvas de diámetros-alturas de los 9.215 pinos remedidos entre el IFN4 y el IFNN y la de los 103 pinos incluidos en la muestra SiGCa-PIMA (ver capítulo 4) son coincidentes. Hay que recordar que esta muestra se centra en pinos adultos y cercanos a la corta final, mientras que los pinos remedidos en el IFN4 el IFNN muestra un cierto sesgo hacia pinos más adultos, ya que no incluye los pinos que aún no eran inventariables en el IFN4 ni los que han desaparecido (muertos, cortados o derribados por agentes climáticos) en este decenio.



Inventario	Muestra (árboles)	d (cm)	h (m)
Arboles tipo IFN4	13.270	26,00	15,00
Remedidos IFN4	9.215	28,27	16,25
Remedidos IFNN	9.215	33,01	19,39
Arb tipo País Vasco 2016	42	38,96	21,46
Arb tipo SiGCa-PIMA	103	40,11	22,08

Diámetro medio (X) vs. altura media (Y)



3.- INFLUENCIA DE LA SELVICULTURA EN EL PERFIL Y FORMA DE LOS ÁRBOLES PARA MADERA DE CALIDAD

Andrea Hevia Cabal
Centro Tecnológico Forestal y de la Madera (CETEMAS),
Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA),
UXAFORES, Universidad de Santiago de Compostela,
Dpto. Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva

El fuste y la estructura de la copa permiten realizar una primera diferenciación de la calidad de la madera que pueden producir los árboles (Letourneau y Andenmatten, 2013). Por un lado, el perfil y la forma del fuste, y por otro, la ramosidad, resultan determinantes en los defectos y singularidades de la madera, y con ello en su calidad. Dentro de la especie *Pinus pinaster* Aiton, algunos de los defectos y singularidades más comunes en su madera son los nudos (agrupados en verticilos), las bolsas de resina, la madera de compresión (relacionada con su baja rectitud) o el azulado de la albura (Vignote et al., 2000).

La arquitectura de la copa y la distribución de las ramas tienen un importante papel en la forma de los troncos (Echevarría, 1959), que a su vez estará relacionado con el rendimiento industrial de la madera (Briggs et al., 2012; François et al., 2012). En el género *Pinus*, las ramas se distribuyen de forma verticilada, siendo determinante su tamaño, distribución y frecuencia, el número de ramas, su ángulo de inserción, grosor y estado (viva o muerta) (Briggs et al., 2012). Todas estas características van a depender de factores internos, como la heredabilidad, y externos, como los factores ambientales o la gestión selvícola (Romano, 2002). Muchas de las masas de coníferas del norte de España, como *Pinus radiata* D. Don, presentan una gran ramosidad que repercute directamente en la calidad de su madera, dando lugar a un producto excesivamente nudoso, de menor calidad. En el caso del pino pinaster de la zona atlántica, sus ramas inferiores mueren rápidamente, permaneciendo mucho tiempo adheridas al tronco, dando lugar a nudos muertos o sueltos, que pueden llegar a desvalorizar enormemente su madera (Rodríguez-Soalleiro et al., 1997).

A

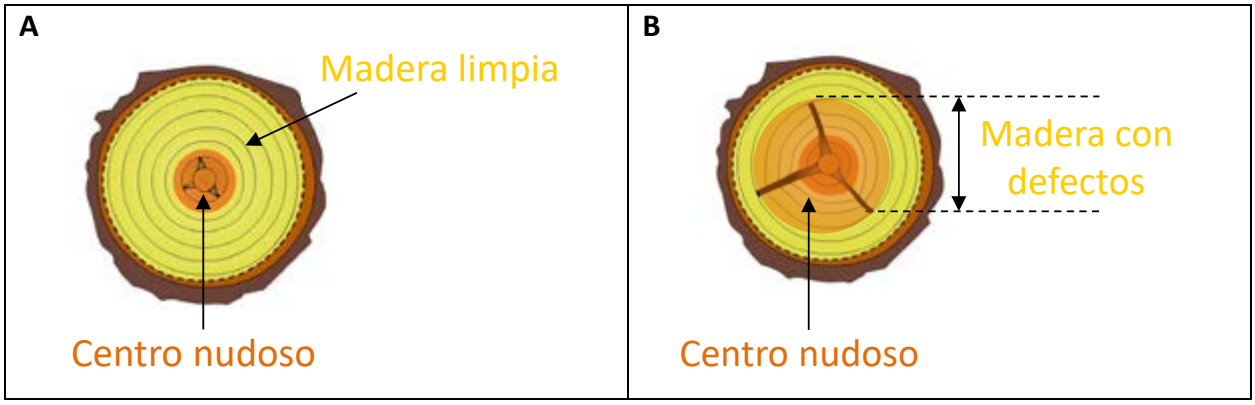
Distribución de las ramas en verticilos en (A) Pinus radiata, con gran ramosidad, que dará lugar a una madera de menor calidad si no se realiza una poda adecuada para minimizar el tamaño de las ramas; (B) Pinus pinaster, con ramas inferiores muertas (izquierda), que dará lugar a nudos muertos (medio) que pueden desprenderse originando huecos que deprecian el valor de la madera (derecha) (Hevia, 2013).

La presencia de nudos va a tener importantes inconvenientes en las propiedades físicas, mecánicas y estéticas de la madera (Vignote y Martínez, 2006), afectando a su resistencia (mayor pérdida a mayor tamaño del nudo) (Vignote y Jiménez, 2000; Guindos y Guaita, 2014) y clasificación visual para uso estructural (menor calidad y rechazo, a mayor nudosidad); Fernández-Golfín et al., 2008; Baño-Gómez, 2009).

Rotura de una viga de pino pinaster en la zona entre nudos de la pieza. Madera procedente de la primera clara realizada en las parcelas de experimentación selvícola de coníferas del Principado de Asturias[1] *(Hevia, 2013).*

La gestión forestal ha mostrado ser una herramienta capaz de corregir, en cierta medida, algunos de los defectos y singularidades de la madera, como la falta de rectitud o la nudosidad, utilizando planta mejorada genéticamente, o aplicando técnicas selvícolas específicas (Sanz et al., 2006; Briggs et al., 2012), principalmente podas y claras (Forrester et al., 2010; Hevia, 2013). Así, las podas permiten limitar los defectos asociados a las ramas en la zona central del fuste (conocido como "centro nudoso o knotty core"), a partir del cual se formará madera de mayor calidad, libre de nudos (Montagu et al., 2003). Este tratamiento, además, puede ayudar a disminuir la conicidad del tronco y, con ello, mejorar el rendimiento industrial (Letourneau y Andenmatten, 2013). Por su parte, las claras van a favorecer el crecimiento en grosor de los árboles que permanecen en pie, a los que se libera de competencia (Mäkinen et al., 2014; Moreno-Fernández et al., 2014), dando lugar a una mayor cantidad de madera. Por ello, una adecuada gestión selvícola, que combine podas y claras, va a permitir obtener una mayor cantidad de madera limpia (sin nudos), de mayor calidad y valor en el mercado (Hevia, 2013; Forrester et al., 2010; Moreno-Fernández et al., 2018).

1 Red de ensayos de podas y claras en masas de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* del Principado de Asturias, con el apoyo del Programa Forestal de Investigación del SERIDA, CETEMAS, el Servicio de Ordenación Forestal de la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias, el Instituto de Desarrollo Rural (IDR) y la Unidade de Xestión Ambiental e Forestal Sostible (UXAFORES) de la Universidad de Santiago de Compostela.



Corte transversal de un árbol: (A) podado en un momento adecuado, minimizando el tamaño del centro nudoso y obteniendo una cantidad de madera limpia (libre de nudos) que justifica la operación; (B) podado erróneamente (poda tardía), dando lugar a una madera con un alto porcentaje de defectos asociados a las ramas, de baja calidad, no justificando el gasto de la operación. Elaboración propia.

Para una adecuada gestión selvícola, enfocada a producir madera de calidad, resulta necesario definir intervenciones de podas y claras acordes a la especie y ámbito geográfico (Hevia, 2013). Además, estas intervenciones deberán seguir una serie de requisitos técnicos para garantizar una mayor eficiencia de las operaciones y maximizar la calidad del producto, sin afectar negativamente el crecimiento y desarrollo del árbol (Davel y Sepúlveda, 2000; Hevia, 2013). Algunos de los requisitos a tener en cuenta, son (Rodríguez-Soalleiro et al., 1997; Fernández-Manso y Sarmiento-Maillo, 2004; Barrio et al., 2009; Hevia, 2013):

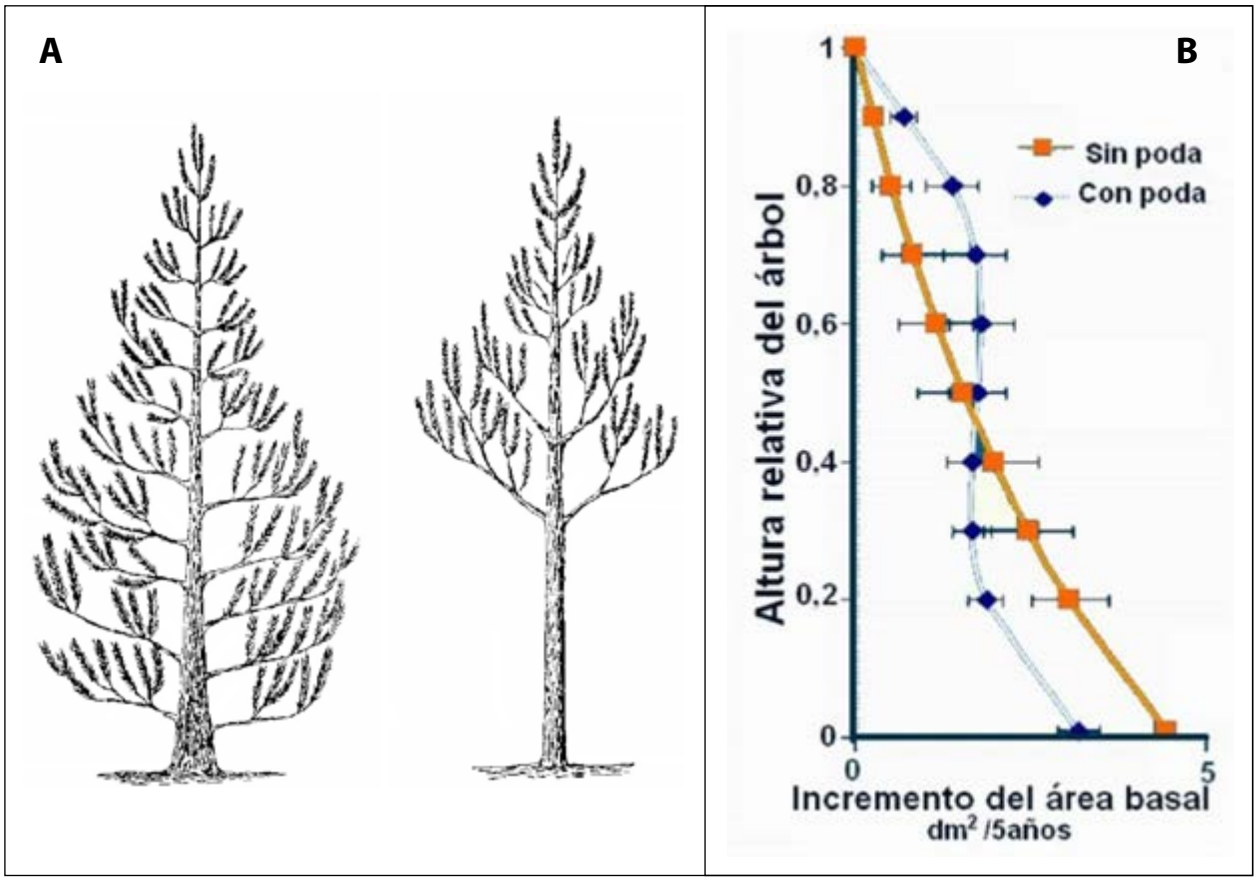
- Diámetro mínimo, que garantice alcanzar dimensiones suficientes al final del turno para obtener productos de calidad. Resulta determinante el tamaño del centro nudoso, que dependerá del diámetro sobre muñón y su posterior oclusión. Se necesitará la realización de podas (teniendo en cuenta dicho diámetro), combinadas con claras para favorecer el crecimiento de los árboles podados y obtener un mayor volumen de madera limpia. Solo interesará intervenir aquellos árboles que vayan a proporcionar madera gruesa apta para aserrío o incluso desenrollo. En árboles que vayan a dar madera de pequeñas dimensiones, con destinos industriales como la trituración, estas intervenciones no tendrán sentido económico.
- Altura de la intervención, en el caso de la poda, siendo más recomendable realizar podas en varias etapas (altura de poda), y tener en cuenta la altura total del árbol y longitud de copa viva, para minimizar el efecto negativo de eliminar parte de la copa verde, especialmente cuando se definen podas altas (de mayor intensidad).
- Técnica de poda, con un corte limpio de las ramas, favoreciendo el cierre de las heridas y la obtención de un menor tamaño del centro con defectos, maximizando la cantidad de madera libre de nudos.
- Fuste recto y cilíndrico, buscando la mejor forma de los árboles para alcanzar las mejores condiciones tecnológicas y un mayor rendimiento industrial. Se recomienda seleccionar árboles con mejor rectitud, y podar estos árboles para obtener fustes más cilíndricos.
- Fuste libre de ramas en las trozas basales para minimizar la proporción de nudos en la madera, mediante poda, y maximizar la cantidad de madera libre de nudos, mediante claras. La utilización de un material genético de menor ramosidad, y la poda de ramas vivas de menor tamaño, pueden ayudar a optimizar estas operaciones.
- Material homogéneo, procedente de árboles con crecimiento homogéneo (anillos regulares) dará un material menos nervioso y más estable en el secado. Árboles con buenos crecimientos y calidad de estación serán mejores candidatos para una mejor cicatrización de las heridas y respuesta del crecimiento tras la poda.
- Ausencia de defectos externos e internos, para minimizar los posibles defectos y singularidades que puedan limitar el uso de la madera. Las claras pueden ayudar a eliminar árboles que presenten algún tipo de defecto.
- Madera sana, procedente de árboles con buen estado sanitario, asegurando que la madera se encuentra en buenas condiciones. Las claras permiten asegurar este requisito, eliminando los árboles con problemas sanitarios, para el mejor crecimiento de los árboles sanos hasta el final del turno.

La consideración de todos estos factores ayudará a corregir los posibles defectos y singularidades en la madera que deprecian su valor, tratando de garantizar un producto de mayor valor añadido. Además, la optimización de la gestión selvícola, siguiendo estos requisitos, permitirá justificar el gasto que conlleva la realización de estas intervenciones, al maximizar la calidad del producto final (Hevia, 2013).

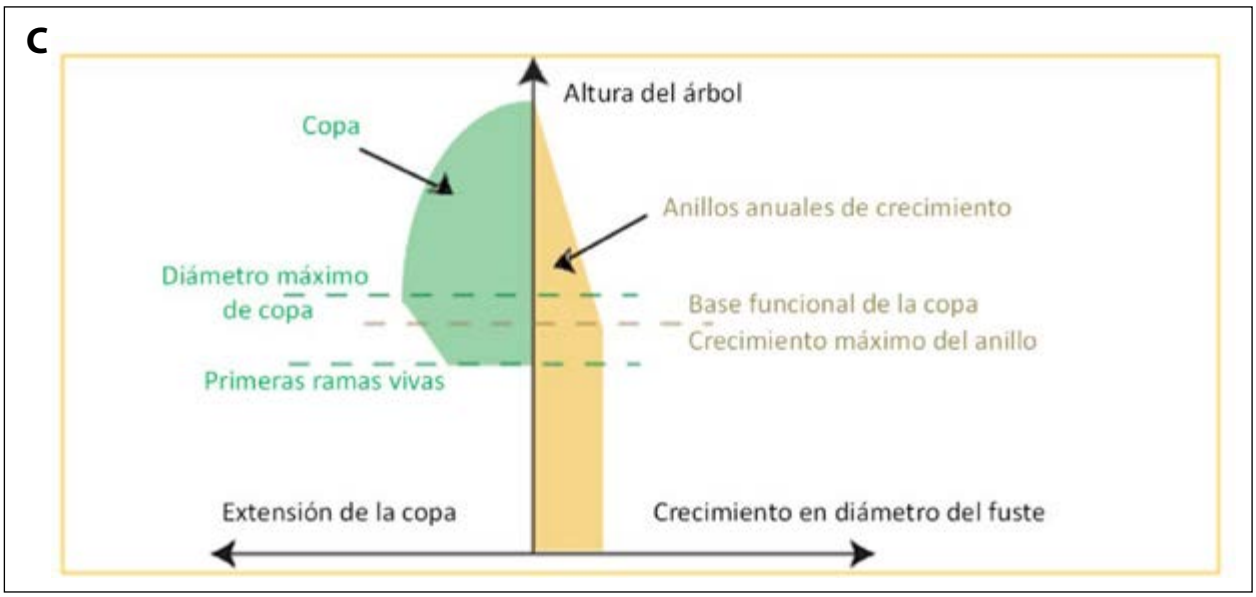
Intervenciones selvícolas de poda (baja, izquierda; alta, derecha), realizadas en varias fases, en función de la especie y características arbóreas de cada individuo, en una parcela de pino radiata[2] *(Hevia, 2013).*

1.- Influencia de la poda en el perfil y la forma de los árboles

El crecimiento en diámetro a lo largo del tronco ha demostrado ser proporcional a la cantidad de hojas existente sobre el fuste, con mayores anillos anuales de crecimiento en la zona que se encuentra bajo la copa (François et al., 2012). Cuando los árboles presentan ramas a lo largo del fuste, las formas resultan más cónicas, con un



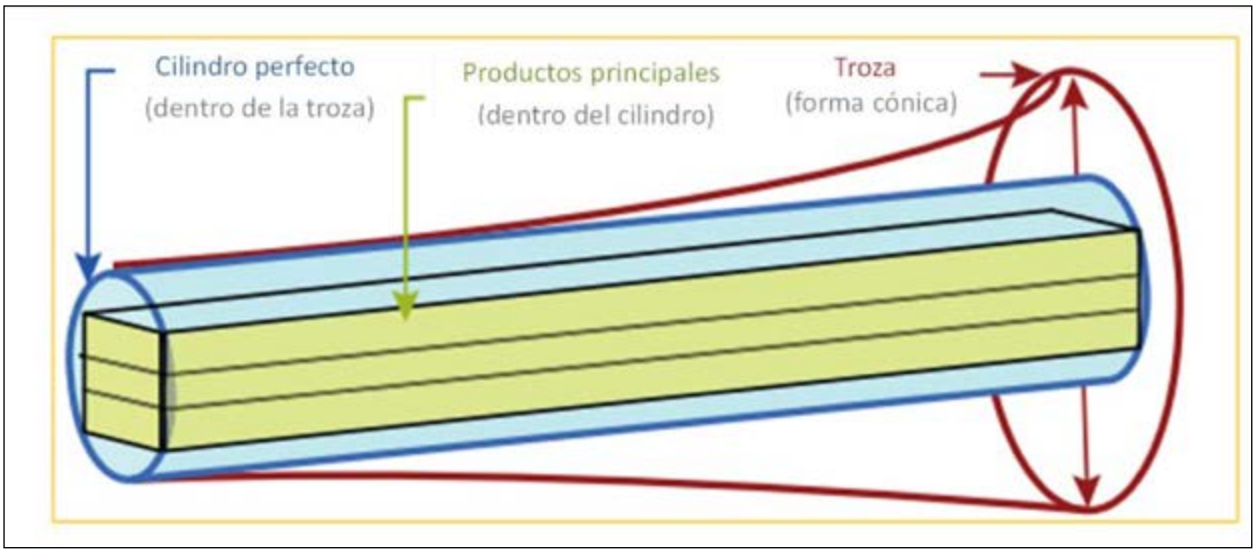
2 Red de ensayos de podas y claras en masas de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* del Principado de Asturias.



*Efecto de la poda en la forma del árbol: (A) Forma cónica del tronco en una conífera con ramas a lo largo del fuste (izquierda), y forma cilíndrica del tronco cuando se eliminan las ramas de la zona inferior (derecha) (Adaptado de Echevarría, 1959); (B) Efecto de la poda en la conicidad del árbol, con formas más cilíndricas tras la poda (**azul**) que en los* árboles no podados (***naranja***) *(Letourneau y Andenmatten, 2013); (C) Esquema de la Ley de Pressler, con mayor engrosamiento del tronco en la base funcional de la copa (Adaptado de François et al., 2012)).*

crecimiento repartido por todo el tronco, pero con mayor incremento en la parte inferior, en donde hay un mayor volumen de ramas laterales (Echevarría, 1959). La conicidad de la parte inferior, ha sido incluso definida como máxima por debajo de 1,30 m para diversas especies de coníferas, con la correspondiente pérdida de rendimiento en el posterior procesado de la madera (François et al., 2012).

Si los árboles son despojados de ramas en su parte inferior, mediante poda natural o artificial, el crecimiento del árbol pasa a concentrarse en su parte superior, cercana a la copa, dando lugar a formas más cilíndricas (p.e., Pressler, 1865; Echevarría, 1959; Larson, 1965). Además del tamaño y posición de la copa, existen otros factores que van a poder afectar el perfil y la forma de los árboles, como son el índice de sitio, la densidad de la masa, la edad de los árboles, o el material genético (Burkhart y Walton, 1985; Muhairwe, 1994; Pinkard y Beadle, 1998). También la realización de otras intervenciones selvícolas, como las claras puede afectar al fuste, al formar copas más amplias que pueden dar lugar a perfiles del tronco más cónicos (Gray, 1956; Valinger, 1992; Muhairwe et al., 1994), debido a un cambio en la distribución del crecimiento hacia las zonas basales del tronco (Larson, 1963; Myers, 1963). Sin embargo, el efecto de la selvicultura sobre la forma y perfil del fuste podría verse modificado, en algunos casos, a largo plazo (p.e. tras la poda, en Sutton y Crowe, 1975; Bredenkamp et al., 1980; Hevia, 2013; Hevia et al., 2016).



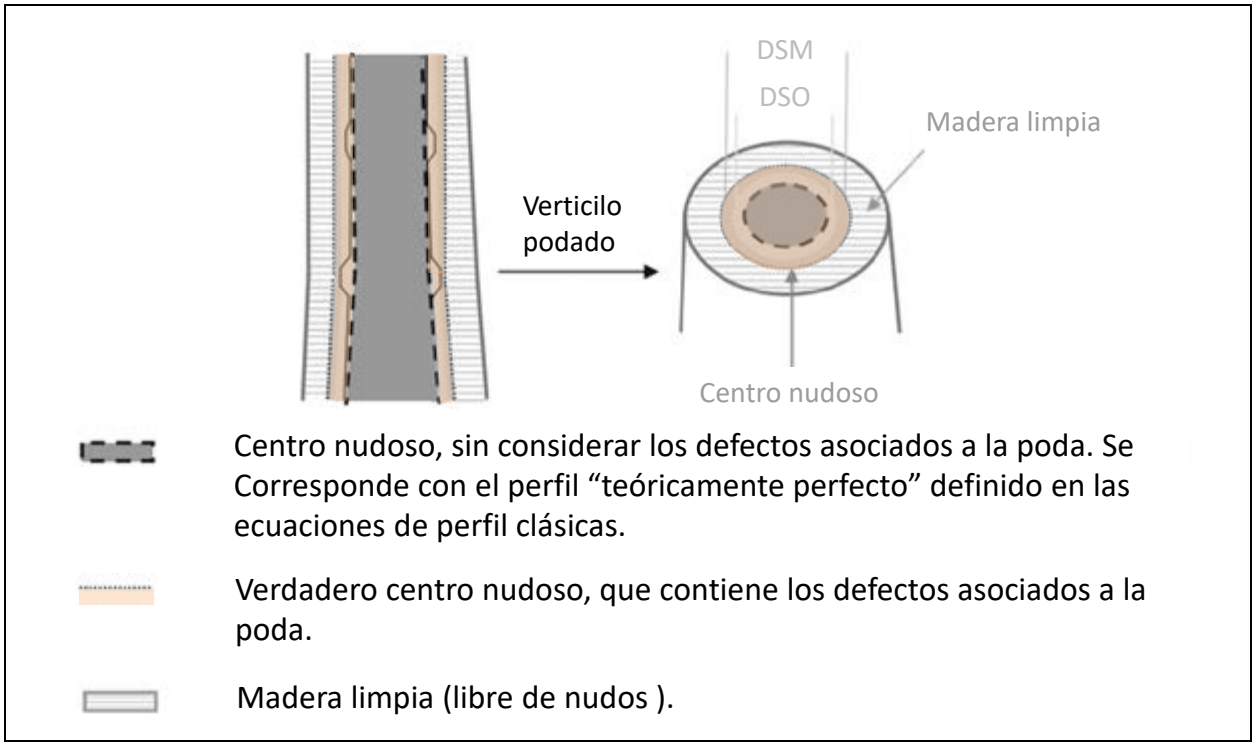
*Rendimiento teórico, con secciones aserradas (amarillo), para una troza de forma cilíndrica (**azul**) o cónica (**rojo**) (Adaptado de Chopard et al., 2012).*

Los fustes más cilíndricos van a resultar de mayor interés para la industria por su mejor rendimiento en el procesado y transformación (Letourneau y Andenmatten, 2013). Así, las trozas más cilíndricas y rectas podrán ser destinadas a industrias de primera transformación, de mayor valor añadido (p.e., aserrío, chapa) mientras que fustes más cónicos o con curvaturas serán destinados a industrias de menor valor (p.e., trituración). En el caso del pino pinaster, las trozas procedentes del tercio inferior del árbol son habitualmente más rectas que las trozas de los tercios medio y superior, que son habitualmente más torcidas y con forma más cónica, dando lugar a fustes de baja rectitud debido a un crecimiento desigual en diámetro (Vignote et al., 2000). Por ello, en esta especie resulta realmente importante el material genético utilizado y la correcta selección de los árboles a intervenir, así como la realización de una adecuada gestión selvícola, teniendo en cuenta los diferentes criterios técnicos mencionados, para obtener un producto con las mejores propiedades y valor final. De lo contrario, una incorrecta gestión, como una incorrecta técnica de poda (p.e. momento de intervención inadecuado, mal corte de la rama, alta intensidad de poda, árboles podados de bajo crecimiento, trozas podadas de baja rectitud, sitios de baja calidad) va a tener efectos contraproducentes en la producción y rentabilidad de la inversión (Chauchard y Olalde, 2005; Chauchard y Andenmatten, 2007).

A pesar de ser determinante en el destino final de las trozas, el estudio del perfil y la forma de los árboles y su relación con la gestión selvícola, y particularmente la poda, sigue siendo escaso; si bien este aspecto debería ser abordado para las principales especies maderables. Algunos trabajos realizados a día de hoy, se han centrado en especies de eucalipto (Eucalyptus nitens (Pinkard y Beadle, 1998), Eucalyptus grandis (Bredenkamp et al., 1980)), clones de chopo (Populus x euramericana; Rodríguez y Molina, 2003; Rodríguez, 2005), o coníferas como Picea abies, Abies alba (François et al., 2012), Pseudotsuga menziesii (O´Hara, 1991; De Montigny y Stearns-Smith, 2001; François et al., 2012), Pinus contorta (Muhairwe, 1994), Pinus pinaster (Hevia et al., 2016) y Pinus radiata (Sutton y Crowe, 1975; Lange, 1987; Chauchard y Olalde, 2005; Hevia, 2013; Hevia et al., 2016).

2.- Caracterización del perfil y la forma del centro nudoso de árboles podados

A pesar de la dificultad que implica explicar el tronco de un árbol mediante expresiones matemáticas, existen diversas metodologías que han sido utilizadas para describir la forma y perfil del fuste, como son (Diéguez-Aranda et al., 2003): los tipos dendrométricos, los coeficientes mórficos, los cocientes de forma y las funciones de perfil. De todas ellas, las funciones de perfil han sido las más utilizadas en el ámbito forestal (p.e. Biging, 1984; Kozak, 1988; Newnham, 1992; Riemer et al., 1995; Bi, 2000; Fang et al., 2000; Kozak, 2004), ganando cada vez más importancia como herramientas de gestión capaces de estimar características de los árboles, como (Prodan et al., 1997): (1) diámetros a cualquier altura del tronco; (2) altura del tronco a la que se localiza un cierto diámetro; y (3) volumen



*Perfil del fuste definido mediante funciones de perfil clásicas, sin considerar los defectos del tronco (**gris oscuro**) frente al perfil estimado mediante teniendo en cuenta los defectos para caracterizar el verdadero centro nudoso (**naranja**), a partir del cual se podrá determinar el verdadero volumen de madera de máxima calidad (libre de nudos). Adaptado de Hevia et al. (2016).*

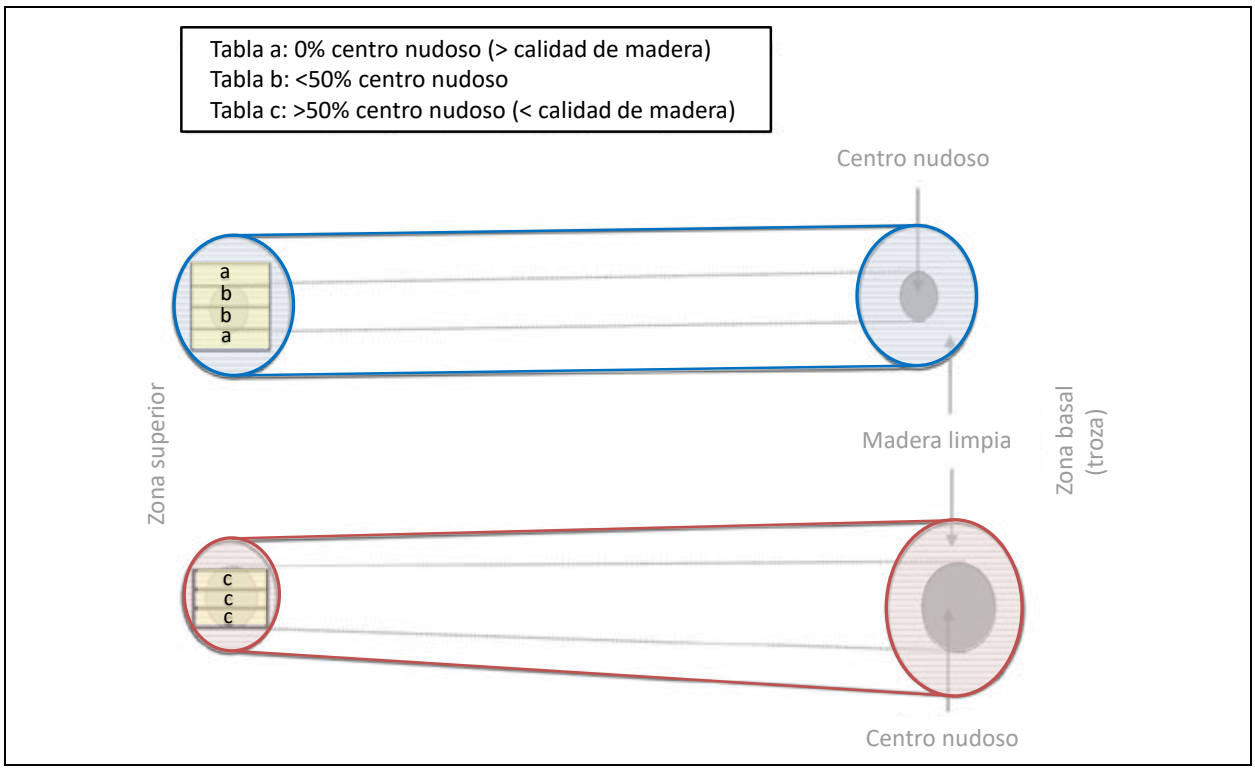
entre dos diámetros o alturas del tronco, o volumen hasta un diámetro o altura límite de utilización. Esta última característica destaca por permitir generar tarifas de cubicación con clasificación de productos.

En las funciones de perfil, el tronco es habitualmente caracterizado como un perfil "teóricamente perfecto", sin considerar los defectos contenidos en él, como pueden ser los relacionados con las ramas. Por ello, aplicar el método clásico de funciones de perfil no permite caracterizar el verdadero centro nudoso del árbol (que contiene los defectos), a partir del cual se formará la madera limpia, de máxima calidad, una vez finalizada la cicatrización de las heridas de poda (Hevia et al., 2016).

La correcta caracterización del centro nudoso a lo largo del fuste requiere determinar (Hevia et al., 2016):

- El diámetro sobre muñón (DSM), medido inmediatamente tras la poda (diámetro sobre verticilos para especies de coníferas).
- El diámetro sobre oclusión (DSO), medido tras el cierre (cicatrización) de las heridas de poda (diámetro sobre verticilos, en especies de coníferas).
- La altura a la que se encuentran estos diámetros (h_{DSM}, h_{DSO}).

Mayores valores de DSM y DSO darán lugar a una menor cantidad de madera libre de nudos, con un menor rendimiento industrial (Hevia et al., 2016) y un menor retorno de la inversión realizada con la operación de poda (Petruncio et al., 1997).



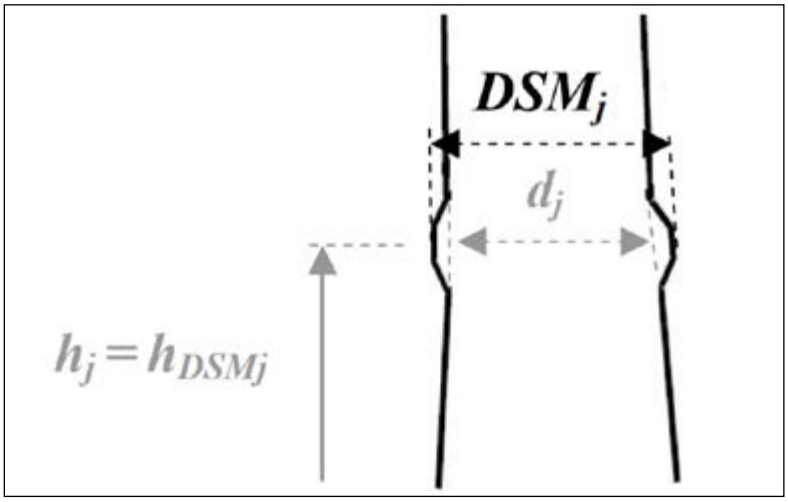
Rendimiento teórico, con secciones aserradas (amarillo): (A) para una troza de forma cilíndrica (azul), podada en un momento óptimo, minimizando el tamaño del centro nudoso (gris), dando lugar a productos de mayor valor (arriba); (B) para una troza cónica (rojo), con mayor tamaño del centro nudoso, y productos finales de menor valor. Adaptado de Hevia et al. (2016).

3.- Influencia de la poda en el perfil y la forma de los árboles. El caso del pino pinaster en el Principado de Asturias

Pinus pinaster es una de las coníferas de mayor interés e importancia económica del noroeste atlántico (Valdés et al., 2003). Sin embargo, la falta de gestión selvícola adecuada en esta especie, resultó durante muchos años en masas de baja productividad, muy por debajo de su potencial (Hevia, 2013). Por ello, y dada la capacidad productiva del territorio asturiano, así como el interés de esta conífera para producir madera de calidad, desde el Principado de Asturias se impulsó una línea de investigación centrada en la mejora de la gestión forestal de las masas de coníferas (*P. pinaster* y *P. radiata*) del arco atlántico. Para ello, en el invierno 2005-2006 fue instalada una red de parcelas permanentes, dentro del área de distribución de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias, con el fin de realizar estudios relacionados con la selvicultura como herramienta de trabajo para mejorar la calidad de la madera, y sanidad de las masas, prevenir la incidencia de incendios forestales, y maximizar la producción (Hevia,

2013). En este apartado, se mostrarán datos procedentes del seguimiento y remedición de estas parcelas. De toda la información procedente de la red experimental, se presentan a continuación algunos de los resultados de mayor interés sobre el efecto de la selvicultura en el perfil y forma de los árboles de *P. pinaster*.

Tal y como se comentó en el apartado anterior, los estudios existentes sobre el perfil de los árboles de las principales coníferas (p.e., para *P. pinaster* en el arco atlántico (Rojo et al., 2005; Arias-Rodil, 2009; Alegria, 2011)) se han basado generalmente en un fuste "teóricamente perfecto", sin defectos, no considerando tampoco, en su mayoría, el efecto de la selvicultura sobre la forma y perfil de los árboles. Por ello, en el marco de esta red experimental, se realizó una evaluación del perfil y la forma de los árboles incluyendo los defectos del tronco y la influencia de los tratamientos selvícolas, en este caso, la poda (Hevia, 2013; Hevia et al., 2016).



Esquema del perfil del fuste de un árbol podado, mostrando la diferencia entre el diámetro estimado con una función de perfil mediante el método clásico (d_j, sin considerar defectos), y el diámetro real sobre muñón (DSM_j) a la altura h_j (h_j=$hDSM_j$) del verticilo podado (j). Adaptado de Andenmatten et al. (2002).

Los datos habitualmente utilizados para la caracterización del fuste proceden de métodos destructivos. Sin embargo, para la caracterización de árboles podados, que deben persistir en la masa hasta la corta final, resulta necesaria la caracterización de árboles en pie. Para ello, se debe recurrir a métodos no destructivos (Hevia, 2013). Con este enfoque, en las parcelas de la red, fueron seleccionados árboles con buenas características para producir madera de calidad (sanos, con buena forma y rectitud), a los que se midió, inmediatamente tras la poda, variables clásicas de tamaño (diámetro normal (D), altura total (H)) junto con diámetros sobre muñón (DSM_j, diámetros sobre los verticilos podados) a diferentes alturas (h_{DSMj}). Estas últimas mediciones fueron llevadas a cabo con Criterion RD1000 y laser True Pulse (no destructivos) en inventarios consecutivos para asegurar un seguimiento del cierre de las heridas y la correcta caracterización de los valores de DSM y DSO, necesarios para estimar el perfil y la forma del centro nudoso (Hevia, 2013).

Medición de variables dendrométricas en las parcelas de ensayo[3]*, incluyendo métodos no destructivos para la caracterización de la forma y perfil del centro nudoso (con defectos), con medición de diámetros a diferentes alturas en árboles podados* (árboles en pie*).*

Para el perfil del centro nudoso, se planteó definir: (1) una ecuación de perfil nueva, a partir de los datos tomados en campo, considerando los defectos; (2) una ecuación que permitiera estimar el perfil con defectos a partir del perfil sin defectos obtenido con las ecuaciones existentes, definidas mediante el método clásico, para la especie y región de estudio. La función de perfil utilizada, del tipo $DSM_j=f(h_{DSMj},H,D)$ tuvo en cuenta la intensidad de poda de cada árbol individual, mediante la altura de copa relativa tras el tratamiento (hcr), así como la especie forestal (en este caso, *Pinus pinaster*). La forma del centro nudoso fue evaluada mediante un coeficiente de forma, basado en la ecuación de Newnham (1988), $Y^k=X$, relacionando diámetros relativos (Y) con las alturas relativas de esos diámetros (X). Esta ecuación fue modificada de acuerdo al tipo de datos recogidos en esta red de ensayos, siendo $k=f(DSM_j,h_{DSMj},H,D)$.

La función de perfil propuesta, basada en la ecuación de Biging (1984), logró explicar más del 98% de la variabilidad observada en el DSM_j, no mostrando diferencias significativas por especie. Por otro lado, la ecuación estimada a partir de la función de perfil definida previamente para *P. pinaster* en Asturias, mediante el método clásico (Arias-Rodil, 2009), logró explicar un 97% de la variabilidad del DSM_j (Hevia, 2013; Hevia et al., 2016).

El coeficiente de forma fue estimado de forma individual para cada árbol e inventario, teniendo en cuenta la especie y la intensidad del tratamiento. Nuevamente la especie forestal no mostró diferencias significativas, pero sí se observaron diferencias entre tratamientos, con mayor influencia para la poda de mayor intensidad, que dio lugar a formas más cilíndricas del fuste (centro nudoso). Estos resultados confirmaron el mayor crecimiento de la parte superior del tronco tras la poda. El efecto de la poda en la forma, resultó significativo hasta 3 años después del tratamiento. Sin embargo, este efecto dejó de ser significativo a partir del 4º año tras la poda. Por ello, sería recomendable evaluar nuevamente la forma de los árboles antes del apeo para su uso industrial.

Los resultados de esta red experimental confirmaron el efecto positivo de la poda en la calidad de la madera. Además, se pudo resaltar la importancia de considerar los defectos contenidos en el tronco (su perfil y su forma) para evaluar el verdadero valor de la madera, desde el árbol en pie, utilizando métodos no destructivos. Apenas existen a día de hoy estudios similares bajo condiciones atlánticas, siendo de gran interés ampliar esta línea de trabajo para el mayor conocimiento del efecto de la selvicultura sobre las propiedades y calidad de la madera de las especies maderables más relevantes de nuestro territorio nacional.

3 Red de ensayos de podas y claras en masas de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* del Principado de Asturias.

4.- Agradecimientos

Al Programa Forestal de Investigación del Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario del Principado de Asturias (SERIDA), el Centro Tecnológico Forestal y de la madera de Asturias (CETEMAS), el Servicio de Ordenación Forestal de la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias, el Instituto de Desarrollo Rural (IDR) y la Unidad de Gestión Ambiental y Forestal Sostenible (UXAFORES) por su apoyo en el establecimiento y seguimiento de la red experimental de selvicultura del Principado de Asturias.

Una parte importante de este capítulo se basa en la tesis doctoral de A. Hevia, agradeciendo a los directores de tesis, Juan Gabriel Álvarez González y Juan Pedro Majada Guijo, su contribución en este trabajo. A Roque Julio Rodríguez Soalleiro, que ayudó en el diseño e inicio de esta línea de investigación. A los compañeros del SERIDA, CETEMAS, Universidad de Oviedo y Universidad de Santiago de Compostela (UXAFORES), que colaboraron en los trabajos de campo y/o laboratorio. Gracias al Ministerio de Educación y Ciencia por la financiación de A. Hevia mediante una beca predoctoral del Programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU-MEC, AP2006-03890; BOE 109, 07/05/2007).

5.- Referencias

Alegria, C. 2011. Modelling merchantable volumes for uneven aged maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) stands establi-shed by natural regeneration in the central Portugal. Annals of Forest Research, 54(2): 197-214.

Andenmatten, E.; Fassola, H.; Letourneau, F.; Ferrere, P. y Crechi, E. 2002. Predicción de diámetro sobre muñones en *Pinus taeda* L. origen Marion, mediante curvas de perfil de fuste. INTA Argentina. RIA, 31(3): 103-118.

Arias-Rodil, M. 2009. Desarrollo de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus pinaster* en Asturias. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 34 pp.

Baño-Gómez, V. 2009. Análisis mediante simulación numérica de la pérdida de resistencia de la madera por la presencia de nudos. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 188 pp.

Barrio, M., Castedo, F., Majada, J. y Hevia, A. 2009. Manual básico de la poda y formación de los árboles forestales. Editorial Mundi-Prensa. Madrid. 255 pp. ISBN: 9788484762867.

Bi, H. 2000. Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalyptus. Forest Science, 46(3): 397-409.

Biging, G.S. 1984. Taper equations for second growth mixed conifers of Northern California. Forest Science, 30: 1103-1117.

Bredenkamp, B.V., Malan, F.S. y Conradie, W.E. 1980. Some effects of pruning on growth and timber quality of *Eucalyptus grandis* in Zululand. South African Forestry Journal, 114: 29-34.

Briggs, D., Jayawickrama, K y Lowell, E. 2012. What do we know about the effects of siviculture and genetics on branches/knots?: Douglas-fir as a case study. En: Final program, proceedings and abstracts book of IUFRO "Forest Products". Conference, Division 5. Estoril Congress Centre, Lisbon (Portugal), 8-13 July 2012.

Burkhart, H.E. y Walton, S.B. 1985. Incorporating crown ratio into taper equations for loblolly pine trees. Forest Science, 31: 478-484.

Chauchard, D.L. y Andenmatten, E. 2007. Simulación de la poda para la predicción de madera limpia. Acta Jornadas Eco-Forestar, CIEFAP. Esquel, Argentina. 6 pp.

Chauchard, L.M. y Olalde, M. 2005. Poda del pino radiata en Euskadi. Diputación Foral de Guipuzkoa. 15 pp.

Chopard, B., Deleuze, C., François, D., Collet, R., Boudey, A., Moureaux, T., Fenart, P., Lanvin, J.D. 2012. Comprendre et objectiver les attentes des scieurs résineux industriels. RDV techniques hors-série - ONF 6(2012): 13-21.

Davel, M. y Sepúlveda, E. 2000. Poda en plantaciones de Pino Oregón. CIEFAP-Patagonia-Forestal-Año VI(1): 7-10.

De Montigny, L. y Stearns-Smith, S. 2001. Thinning and pruning coastal Douglas-fir near Chilliwack, B.C.: 8 years results. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch, Extension Note, 56. 8 pp.

Echevarría, I. 1959. Pinares del Norte. La nudosidad de la madera y modo de evitarla. Manuales técnicos. Ministerio de Agricultura. Madrid. 62 pp.

Fang, Z., Borders, B.E. y Bailey, R.L. 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. Forest Science, 46: 1-12.

Fernández-Golfín, J.I., Conde, M., Hermoso, E. y Carballo, J. 2008. Madera de pino radiata: conclusiones tras 25 años de trabajos. Revista AITIM (Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera). Boletín de Información Técnica, 252 (marzo-abril). 5 pp.

Fernández-Manso, A. y Sarmiento-Maillo, A. (coords.). 2004. El pino radiata (*Pinus radiata*): Manual de gestión forestal sostenible. Junta de Castilla y León (Serie divulgativa). 62 pp.

Forrester, D.I., Medhurst, J.L., Wood, M., Beadle, C.L., Valencia, J.C., 2010. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from *Eucalyptus* plantations: an Australian perspective. Forest Ecology and Management, 259(2010): 1819-1835.

François, D., Chopard, B., Deleuze, C., Lanvin, J.D., Fenart, P. 2012. Premiers enseignements pour le sylviculteur de résineux et perspectives pour la R&D. RDV techniques hors-série - ONF 6(2012): 21-30.

Gray, H.R. 1956. The form and taper of forest tree stems. Imperial Forest Institute, Oxford. Paper 32. 78 pp.

Guindos, P. y Guaita, M. 2014. The analytical influence of all types of knots on bending. Wood Science and Technology, 48(3): 533-552.

Hevia, A. 2013. Influence of pruning on the development of *Pinus radiata* D. Don and *Pinus pinaster* Aiton stands in Asturias. Tesis Doctoral, University of Santiago de Compostela. 503 pp.

Hevia, A., Álvarez-González, J.G., Majada, J. 2016. Effects of pruning on knotty core taper and form of *Pinus radiata* and *Pinus pinaster*. European Journal of Wood and Wood Products, 74(5): 741-750. https://doi.org/10.1007/s00107-016-1019-0.

Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. Canadian Journal of Forest Research, 18(11): 1363-1368.

Kozak, A. 2004. My last words on taper equations. Forestry Chronicle, 80(4): 507-515.

Lange, P.W.; De Ronde, C. y Bredenkamp, B.V. 1987. The effects of different intensities of pruning on the growth of *Pinus radiata* in South Africa. South African Forestry Journal, 143: 30-36.

Larson, P.R. 1963. Stem form development of forest trees. Forest Science Monograph, 5: 1-42.

Larson, P.R. 1965. Stem form of young larix as influenced by wind and pruning of forest trees. Forest Science, 11(4): 412-424.

Letourneau F. y Andenmatten E. 2013. Aportes de la silvicultura a la calidad de madera en Pino ponderosa. Conference: Proceso, producto y gestión de la madera de pino ponderosa. Argentina, abril 2013.

Mäkinen, H. y Hynynen, J. 2014. Wood density and tracheid properties of Scots pine: Responses to repeated fertilization and timing of the first commercial thinning. Forestry, 87: 437-447.

Meyers, S.P. 1995. Profit potencial from pruning: A look from down under. The economics of comercial pruning and certification in New Zealand. 14 pp.

Montagu, K., Kearney, D. y Smith, G. 2003. Pruning Eucalypts. The biology and silviculture of clear wood production in planted eucalypts. A Report for the RIRDC/Land & Water Australia/FWPRDC Joint Venture Agroforestry Program. RIRDC Publication No 02/152. RIRDC Project No PN.99.2011.

Moreno-Fernández, D., Hevia, A., Majada, J. y Cañellas, I. 2018. Do Common Silvicultural Treatments Affect Wood Density of Mediterranean Montane Pines? Forests, 9(2): 80. https://doi.org/10.3390/f9020080

Moreno-Fernández, D., Sánchez-González, M., Álvarez-González, J.G., Hevia, A., Majada, J.P., Cañellas, I. y Gea-Izquierdo, G. 2014. Response to the interaction of thinning and pruning of pine species in Mediterranean mountains. European Journal of Forest Research, 133: 833-843.

Muhairwe, C.K. 1994. Tree form and taper variation over time for interior lodgepole pine. Canadian Journal of Forest Research, 24: 1904-1913.

Muhairwe, C., Lemay, V. y Kozak, A. 1994. Effects of adding tree, stand, and site variables to Kozak´s variable-exponent taper equation. Canadian Journal of Forest Research, 24: 252-25.

Myers, C.A. 1963. Vertical distribution of annual increment in thinned ponderosa pine. Forest Science, 9: 394-404.

Newnham, R. 1988. A variable-form taper function. Information Report PI-X-83. Petawawa National Forest Institute. Forestry Canada. 33 pp.

Newnham, R. 1992. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. Canadian Journal of Forest Research, 22: 210-223.

O'Hara, K.L. 1991. A biological justification for pruning in coastal Douglas-fir stands. Western Journal of Applied Forestry, 6(3): 59-63.

Petruncio, M.; Briggs, D. y Barbour, R.J. 1997. Predicting pruned branch stub occlusion in young, coastal Douglas-fir. Canadian Journal of Forest Research, 27: 1074-1082.

Pinkard, E.A. y Beadle, C.L. 1998. Effects of green pruning on growth and stem shape of *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden. New Forests, 15: 107-126.

Pressler, M.R. 1865. Das Gesetz der Stammbildung und dessen forstwirthschaftliche Bedeutung für den Waldbau höchsten Reinertrags. Leipzig: Arnold.

Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. 1997. Mensura Forestal. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 503 pp.

Riemer, T., Gadow, K.v. y Slodoba, B. 1995. Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. Allg. Forst-und J.-Ztg, 166(7): 144-147.

Rodríguez, F. 2005. Modelos de producción de las choperas del Valle del Cinca. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. 212 pp.

Rodríguez, F. y Molina, C. 2003. Análisis de modelos de perfil del fuste y estudio de la cilindricidad para tres clones de chopo (Populus x euramericana) en Navarra. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 12(3): 73-85.

Rodríguez-Soalleiro, R., Álvarez-González, J.G., Cela-González, M., Mansilla-Vázquez, P., Vega-Alonso, P., González-Rosales, M., Ruíz-Zorrilla, P. y Vega-Alonso, P. 1997. Manual técnico de selvicultura del pino pinaster. Proxecto Columella. Escola Politécnica Superior de Lugo.

Rojo, A., Perales, X., Sánchez, F., Álvarez-González, J.G. y Gadow, K.v. 2005. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). European Journal of Forest Research, 124: 177-186.

Romano, R.A. 2002. Estudio comparativo del diámetro de ramas en *Pinus radiata* D. Don con y sin mejoramiento genético. Trabajo Ing. For. Valdivia. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 82 pp.

Sanz F., Latour, S., Neves, M., Bastet, E., Pischedda, D., Piñeiro, G., Gautier, T., Lesbats, J., Plantier, C., Marques, A., Lanvin, J.D., Santos, J.A., Touza, M., Pedras, F., Parrot, J., Reuling, D. y Faria, C. 2006. Aplicaciones industriales de la madera de pino pinaster. Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e o Desenvolvemento Tecnolóxico de Galicia (CIS Madeira). 247 pp.

Sutton, W.R.J. y Crowe, J.B. 1975. Selective pruning of radiate pine. New Zealand Journal of Forestry Science, 5(2): 171-195.

Valdés, C.M., Díaz-Fernández, P. y Gil, L. 2003. La transformación histórica del paisaje forestal en Asturias. Introducción al Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006: Principado de Asturias. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 139 pp.

Valinger, E. 1992. Effects of thinning and nitrogen fertilisation on stem growth and stem form of *Pinus sylvestris* trees. Scandinavian Journal of Forest Research, 7: 219-228.

Vignote, S., Picos, J. y Zamora, R. 2000. Características de las principales maderas utilizadas en Bizkaia. Tecnología y aplicaciones. Departamento de Agricultura de la Diputación Foral de Bizkaia. Bizkaia. 292 pp.

Vignote, S y Jiménez, F. 2000. Tecnología de la madera. 2º Ed. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa. Madrid. 653 pp.

Vignote, S. y Martínez, I. 2006. Tecnología de la madera. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 685 pp.

Reflexión sobre gestión (derecha) o no gestión (izquierda) para madera de calidad. Meyers (1995)

4.- ECUACIONES DE CUBICACIÓN HISTÓRICAS Y ACTUALES

Alejandro Cantero Amiano
HAZI Fundazioa

Las ecuaciones de cubicación son una herramienta fundamental en la planificación y en la gestión forestal, por cuanto permiten conocer la madera que se acumula en los árboles y su crecimiento anual. En las siguientes líneas se van a repasar las principales ecuaciones encontradas para su aplicación al pino marítimo en el Norte de España.

Hay que recordar que, además de las ecuaciones de cubicación, es posible recurrir a métodos más simples como tablas, tarifas simples o gráficas para cubicar arbolados. Todos esos métodos parten de la hipótesis de que dos árboles de una misma especie, mismo diámetro, misma altura, misma calidad de estación o incluso de la misma edad, contienen un mismo volumen de madera, o al menos contienen un margen de error conocido o se sitúan dentro de un intervalo de confianza calculado.

La mayoría de las ecuaciones disponibles para una especie forestal son del tipo V=f(d,h), debido a que el perímetro o diámetro normal (en cm) y la altura total (en m) suelen ser las variables más sencillas de medir en campo. No obstante, la dinámica de los arbolados forestales aconseja asegurarse de que la ecuación empleada se adecúa a cada arbolado concreto, ya que dependiendo de factores como la procedencia de la planta, la edad, la especie, la densidad, la forma de la copa del árbol o la calidad del monte puede variar la morfología de los fustes, y con ello su volumen.

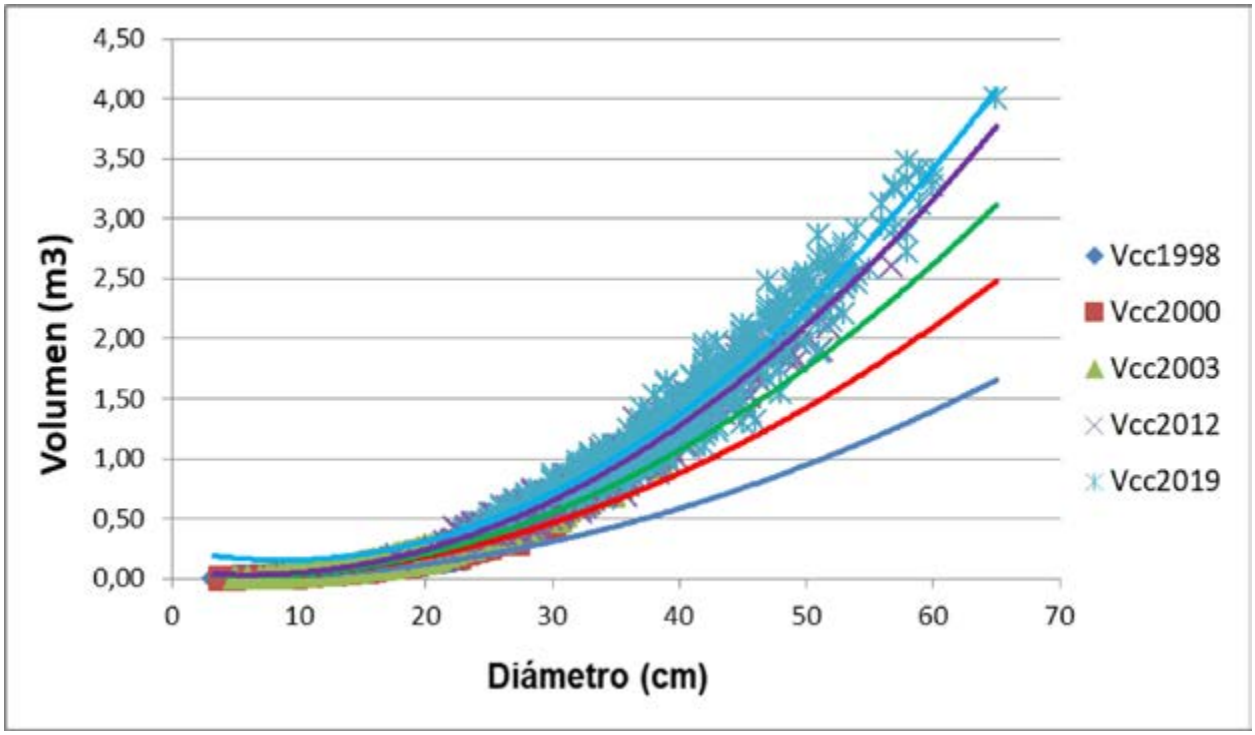
Para disponer de una correcta ecuación de cubicación de un arbolado concreto, se debería construir a partir de una muestra representativa de ese mismo arbolado en un mismo momento (ecuación local). Otra alternativa es partir de una muestra amplia, de tipo regional y con gran variación de edad y calidad de los arbolados cubicados (ecuación general). En este apartado se va a prestar mayor atención a estas ecuaciones más amplias o generales, por ser más útiles y permitir comparar montes distintos o años distintos.

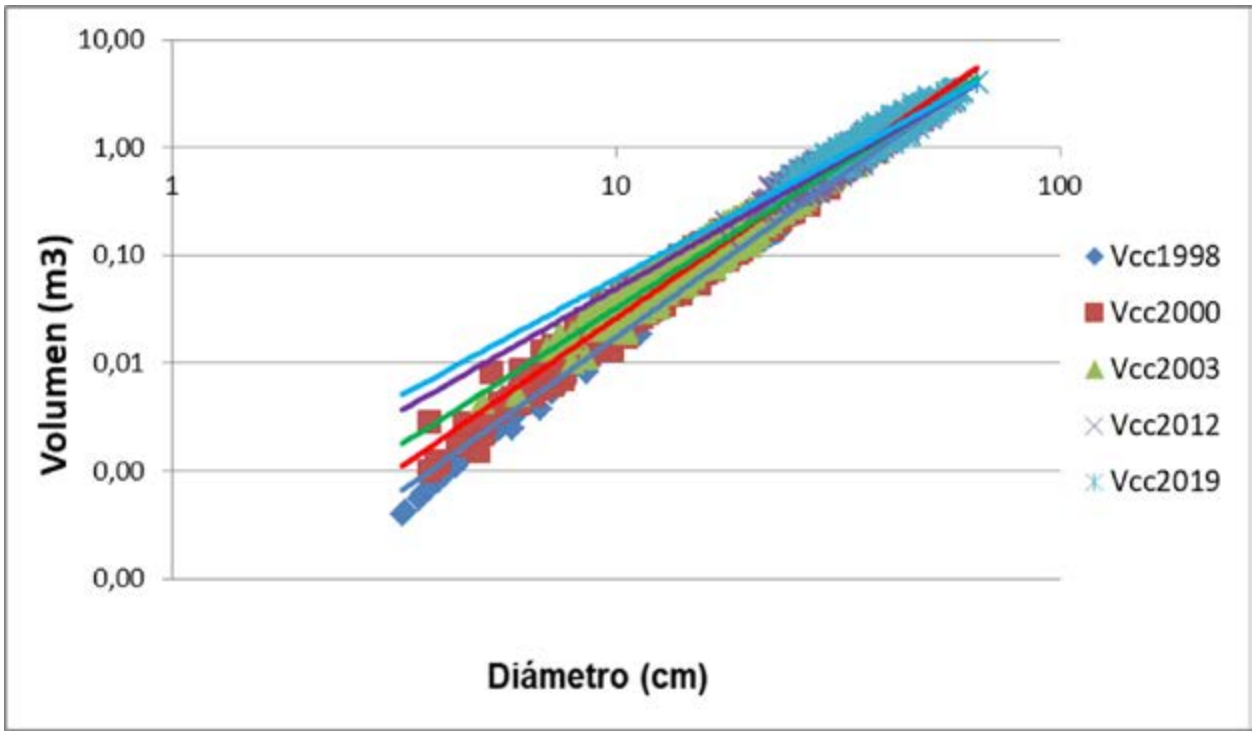
Las reglas prácticas (recogidas por Pardé y Bouchon en su libro *Dendrométrie* 2º ed., 1988) suelen aconsejar un número mínimo y variable de árboles tipo o árboles representativos de una especie necesarios para construir una ecuación de cubicación:

- Para cubicar un rodal, entre 30 y 100 árboles, dependiendo de su extensión
- Para cubicar un monte de unas 1.000 ha, unos 400 árboles
- En una región o macizo forestal, se aconsejan unos 1.000 árboles
- En el conjunto del área natural de una especie, entre 2.000 y 3.000 árboles

En las ecuaciones de cubicación del tipo V=f(d,h), hay que tener en cuenta que el diámetro tiene más influencia en el cálculo del volumen que la altura, ya que geométricamente la sección normal del tronco depende de d^2. Por tanto, variaciones pequeñas del diámetro suelen influir más que variaciones pequeñas de la altura en el volumen resultante.

En el capítulo 1 se han repasado ecuaciones geométricas universales y en el capítulo 2 se ha repasado la variación de la relación diámetro-altura o curva de alturas de un arbolado a lo largo del tiempo. El siguiente ejemplo, ya mencionado en el capítulo 2, permite comprobar la variación del volumen unitario de los pinos radiata incluidos en 5 parcelas levantadas en 1990 y remedidas en el marco de los proyectos europeos Espacio Atlántico REINFFORCE 2007-2013 y LIFE HEALTHY FOREST 2016-2019. Se ha empleado la misma ecuación para cubicar esos mismos pinos en todos estos inventarios, que es la ecuación de cubicación disponible para *Pinus radiata* en el País Vasco (publicada en 2016 a partir de 837 pinos muestreados). Las citadas variaciones en su altura de los pinos a lo largo del tiempo influyen en las variaciones que se pueden comprobar en su volumen unitario (Vcc, volumen con corteza), en escala lineal y logarítmica.





Por tanto, habrá que tener en cuenta estas dos variaciones a lo largo del tiempo en sucesivos inventarios de un mismo arbolado: las alturas medias y los volúmenes medios correspondientes a cada clase diamétrica.

1.- Tarifas y ecuaciones de cubicación

Una tarifa simple, uniparamétrica o tarifa de una entrada permite estimar el volumen de un fuste en función de su circunferencia o diámetro normal, que es el diámetro medido a 1,3 m de altura desde el suelo. Esta altura de 1,30 m o altura del pecho no siempre es la misma en todos los países, ya que puede alcanzar los 1,37 m (4,5 pies) en EEUU, los 1,40 m (4 ft 7 in) en varios países anglófonos o los 1,50 m que se suelen emplear en árboles ornamentales.

A partir de este diámetro normal, las tarifas de una entrada proporcionan de forma fácil el volumen del árbol, aunque el error puede ser alto. Ejemplos de esas tarifas disponibles para una especie pueden encontrarse en ordenaciones históricas, donde se ha venido disponiendo de muchos árboles tipo que se han ido cubicando en sucesivas revisiones del inventario y donde se creía más conveniente contar con una misma tarifa de ordenación que no cambiara a lo largo del tiempo. Los sucesivos proyectos de ordenación de Barazar (MUP de Dima y Zeanuri) proponían desde el comienzo diversas tarifas de ordenación, coeficientes mórficos y alturas reducidas calculadas para algunas especies de coníferas, pero inventarios más recientes, a lo largo del siglo XXI, han ido demostrando que esas fórmulas y valores dejaban de ser válidos conforme se iban alargando los turnos o edad de corta final de los rodales de dichas especies.

En países de gran tradición forestal como Alemania o Francia existe la extendida costumbre del empleo de tarifas de cubicación de una entrada, tanto para especies de coníferas productivas como para frondosas. Se basan en la sencilla relación V=f(d), que en la escala logarítmica se representa con una recta, o directamente en la forma $V=f(d^2)$.

Tarifas Algan

En Francia emplean desde hace un siglo estas 20 tarifas fijas que se van adaptando a las distintas especies, edades y dimensiones medias de los arbolados para calcular el volumen total de madera de un solo árbol. Se basan en estas reglas fijas:

- Un árbol multiplica por 10 su volumen al pasar de un diámetro normal de 20 a 50, de 25 a 65 o de 30 a 80
- Un árbol multiplica por 5 su volumen al pasar de un diámetro normal de 35 a 70 y por 3 al pasar de un diámetro normal de 60 a 100
- Y un árbol multiplica por 2 su volumen al pasar de un diámetro normal de 20 a 25, de 30 a 40, de 45 a 60 o de 65 a 90

De esta forma, se cuenta con 20 tarifas Algan numeradas que, para un árbol de 45 cm de diámetro, asignan un volumen de 0,9 m^3 (tarifa N=1), 1 m^3 (tarifa 2), 1,1 m^3 (tarifa 3)… así hasta 2,8 m^3 (tarifa N=20). Así pues, la relación básica es: **$10 * V45 = N+8$**.

Se ha calculado que cubican de forma semejante un abeto o pícea de d=50 cm, una haya de 45 cm o un alerce de 55 cm: tantos m^3 como proporciona la fórmula H/10 en m.

TARIFS ALGAN

	Numéro de tarif																			
diamètre à 1,3m (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
0,25	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1
0,35	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6
0,4	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
0,45	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
0,5	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,3	3,5	3,6
0,55	1,5	1,6	1,8	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	2,8	2,9	3,1	3,3	3,4	3,6	3,8	3,9	4,0	4,2	4,4	4,5
0,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6
0,65	2,1	2,4	2,6	2,9	3,1	3,4	3,6	3,8	4,1	4,3	4,5	4,8	5,0	5,3	5,5	5,8	6,0	6,2	6,5	6,7
0,7	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0	4,2	4,5	4,8	5,1	5,3	5,6	5,9	6,2	6,5	6,8	7,1	7,3	7,6	7,9
0,75	2,9	3,2	3,6	3,9	4,3	4,6	4,9	5,2	5,6	5,9	6,2	6,5	6,9	7,2	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,2
0,8	3,3	3,7	4,1	4,5	4,9	5,3	5,6	6,0	6,4	6,7	7,1	7,5	7,9	8,3	8,7	9,1	9,4	9,8	10,1	10,5
0,85	3,8	4,2	4,7	5,1	5,6	6,0	6,4	6,2	7,2	7,6	8,1	8,5	9,0	9,4	9,9	10,3	10,7	11,1	11,5	12,6
0,9	4,3	4,8	5,3	5,8	6,3	6,8	7,2	7,7	8,1	8,6	9,1	9,6	10,1	10,6	11,1	11,6	12,1	12,5	13,0	13,5
0,95	4,8	5,4	5,9	6,5	7,0	7,6	8,1	8,6	9,1	9,7	10,2	10,8	11,3	11,9	12,4	13,0	13,5	14,0	14,6	15,1
1	5,4	6,0	6,6	7,2	7,8	8,4	9,0	9,6	10,2	10,8	11,4	12,0	12,6	13,2	13,8	14,4	15,0	15,6	16,2	16,8

Tarifas rápidas

Al basarse las tarifas Algan en relaciones algebraicas, presentaban disfunciones en sus cálculos. Por ello, algunos autores han propuesto su sustitución por otra tarifa basada en la relación:

$$V = M/1400 * (D-5) * (D-10)$$

Volumen V en m³, diámetro D en cm y M es un valor que expresa el volumen medio en m³ de un árbol de diámetro 45 cm

Se cumplen estas reglas fijas, muy semejantes a las descubiertas por Algan:

- Un árbol multiplica por 10,5 su volumen al pasar de un diámetro normal de 30 a 80, por 11 al pasar de un diámetro normal de 25 a 65 y por 12 al pasar de un diámetro normal de 20 a 50

Dichas tarifas fijas aparecen reflejadas en documentos oficiales franceses como el *Manuel pratique d´aménagement* (1964) o en los *Vade-mecum du forestier*.

Tarifas lentas

Schaeffer (1949) fue otro investigador forestal que se fijó en la gran variabilidad de los árboles dentro de cada rodal, por lo que propuso otras tarifas con menor variación del volumen en función de los cambios en el diámetro. Por ello, propuso la sustitución de las tarifas Algan y de las tarifas rápidas por otra tarifa basada en la relación:

$$V = M/1800 * D * (D-5)$$

Volumen V en m³, diámetro D en cm y M es un valor que expresa el volumen medio en m³ de un árbol de diámetro 45 cm

Así como un árbol duplicaba su volumen al pasar de un diámetro normal de 20 a 25 con las primeras tarifas, con la tarifa lenta pasaría a multiplicarse por 1,667 y se duplicaría al pasar de diámetro 15 a 20.

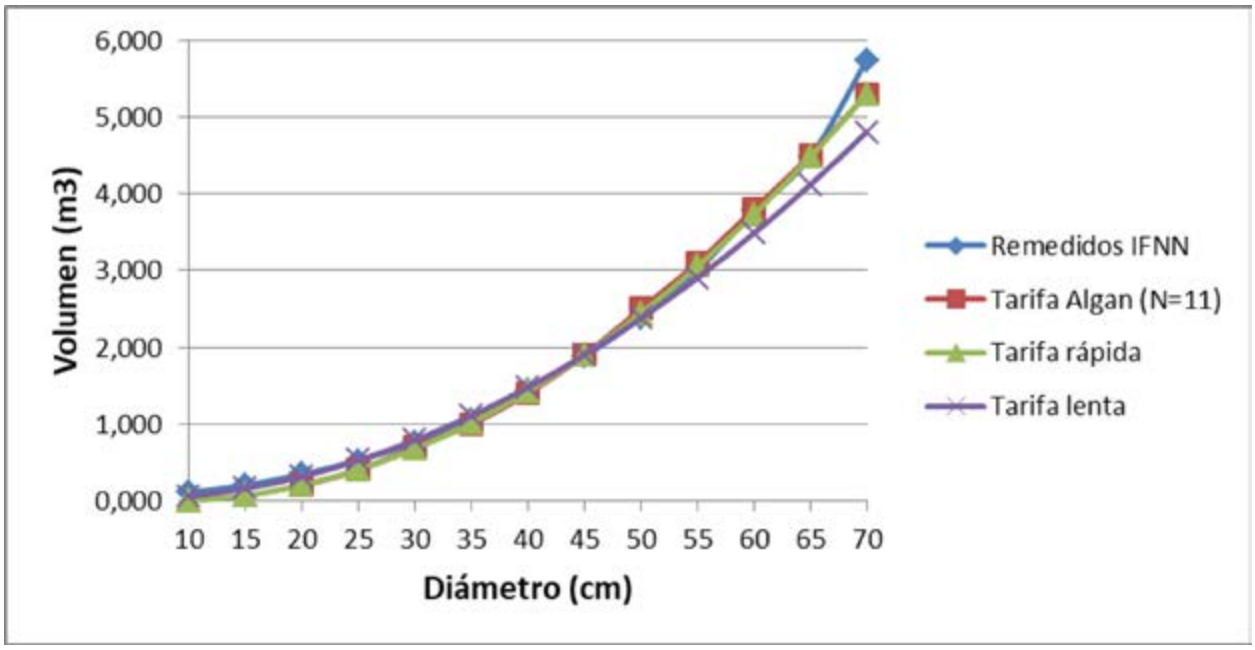
Una variación aún más sencilla de estas tarifas podría ser la relación: $\mathbf{V = D^2 / 1000}$, empleando D en cm y V en m³.

Aplicación de esas tarifas al pino marítimo

Si se toma el promedio del volumen medio de los pinos remedidos entre los IFN4 e IFNN por clases diamétricas, se aprecia que la tarifa 11 de Algan es la que se adapta al volumen medio, por lo que se puede elaborar el siguiente cuadro comparativo de volumen medio en m3 en función del diámetro en cm.

Se comprueba la semejanza de los volúmenes medios medidos en campo con estas tarifas, sobre todo con la rápida en diámetros altos y con la lenta en diámetros bajos. Se trata de una muestra de árboles más viejos y gruesos que la media de los pinos del IFNN, ya que entre los pinos remedidos en los IFN4 e IFNN ha pasado cerca de una década, sufriendo claras (cortas intermedias), además de derribos por agentes climatológicos, y sin incorporar nuevas incorporaciones de pinos jóvenes.

Volumen medio (m³/pie)					
CD	Media IFNN	Remedidos IFNN	Tarifa Algan (N=11)	Tarifa rápida	Tarifa lenta
10	0,058	0,106	-	0,000	0,053
15	0,106	0,205	-	0,068	0,158
20	0,191	0,346	0,200	0,204	0,317
25	0,321	0,525	0,400	0,407	0,528
30	0,492	0,760	0,700	0,679	0,792
35	0,722	1,053	1,000	1,018	1,108
40	0,995	1,447	1,400	1,425	1,478
45	1,360	1,879	1,900	1,900	1,900
50	1,765	2,386	2,500	2,443	2,375
55	2,212	3,001	3,100	3,054	2,903
60	2,814	3,772	3,800	3,732	3,483
65	3,388	4,482	4,500	4,479	4,117
70	4,611	5,737	5,300	5,293	4,803
Suma CD20-65	**14,260**	**19,651**	**19,500**	**19,341**	**19,001**



Método de las Alturas normales en Alemania

Ya se ha comentado antes la gran simplificación que supone la relación: **V = D² / 1000**, empleando D en dm y V en m³. Esta fórmula procede del empleo de estas hipótesis: V = FGH, suponiendo un coeficiente mórfico F de 0,5 (muy alto, propio de los abetos adultos), una altura H media de 25 m y un producto pi/4 de 0,8. Dicho de otro modo, suponiendo una altura reducida de 12,5 m (F*H), se obtiene el mismo resultado. De esta forma, se reduce la expresión π/4*0,5*25=10 y el volumen FGH queda reducido a **D²/1000**.

Partiendo de esta simple fórmula, el alemán Denzin[1] desarrolló unas fórmulas muy simples de cubicación para distintas especies a partir de las alturas normales propias de cada especie (*Normalhöhe* o NH) y del coeficiente de variación de la altura (CV) frente a la NH. Así, por ejemplo, la altura normal de los pinos es de 28 m (+-3% del volumen por cada m de diferencia con NH), de las hayas 25 m (+-4%), de los alerces 17m+3*BHD (+-5%) y de las píceas 19m+2*BHD (+-4%). BHD es el diámetro normal en dm.

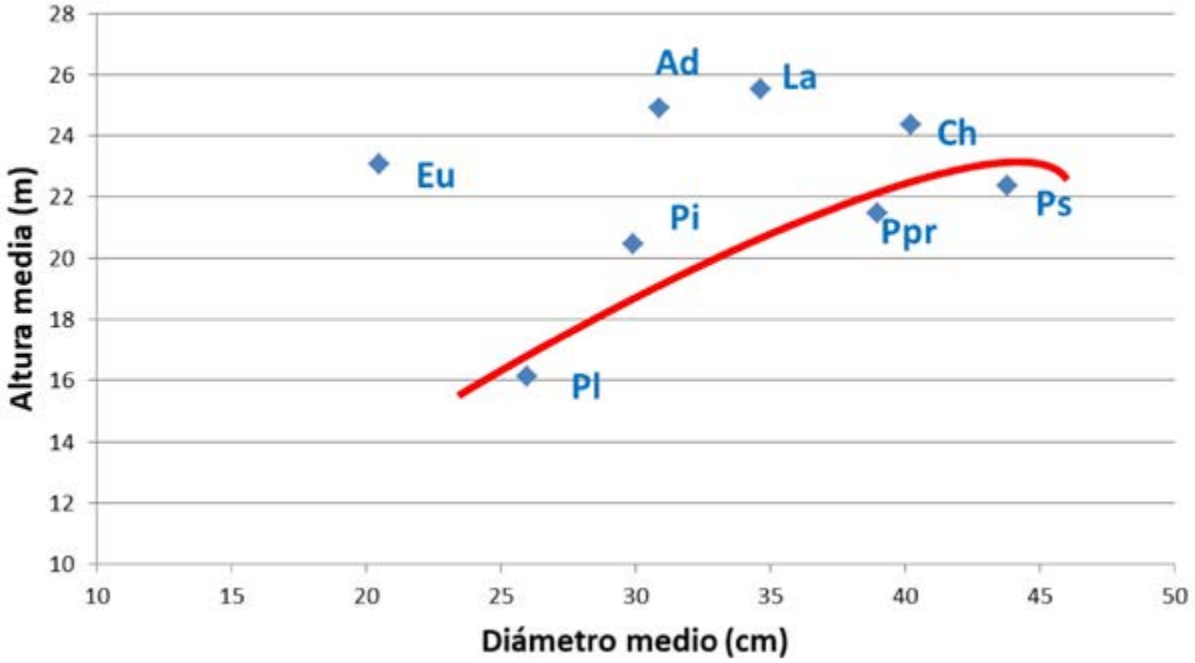
Así, aplicando esos valores, un pino de diámetro normal 40 cm y altura 25 m cubicaría 40^2/1000*0,91 = 1,456 m³. Y, por ejemplo, un alerce de las mismas dimensiones sólo cubicaría 40^2/1000*0,8 = 1,28 m³.

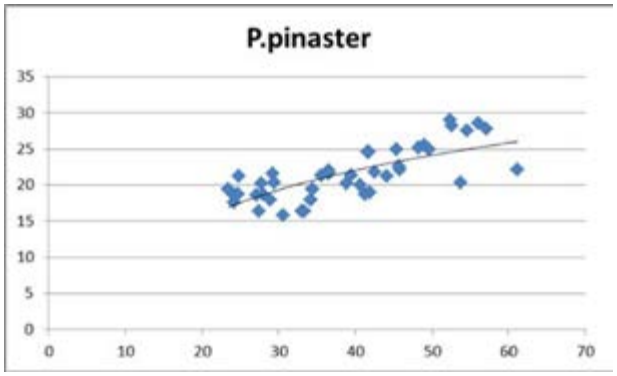
Esta fórmula tan sencilla de tipo v=f(d,h) puede tener aplicaciones prácticas en el caso de las coníferas españolas. Por ejemplo, si se aplica esta serie de fórmulas a las muestras de árboles tipo empleadas en las nuevas ecuaciones de cubicación para diversas especies productivas mediante medición con láser 3D (HAZI, 2017)[2], se obtienen unos resultados muy ajustados entre sí. La diferencia entre el volumen real total de los árboles tipos y el volumen que se obtiene para esos mismos árboles aplicando estas nuevas ecuaciones de Denzin es inferior al 3% en todos estos casos:

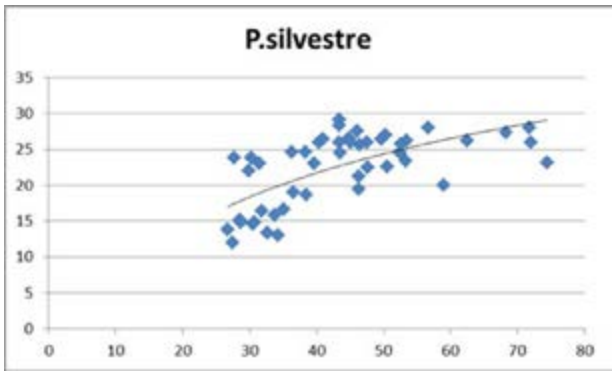
Especie	Muestra de árboles tipos	Ecuación Denzin ajustada
Pino marítimo Ppr	42	**V = D² /1000*(1-0,025*(32 - H))**
Pino laricio Pl	364	**V = D² /1000*(1-0,02*(31 - H))**
Pino silvestre Ps	48	**V = D² /1000*(1-0,02*(32 - H))**
Pino radiata Pi	837	**V = D²/1000*(1-0,03*(32 - H))**
Abeto Douglas Ad	135	
Ciprés Lawson Ch	46	
Eucaliptos Eu	137	
Alerce La	87	**V = D²/1000*(1-0,03*(28 - H))** **V = D² /1000*(1-0,04*(19+2*D/10 - H))**

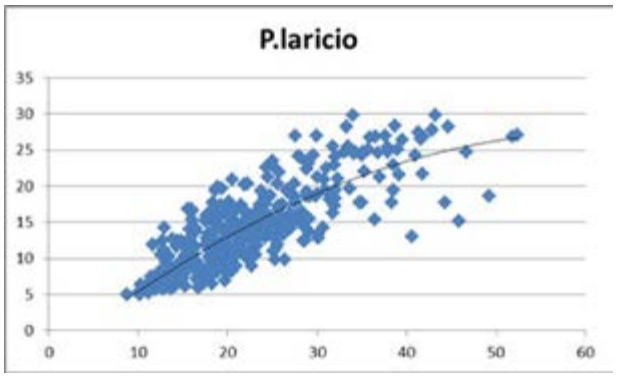
1 Incluidas en *Leitfaden zur Waldmesslehre*, de Horst Kramer y Alparslan Akça. 2002. 266 pp.
2 Empleo del láser escáner terrestre para la construcción de nuevas ecuaciones de cubicación en el País Vasco. Comunicación 7CFE01-090. Plasencia, junio 2017.

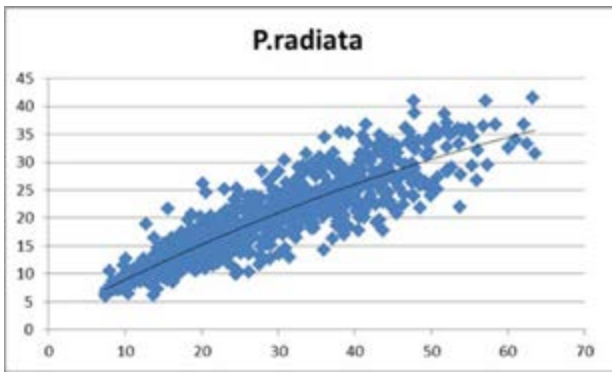
Estas diferencias en NH y en CV propias de cada especie pueden estar relacionadas con los diámetros y alturas medias de sus respectivas muestras de árboles tipo empleadas. En la gráfica se reflejan los promedios de las muestras empleadas para cada especie, distinguiendo los pinos europeos del resto de coníferas: las ecuaciones de Denzin correspondientes a estas tres especies de pino presentan menores valores de CV, lo que puede estar relacionado con el hecho de ser árboles menos esbeltos que en el resto de especies analizadas, ya que menores valores medios de su relación de esbeltez (h/d en torno a 0,5-0,6) y alturas máximas menores de 30 m.

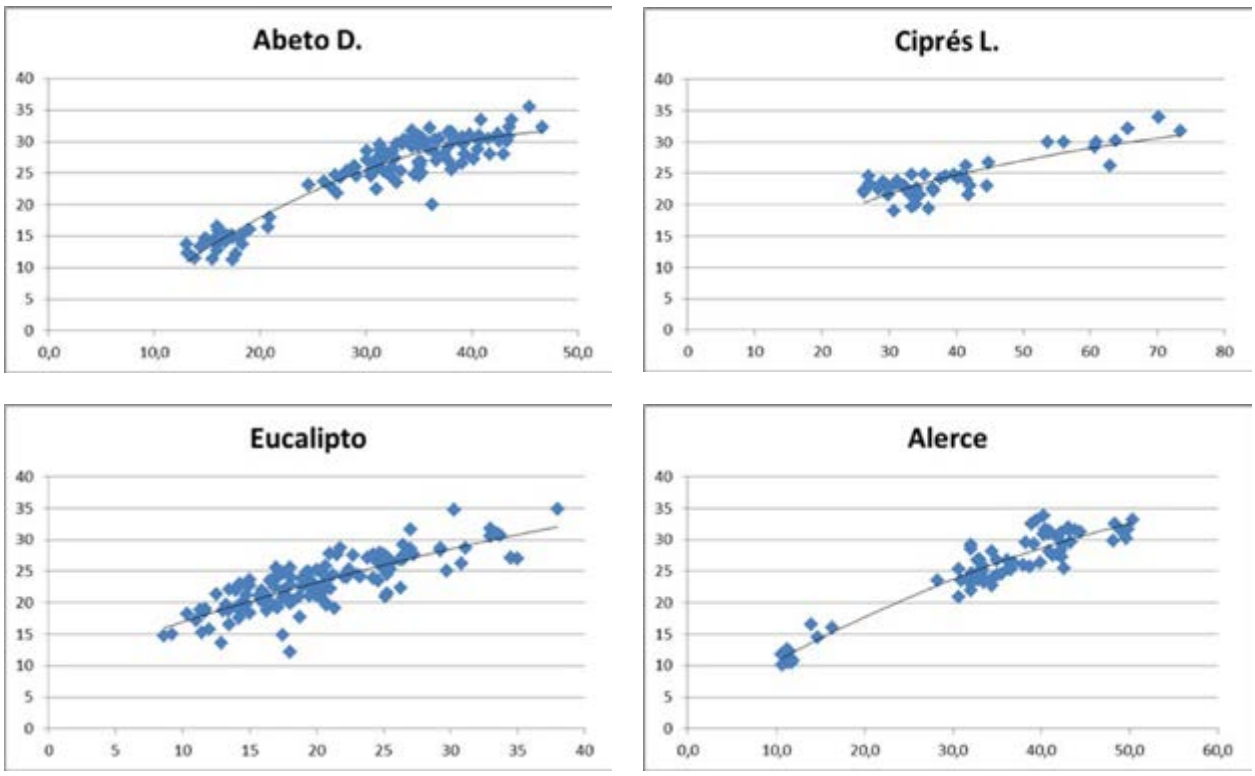












Gráficos de diámetros y alturas de las muestras de árboles tipo empleadas.

Se abre, por tanto, la posibilidad de empleo de esas sencillas fórmulas basadas en alturas normales NH en diversos arbolados de coníferas del País Vasco y del Norte, como se va a seguir analizando en el capítulo 5 de Resultados. En ese mismo capítulo, se analizan los resultados obtenidos con la muestra de árboles tipo del proyecto SiGCa-PIMA y, en ese caso, la ecuación que mejor se ajusta para esos pinos marítimos es:

$$V = D^2/1000*(1-0{,}03*(32 - H))$$

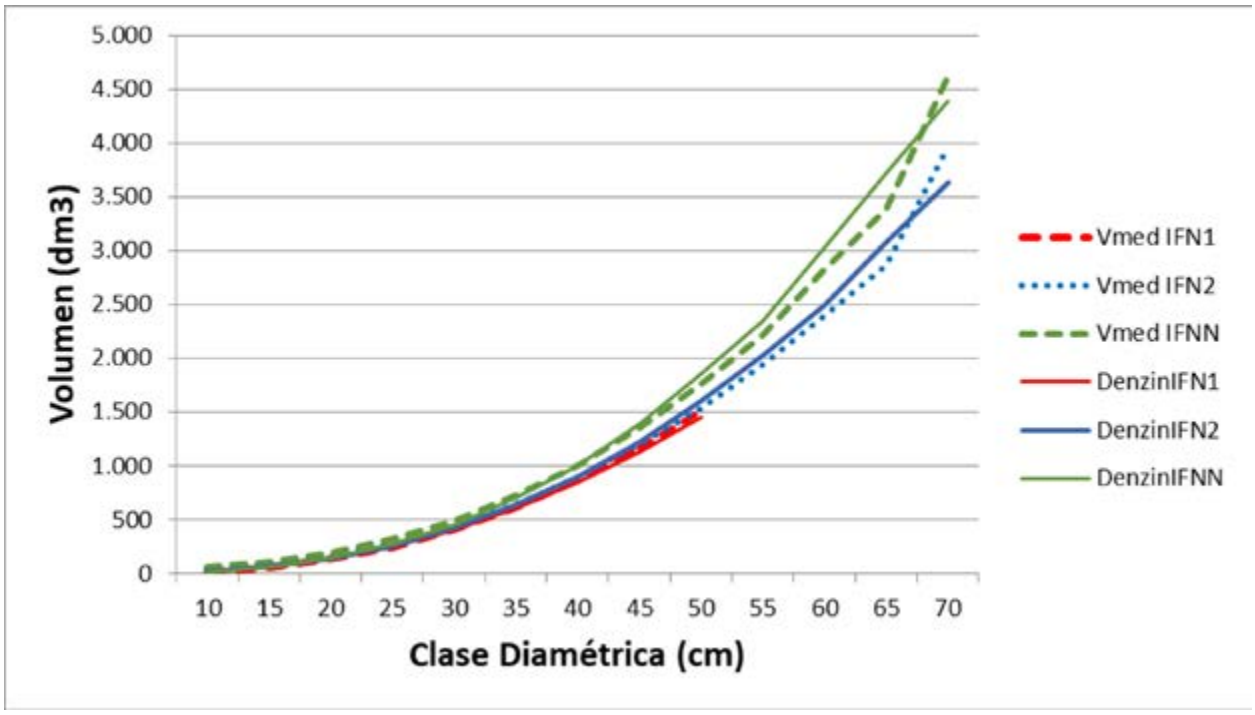
Volumen V en m³, diámetro normal D en cm y altura total H en m.

La muestra disponible de pinos marítimos del IFN también se ajusta a este tipo de ecuaciones tan genéricas. A partir de los volúmenes medios de estos pinos medidos en IFN1, IFN2 e IFNN se comprueba que la variabilidad que van presentando, con alturas y volúmenes medias cada vez mayores, puede ser ajustada a este tipo de ecuaciones basadas en las alturas normales de Denzin, sin más que ir cambiando esos 2 parámetros: la altura normal NH propia de cada IFN y el % de variación del volumen CV por cada m de diferencia con NH.

Un buen ajuste se consigue, como se puede ver en la tabla, con esta combinación: manteniendo NH=32 m antes calculado, se emplea un coeficiente de 0,025 en IFN1, de 0,035 en IFN2 y de 0,036 en IFNN. Semejantes resultados se obtienen si se mantiene un coeficiente constante de 0,03 y se toma NH=31 m en IFN1, 34 en IFN2 y 34 en IFNN. Como, según avanza el IFN, los pinos son de media más altos y gruesos, la ecuación de Denzin se puede ir adaptando por medio de la disminución de la altura normal NH y/o del aumento del % de coeficiente de variación CV para cada IFN.

Volumen medio (dm³/pie)						
CD	Vmed IFN1	Vmed IFN2	Vmed IFNN	DenzinIFN1	DenzinIFN2	DenzinIFNN
10	18,40	33,72	57,61	19,30	16,70	16,01
15	57,56	82,02	106,03	58,95	59,15	58,63
20	133,46	163,48	190,79	133,60	135,82	142,24
25	247,18	281,57	321,41	244,38	254,44	273,78
30	409,09	443,53	492,37	400,50	420,89	454,50
35	617,22	647,52	721,93	600,25	633,33	701,09
40	869,32	888,51	995,47	841,60	901,68	996,93
45	1.166,92	1.197,81	1.359,94	1.125,90	1.217,73	1.395,14

Volumen medio (dm³/pie)						
CD	Vmed IFN1	Vmed IFN2	Vmed IFNN	DenzinIFN1	DenzinIFN2	DenzinIFNN
50	1.506,51	1.538,39	1.764,84	1.450,00	1.603,13	1.851,10
55		1.937,12	2.212,45		2.025,54	2.348,73
60		2.392,47	2.814,11		2.491,20	3.020,69
65		2.868,06	3.388,28		3.068,62	3.727,63
70		3.958,37	4.611,44		3.637,76	4.388,44
Suma CD15-50	**5.025,66**	**5.276,54**	**6.010,39**	**4.874,48**	**5.242,86**	**5.889,42**

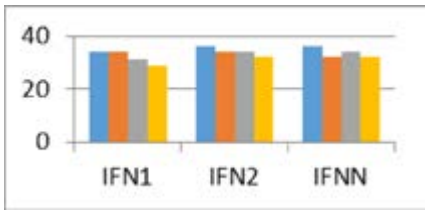


$$V = D^2/1000*(1-CV*(NH - H))$$

Volumen V en m³, diámetro normal D en cm, altura total H en m, altura normal NH en m y coeficiente de variación CV en tanto por uno.

Por tanto, empleando la muestra de los pinos inventariados en sucesivos IFN se pueden conseguir resultados semejantes probando diversas combinaciones que relacionan esta disminución progresiva de la altura normal NH y este aumento del coeficiente de variación CV según aumentan las dimensiones medias de los pinos para cada IFN.

		IFN1	IFN2	IFNN
Caso 1	CV	0,025	0,025	0,025
	NH (m)	34	36	36
Caso 2	CV	0,025	0,03	0,035
	NH (m)	34	34	32
Caso 3	CV	0,030	0,030	0,030
	NH (m)	31	34	34
Caso 4…	CV	0,035	0,035	0,035
	NH (m)	29	32	32



Al igual que se ha hecho notar en el caso de las tarifas antes descritas, no hay que desdeñar la posibilidad de empleo de estas sencillas ecuaciones basadas en las alturas normales de Denzin. Este tipo de ecuaciones, basadas en la forma de los árboles, pueden ser muy útiles para ir ajustando en el futuro las ecuaciones IFN, según vayan variando las dimensiones medias de los árboles en cada inventario.

Con el mismo razonamiento, también podrían aplicarse estas ecuaciones en el caso de ordenaciones forestales y posteriores revisiones, en los que la obtención de muestras representativas de árboles tipo para cada inventario es una tarea lenta y costosa.

2.- Ecuaciones de cubicación del IFN

El Inventario Forestal Nacional (IFN) también permite disponer de ecuaciones de cubicación para *Pinus pinaster* en el Norte de España y de un gran número de árboles y parcelas remedidos desde hace décadas (al menos desde IFN2). Los cambios habidos en nuestros montes desde los años 70 hasta la actualidad se han ido reflejando en los resultados obtenidos, lo que ha ido obligando a readaptar esas herramientas disponibles para los gestores forestales.

IFN1

El primer ciclo de IFN (1966-1975) fue un enorme trabajo de inventario forestal, pero al no tratarse de parcelas con la misma metodología de muestreo que los IFN posteriores (empezaron mediante parcelas relascópicas en vez de radios concéntricos) y no ubicadas siguiendo la malla kilométrica UTM ED50 sino al azar, la trazabilidad histórica de esas parcelas de muestreo no es posible. Únicamente es posible la comparación a nivel de datos globales o provinciales entre distintos IFN, no a nivel de parcela de muestreo ni de árbol individual.

El primer IFN formuló distintas ecuaciones de cubicación para las distintas especies, formas de los árboles y territorios. Para ellos se basó en los llamados árboles tipos, que eran árboles representativos de cada parcela de muestreo y situados en las 4 direcciones cardinales desde el centro de cada parcela, en los cuales se medía una serie de parámetros de los troncos, que servían con posterioridad para construir esas ecuaciones de cubicación. No se llegaba a derribar a los árboles tipo para cubicarlos, sino que se medían desde el suelo diversos diámetros y alturas representativas, empleando el relascopio y otras herramientas como la forcípula finlandesa. Se dividían los fustes de esos árboles tipo en dos trozas que se cubicaron mediante la fórmula de Newton por secciones S: $VCC=(S_1+4*S_{1/2}+S_2)*L$

En total fueron unos 11.500 pinos marítimos del Norte los analizados dentro del IFN1 y que permitieron elaborar todas esas primeras ecuaciones, mediante su cubicación en pie y el empleo de este tipo de fórmulas geométricas o supertarifas para estimar su volumen maderable:

III.- Cálculo de existencias.- Cada árbol tipo da lugar a un volumen maderable calculad la fórmula:

$$VM = \frac{\pi}{24} (2,2\ (D_t^2 + 4D_n^2 + D_{2,4}^2) + (Hf - 2,4)\ (D_{2,4}^2 + 4D_{1/2}^2 + D_{ff}^2))$$

Utilizando todos los árboles tipo de una misma especie, se ajusta mínimos cuadrados las ecuaciones:

$$VM = a + bD_n^2\ H_t \qquad (1)$$

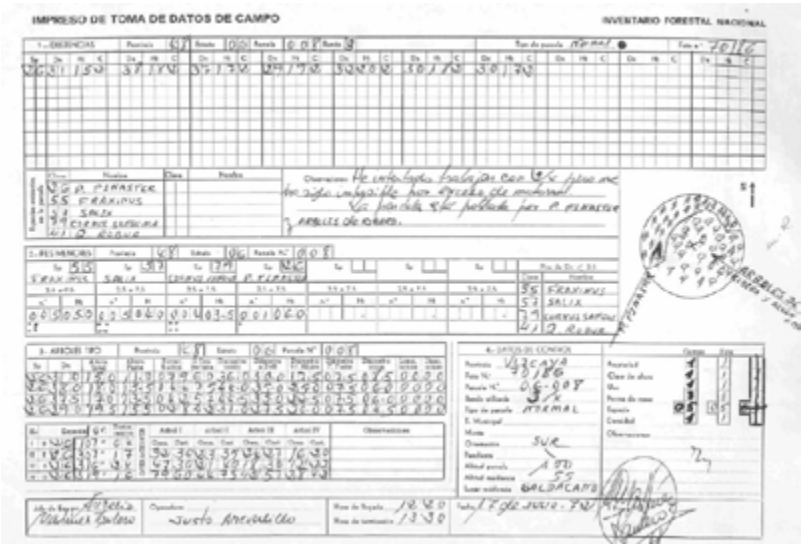
$$D_n = r + s\ (D_n - \overline{ec}) \qquad VM = pD_n^q$$

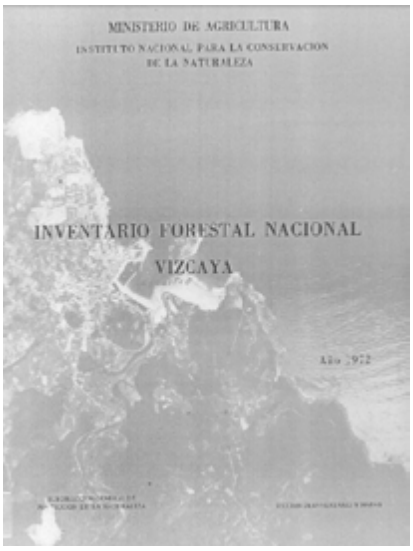
Los cuadernos provinciales, disponibles en la *web*, permitieron publicar una serie de ecuaciones locales para cada especie. Por ejemplo, un par de ejemplos publicados para el pino marítimo fueron:

Bizkaia: $\mathbf{V = 3,74 + 0,03246 * D^2 * H}$

La Coruña: $\mathbf{V = 0,15 + 0,03405 * D^2 * H}$

Volumen V en dm³, diámetro D en cm y altura H en m





Ejemplo de estadillo rellenado a mano en IFN1 y portada de la publicación de Bizkaia.

La publicación del ICONA *Las coníferas en el primer Inventario Forestal Nacional* (1979) permitió calcular ecuaciones de tipo conjunto para todas las provincias. Por ejemplo, incluía estas ecuaciones para *P. pinaster* (Norte):

Nacional: $\mathbf{V = 4{,}53 + 0{,}03237 * D^2 * H}$

Galicia: $\mathbf{V = (0{,}27 + 0{,}03337 * D^2) * H}$

Cantábrico: $\mathbf{V = (0{,}95 + 0{,}03112 * D^2) * H}$

También incluía esa misma publicación magnitudes de gran interés según clases diamétricas, como tablas volumétricas, tarifas de corteza, porcentajes de volumen de sierra o una muestra de valores medios con todo ese conjunto de árboles tipo. Por último, incluía una tarifa de cubicación de una entrada y ecuaciones de perfil de tronco de tipo polinómico para *P. pinaster* (Norte):

$$\mathbf{V = 72{,}12 - 12{,}809 * D + 0{,}8063 * D^2}$$

$$\mathbf{H = 1{,}118 + 0{,}54382 * D - 0{,}0040224 * D^2}$$

$$\mathbf{y = 1 - 2{,}3610*x + 2{,}0069*x^2 + 1{,}4356*x^3 - 2{,}5460*x^4}$$

y es la proporción al cuadrado, en tanto por uno, del diámetro a distintas alturas sobre el diámetro normal, mientras que x es la proporción, en tanto por uno, de la altura correspondiente, siendo 0 a la altura normal (h=1,30 m) y 1 a la altura total o altura en punta; y=(di/d)^2 x=(hi-1,3)/(h-1,3)

En 1993 la empresa TRAGSA realizó un informe con el título *Cálculo de las ecuaciones de cubicación con los árboles tipo del IFN1*. En dicho informe se recogían unas primeras ecuaciones que se habían calculado mediante la muestra de pinos marítimos del Norte del IFN1:

Formas 1 y 2: **VCC = 0,0027088 * D^1,4648014 * H^0,6372401 * D4h^0,61177**

Forma 3: **VCC = 0,0021602 * D^1,8510446 * H^-0,0758626 * Hf^0,7055575**

Volumen maderable con corteza VCC en dm^3, diámetro D en mm, altura H en m, diámetro a 4 m de altura D4h en cm y altura a fin de fuste Hf en m

Una de las novedades que se introdujo fue el paso de las supertarifas de tipo polinómico $V=a+d*D^2*H$ a unas ecuaciones de tipo exponencial $V=p*D^q*H^r$. Las nuevas ecuaciones para el pino marítimo del Norte de la Forma 2 (a partir de 8.790 pinos de muestra) fueron:

Modelo 1: $\mathbf{VCC = 6{,}19 + 0{,}0003284 * D^2 * H}$

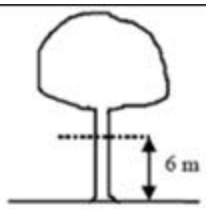
Modelo 11: **VCC = 0,0003588 * D^2,0402943 * H^0,8856202**

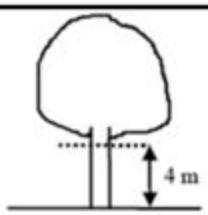
Modelo 13: $\mathbf{VCC = -96{,}56 + 0{,}0061373 * D^2}$

Volumen maderable con corteza VCC en dm^3, diámetro D en mm y altura H en m

Según las vigentes *Instrucciones para el apeo de las parcelas de campo del IFN*, las principales formas de cubicación se describen así:

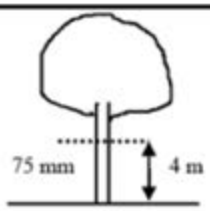
1. Árboles fusiformes prácticamente en todo su fuste, con troncos maderables, limpios y derechos de más de 6 m, flecha inferior al 1% de su longitud, veta no torcida y diámetro normal mayor de 20 cm





2. Árboles que cumplan las cuatro condiciones siguientes: ser fusiformes, tener troncos maderables de 4 o más metros, ramificarse por la parte superior y no pertenecer a la forma 1.

3. Árboles fusiformes pequeños, en los que el diámetro de fuste de 75 mm queda por debajo de los 4 m de altura.



IFN2

El segundo ciclo de IFN (1986-1996) ya se asemeja a los inventarios más recientes, dado que se basaba en parcelas de radios concéntricos (5, 10, 15 y 25 m de radio para seleccionar a los árboles) y ubicadas siguiendo la malla de 1 km*km UTM ED50, por lo que suponía la realización de una parcela cada 100 ha arboladas.

Existe, por tanto, la posibilidad de contar con la remedición de algunos pinos de forma continua desde los años 80, a lo largo de hasta cuatro IFN correlativos. Igualmente, se puede disponer de los datos de los árboles colindantes en cada IFN, con el fin de poder modelizar su espesura y su crecimiento.

Aunque los pinos individuales medidos en IFN2 no tenían relación con los previamente medidos en las parcelas IFN1, sino que eran otra muestra temporal independiente, sí que se mantuvo la idea de los árboles tipo medidos en pie, cuatro pies representativos de cada parcela, a los cuales se medía parámetros relacionados con la forma y la calidad de los árboles. Las diferencias en la elección de árboles tipo en ambos IFN eran:

IFN1	IFN2
Se seleccionaban en cada parcela los cuatro árboles más cercanos al centro en las direcciones N, S, E y O, cuyos diámetros normales estuviesen comprendidos entre 17,5 cm y 1 m. De ellos se tomaban los siguientes datos: diámetro normal, diámetro del tocón (a 20 cm sobre el nivel del suelo), altura total, altura de fuste (excluyendo el raberón a partir de 7,5 cm), diámetro a 2,40 m de altura, diámetro a la mitad de la altura total del árbol, diámetro al final del tronco (si era distinto por alguna razón de 7,5 cm), diámetro de copa y longitud y diámetro de las ramas. También se medía el crecimiento en los últimos 5 años con la barrena de Pressler y el espesor de la corteza con la ayuda de un calibrador	Se seleccionaban los cuatro árboles en las direcciones N, S, E y O, que cumpliesen las siguientes condiciones: tener diámetro normal mayor de 12,4 cm, pertenecer a las especies forestales de interés, y no pertenecer a las categorías correspondientes a la peor forma y peor calidad (categorías 6). De ellos se tomaban los siguientes datos considerando en este caso la forma de cubicación: diámetro normal, altura total, altura de fuste, altura al primer verticilo de ramas vivas, diámetro a 4 m de altura, diámetro fin de fuste, diámetro de copa. También se estimaba el crecimiento en los últimos 5 años con la barrena de Pressler y el espesor de la corteza

El total de pinos marítimos del Norte que se emplearon como árboles tipo para la elaboración de las distintas ecuaciones aparece en este cuadro. Hay que tener en cuenta que las Formas 1 y 2 suponían el 78% de esos pinos elegidos como árboles tipo en IFN1 y el 79% en IFN2. Se aprecia que las Clases Diamétricas inferiores eran dominantes en la muestra inicial, pero con el tiempo ha ido aumentando el volumen acumulado en CD mayores:

CD (cm)	Muestra pinos IFN1	Muestra pinos IFN2	VCC total IFN2 (m^3)	VCC total IFNN (m^3)
10	2.276	421	2.420.000	2.911.150
15	2.768	5.088	4.997.000	3.742.777
20	2.356	3.646	7.681.000	4.732.934
25	1.764	5.055	8.881.000	5.830.525
30	1.110	3.830	9.074.000	6.222.166
35	628	2.643	7.218.000	6.091.050
40	291	1.394	5.101.000	5.711.993
45	138	1.894	2.628.000	3.991.550
50	79	852	1.561.000	3.210.013
55	28	382	772.000	2.902.507
60	12	178	401.000	1.614.388
65	4	76	183.000	723.267
70	2	105	171.000	1.127.915
Total	**11.456**	**25.564**	**51.087.848**	**48.812.236**

Con la nueva muestra de árboles IFN2 se pudieron actualizar las ecuaciones de cubicación IFN1 y así se utilizaron en los procesos de datos provinciales, en las respectivas tablas del IFN2: tablas 401 de *Ecuaciones* o *Supertarifas aplicables para obtener los valores de los parámetros dendrométricos característicos por especie, forma de cubicación y parámetro*.

Las únicas ecuaciones de cubicación que se publicaron en el tomo resumen del IFN2 se referían al conjunto de todos los *P. pinaster* españoles, sin distinguir los marítimos del Norte del resto de pinares de procedencias castellanas o mediterráneas.

Formas 1 y 2: **VCC = 0,0024311 * D^1,57586 * H^0,62348 * D4h^0,46093**

Forma 3: **VCC = 0,002642 * D^1,83425 * H^0,00639 * Hf^0,46093**

Volumen maderable con corteza VCC en dm^3, diámetro D en mm, altura H en m, diámetro a 4 m de altura D4h en cm y altura a fin de fuste Hf en m

IFN más recientes

Ya a partir de IFN3 (cuyo trabajo de campo en Galicia fue realizado en 1998) y posteriores, se dispone de un gran volumen de información en parcelas remedidas varias veces, pero no se han revisado las ecuaciones de cubicación de las distintas especies. La única diferencia reseñable entre estos IFN es que en el último IFNN ha descendido la densidad de parcelas disponibles. Por ejemplo, en Galicia se ha ido pasando de unas 4.000 parcelas en IFN3 cuya especie principal era pino marítimo a sólo 925 parcelas en IFNN.

Hay que recordar que los pinos marítimos medidos en IFN2 bajo las formas 1 y 2 suponían el 78% de los pinos muestreados y el 92% del volumen. Los pinos de la forma 3 sólo suponían el 4% de los pinos y el 1% del volumen y los pinos de la forma 5 (tronco principal tortuoso, dañado o muy ramoso) suponían el 18% de los pinos y el 7% del volumen. Por tanto, tomando sólo dicha forma de cubicación 2, se pueden comparar las siguientes ecuaciones que seguían el modelo 11, salvo para el País Vasco, donde se empleaba el modelo 1. Desde el IFN3, estas ecuaciones se publican bajo el nombre *Tabla 401. Ecuaciones de cubicación aplicables por especie, forma de cubicación y parámetro dendrométrico*.

La Coruña: **VCC = 34,2 + 0,0002936 * D^2 * H**

Lugo: **VCC = 25,95 + 0,0003052 * D^2 * H**

Ourense: **VCC = 38,71 + 0,0002922 * D^2 * H**

Pontevedra: **VCC = 41,1 + 0,0002834 * D^2 * H**

Asturias: **VCC = 42,99 + 0,0002896 * D^2 * H**

Cantabria: **$VCC = 35,3 + 0,0002727 * D^2 * H$**

País Vasco: **$VCC = 0,0003944 * D^{2,09296} * H^{0,73083}$**

Volumen maderable con corteza VCC en dm^3, diámetro D en mm y altura H en m

Aunque la colección de ecuaciones disponibles es enorme, se puede intuir que el Inventario Forestal Nacional no proporciona ecuaciones de cubicación adaptadas a las masas forestales actuales. Las ecuaciones de cubicación empleadas en los últimos ciclos del IFN se elaboraron a partir de los árboles tipo de IFN1 e IFN2, cuando la muestra de edades, diámetros y alturas de los árboles era muy distinta a la actual. Para la elaboración de esas ecuaciones se empleó un escaso número de árboles gruesos, lo que supone la asunción de un considerable riesgo en el empleo de esas ecuaciones para cubicar árboles gruesos actualmente.

La única solución para contar con ecuaciones actualizadas sería reforzar esa muestra de árboles tipo incorporando árboles más viejos, gruesos y altos. La dificultad y la carestía de las labores de cubicación de árboles gruesos por métodos tradicionales son problemas prácticos, lo que podría facilitar el empleo de nuevas tecnologías.

3.- Ecuaciones de cubicación en Galicia

La publicación *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia* (Xunta de Galicia, 2009) es un gran trabajo de la Unidad de Gestión Ambiental y Forestal Sostenible de Vigo (UXAFORES). Recoge todos los avances en inventario y cubicación para las principales especies forestales gallegas, entre ellas el pino marítimo.

La ecuación de cubicación con clasificación de productos (mediante una función de perfil de tronco) para el pino pináster se basa en la cubicación de 328 árboles tipo gallegos derribados y troceados en 2002-2005:

$$V = 3,974*10^{-5} * D^{1,876} * H^{1,079}$$

Volumen del tronco con corteza V en m^3, diámetro D en cm y altura H en m

La misma publicación también incluye una tarifa de cubicación de rodal para la misma especie:

$$V = 5,480*10^{-4} * Dg^{(1,430-0,07553*l)} * Ho^{1,220} * N^{(0,7681+0,02974*l)}$$

Volumen del tronco con corteza V en m^3, diámetro medio cuadrático Dg en cm, altura dominante Ho en m y densidad del rodal N en pies/ha; l es una variable "dummy" que toma el valor 1 para la zona costera y 0 para el interior de Galicia

Por medio de una compleja ecuación de perfil de tronco, es posible incluso calcular los volúmenes de las trozas que pueden ir a distintos destinos industriales y el valor comercial de cada pino según sus dimensiones (d,H). La publicación incluye un CD-ROM con todas esas ecuaciones y también están disponibles en la *web*, acompañadas de una hoja de cálculo de Tarifas de Cubicación con Clasificación de Productos: *08_TCCP.xls* o *08_TCCP_2019.xls*.

Configuración de destinos (valores por defecto)				
Descripción	**Prioridad**	**d_{imin} (cm)**	**l_{troza} (cm)**	**Precio (€/m^3)**
Destino 1	1	18	250	24
Destino 2	2	6	200	12
Destino 3	3	6	200	12
Destino 4	4	6	200	12

Ejemplo de pinar gallego y portada de la publicación de Galicia.

4.- Ecuaciones de cubicación en Aquitania

La región francesa de Las Landas de Aquitania concentra cerca de un millón de hectáreas de pino marítimo y unas cortas anuales en torno a 4-5 millones de m3. Aunque el sector forestal aquitano está muy acostumbrado a la cubicación de este tipo de pinares, mantienen una polémica sobre el correcto empleo de una fórmula para calcular el volumen de madera de los pinos:

- Los propietarios privados suelen utilizar unas tarifas o fórmulas llamadas de Lapasse, basadas en la fórmula del tronco de cono: **$V=pi*h*(d0^2+d0*df+df^2)/12$**
- Para cubicaciones rápidas (V=fGH) se utiliza el coeficiente mórfico medio de f=0,43, pero no es más que una aproximación para poder comparar arbolados, pero que no sirve para obtener un valor real del volumen
- La Administración forestal (ONF) suele utilizar fórmulas distintas a las de Lapasse, pero, según la experiencia de los selvicultores, no suelen dar resultados más exactos
- Existe una *web* muy interesante denominada el portal del pino de las Landas, creado por la Comunidad de Communes de Mimizan (www.mediaforest.net) donde se recogen distintas formas de cubicación, entre ellas se pueden descargar las tarifas de Lapasse, tanto para pinares resinados como para pinares no resinados:

TARIF 3 - DÉCOUPE FIN BOUT 30 CM

CIRCONFÉRENCE en cm à 1,30 m du sol	40	50	60	70	80	90
H en m jusqu'à la découpe 30 cm						
2	0,030					
3	0,033	0,051	-	-	-	-
4	0,045	0,066	0,092	0,121	-	-
5	0,052	0,073	0,101	0,131	0,168	0,210
6	0,063	0,090	0,122	0,156	0,198	0,246
7	0,072	0,099	0,131	0,169	0,215	0,264
8	0,083	0,114	0,152	0,196	0,246	0,303
9	-	0,125	0,166	0,210	0,265	0,326
10	-	0,143	0,186	0,235	0,297	0,366
11	-	0,149	0,199	0,252	0,312	0,388
12	-	-	0,221	0,277	0,350	0,425
13	-	-	0,231	0,293	0,364	0,452
14	-	-	0,251	0,323	0,401	0,488
15	-	-	0,267	0,341	0,414	0,514
16	-	-	-	-	0,448	0,545
17	-	-	-	-	-	0,576

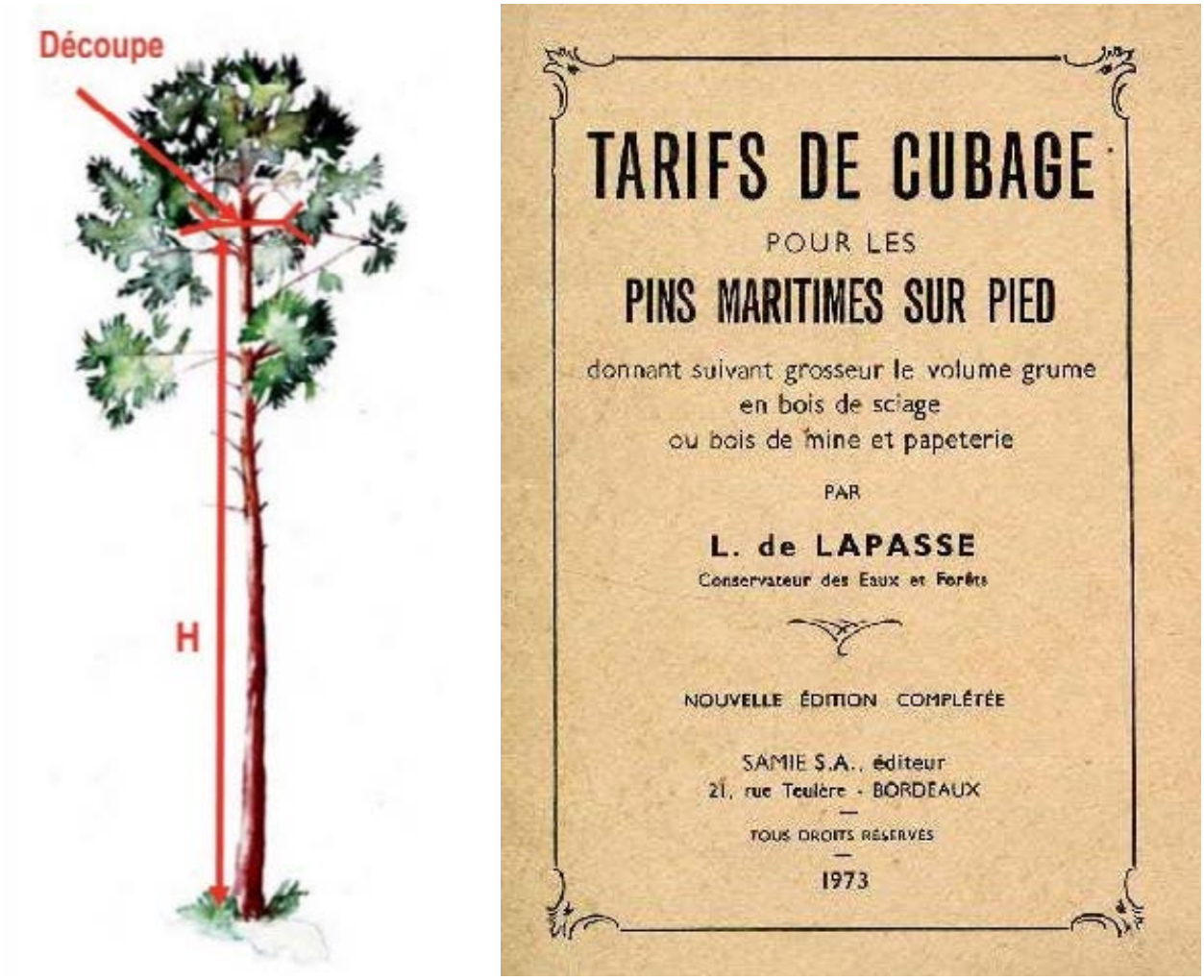
TARIF 4 - DÉCOUPE FIN BOUT 50 CM

CIRCONFÉRENCE en cm à 1,30 m du sol	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
H en m jusqu'à la découpe 50 cm											
6	0,332										
7	0,376										
8	0,426	0,497	0,575	-	-	-					
9	0,465	0,545	0,631	0,724	-	-					
10	0,509	0,599	0,686	0,788	0,898	1,006	1,120	1,251	1,379	1,525	1,666
11	0,553	0,649	0,744	0,856	0,966	1,093	1,218	1,349	1,517	1,647	1,801
12	0,605	0,700	0,803	0,925	1,044	1,171	1,306	1,461	1,612	1,770	1,937
13	0,645	0,757	0,869	0,989	1,118	1,254	1,399	1,552	1,714	1,884	2,078
14	0,696	0,806	0,926	1,055	1,192	1,339	1,494	1,659	1,832	2,014	2,206
15	0,745	0,863	0,991	1,115	1,276	1,418	1,584	1,759	1,943	2,137	2,341
16	0,784	0,910	1,046	1,191	1,348	1,514	1,691	1,878	2,057	2,283	2,480
17	0,832	0,966	1,110	1,264	1,431	1,591	1,777	1,975	2,183	2,403	2,632
18	0,882	1,024	1,162	1,325	1,500	1,686	1,884	2,074	2,294	2,525	2,768
19	0,917	1,065	1,225	1,397	1,581	1,759	1,967	2,187	2,419	2,640	2,895
20	0,967	1,123	1,291	1,472	1,648	1,854	2,073	2,283	2,526	2,782	3,026
21	-	1,178	1,354	1,499	1,729	1,945	2,153	2,395	2,650	2,893	3,174
22	-	1,235	1,403	1,572	1,813	2,018	2,257	2,511	2,754	3,034	3,301
23	-	-	1,465	1,642	1,873	2,108	2,358	2,598	2,876	3,142	3,448
24	-	-	-	1,715	1,956	2,202	2,439	2,713	2,977	3,281	3,571
25	-	-	-	1,764	2,036	2,255	2,538	2,824	3,098	3,415	3,717

Extrait du tarif de LAPASSE

Un concepto interesante que se emplea en las tarifas de Lapasse es el de altura maderable, altura comercial o altura a la que se alcanza un determinado diámetro mínimo de corte, llamado diámetro maderable o diámetro en punta fina o delgada (*découpe*), que puede ser de 9,5 cm (correspondiente a una circunferencia Cn de 30 cm) para pinos destinados a madera delgada o de 16 cm (circunferencia Cn de 50 cm) si el pinar se va a destinar a madera de sierra. En general, se suele distinguir entre madera industrial (*bois d'industrie*: Cn< 80 cm), madera de sierra de pequeñas dimensiones (*bois petit sciage*: 80<Cn<110 cm) y madera gruesa (*bois d'oeuvre*: Cn> 120 cm).

La madera destinada a la industria (pasta o tablero), llamada postes o *poteaux*, procede generalmente de claras y de pinos de volumen unitario inferior a 0,4 m^3/pino. En la primera troza de los pies más gruesos se puede aprovechar también una clase intermedia llamada *canter*, es decir, madera de un diámetro comprendido entre 14 y 22 cm.



Ejemplo de altura H de un pino hasta un determinado diámetro en punta fina y portada de la publicación de Lapasse.

Estas tablas o tarifas de Lapasse son muy difíciles de transformar a una fórmula matemática, ya que sus valores van variando según las observaciones del autor referentes al *défilement* o desplazamiento del eje del tronco respecto a la vertical y los correspondientes porcentajes de pérdida de madera. Una fórmula que se asemeja a estos valores publicados sería:

V = ((((((Cn - Cm)/(Hm - 1,3)) * 1,3) + Cn)^2 + Cm^2 + ((((Cn - Cm)/(Hm - 1,3)) * 1,3) + Cn)* Cm) * Hm /(12 * PI())) / 10000

Volumen del tronco con corteza V en m^3, circunferencia normal Cn en cm, circunferencia maderable o mínima Cm en cm y altura maderable Hm en m

La forma de cubicar pinos en pie, por tanto, se basa en medir todas las circunferencias normales de los pinos a cortar, en medir en al menos un 10% de los pinos su altura maderable (según el destino previsto de la madera) y en asignar una correcta tabla de circunferencias/alturas maderables con el fin de aplicar la tarifa o fórmula de Lapasse.

Ejemplo de pinares de Las Landas.

5.- Ecuaciones de cubicación en el conjunto de Francia

Ante la multitud de tarifas de cubicación disponibles en Francia para las diversas especies forestales, la ONF/ Office National des Forêts desarrolló entre 2008 y 2012 el proyecto EMERGE (*Elaboration de Modèles pour une estimation Robuste et Générique du bois Energie*), con el apoyo de la Agencia Nacional de Investigación y de diversas organizaciones de técnica e investigación forestal. Este ambicioso proyecto se tradujo en diversos resultados prácticos[3]: principalmente la construcción de tarifas genéricas, robustas y compatibles para diversos tipos de volúmenes (árbol completo, fuste), además del cálculo de la biomasa completa, densidad de la madera y de su poder calorífico, generalización por grupos de especies y contribuciones del láser escáner.

El primer paso fue crear una enorme base de datos de características arquitectónicas, anatómicas y ecológicas de las especies diferenciadas en el Inventario Forestal Nacional francés, es decir, más de 60 especies. Esas especies se distribuyeron por grupos a partir de análisis de correspondencia múltiple. La especie *Pinus pinaster* se incluyó en el grupo B2, emparejada, por este orden, con *Pinus sylvestris, Pinus uncinata, Pinus halepensis, Pinus mugo* y *Pinus nigra*. Otros pinos, como *Pinus cembra* y *Pinus strobus*, se englobaron en el grupo B1, junto con cedros y alerces. Las resinosas del tipo B son más bien policíciclicas, a diferencia de las especies del tipo A (abetos, píceas, cupresáceas …), lo que condiciona su crecimiento y arquitectura.

La mayoría de las tarifas de cubicación analizadas se basaba en modelos que empleaban la expresión $\mathbf{D^2{*}H}$, como ya se ha visto en IFN1. Se basa en la ley geométrica de que el volumen de un sólido de revolución depende en mayor medida de su diámetro que de su altura y ese sólido se puede asimilar a un cilindro del cual hay que detraer una parte variable que no está ocupada por el fuste. El coeficiente mórfico (f) es el factor que calcula la parte ocupada por el fuste dentro de ese cilindro imaginario.

Para el volumen total, el objetivo de proyecto EMERGE era doble: 1) construir una tarifa genérica (modelo), para todas las especies, para lo cual se trabajaba con datos y con parámetros abordado por las especies disponibles, y 2) demostrar que esas tarifas se pueden utilizar cualquiera que sea el tipo de arbolado, su estado de desarrollo o su región.

El coeficiente mórfico o coeficiente de forma fue definido por Vallet et al.[4] (2006) como *formTot*, señalando la relación entre el volumen total del árbol hasta el final de las ramas (VolTot) y el volumen de un cilindro de la misma altura y cuya sección es la superficie basal del árbol (Fig. a). Esta definición introduce un sesgo debido a la convención forestal de medir el diámetro de un árbol a 1,30 m de altura en vez de en la base. Para árboles delgados o de pequeño tamaño, el área basal se convierte en muy pequeña frente a su volumen total. Yendo al extremo, para árboles de 1,30 m de altura, el área basal es cero pero su volumen total es distinto de cero. La corrección propuesta $\mathbf{(1\text{-}1{,}3/H)^2}$ consiste en tomar como sección del cilindro la superficie extrapolada hasta el nivel del suelo de un supuesto árbol cónico (Fig. c, línea roja).

Para árboles de pequeñas dimensiones, esta supuesta forma cónica es bastante realista. Para árboles más grandes, esta corrección se vuelve insignificante. El objetivo es conseguir un nuevo coeficiente de forma, *formTot-New*, propio de cada especie y que se mantenga estable en las distintas clases diamétricas.

3 Ver *RenDez-Vous techniques de la ONF n° 39-40 - hiver-printemps 2013 y n° 44 - printemps 2014*

4 Vallet, P., Dhôte, J.-F., Moguédec, G. L., Ravart, M., & Pignard, G. (2006). *Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France*. Forest Ecology and Management, 229(1-3), 98–110.

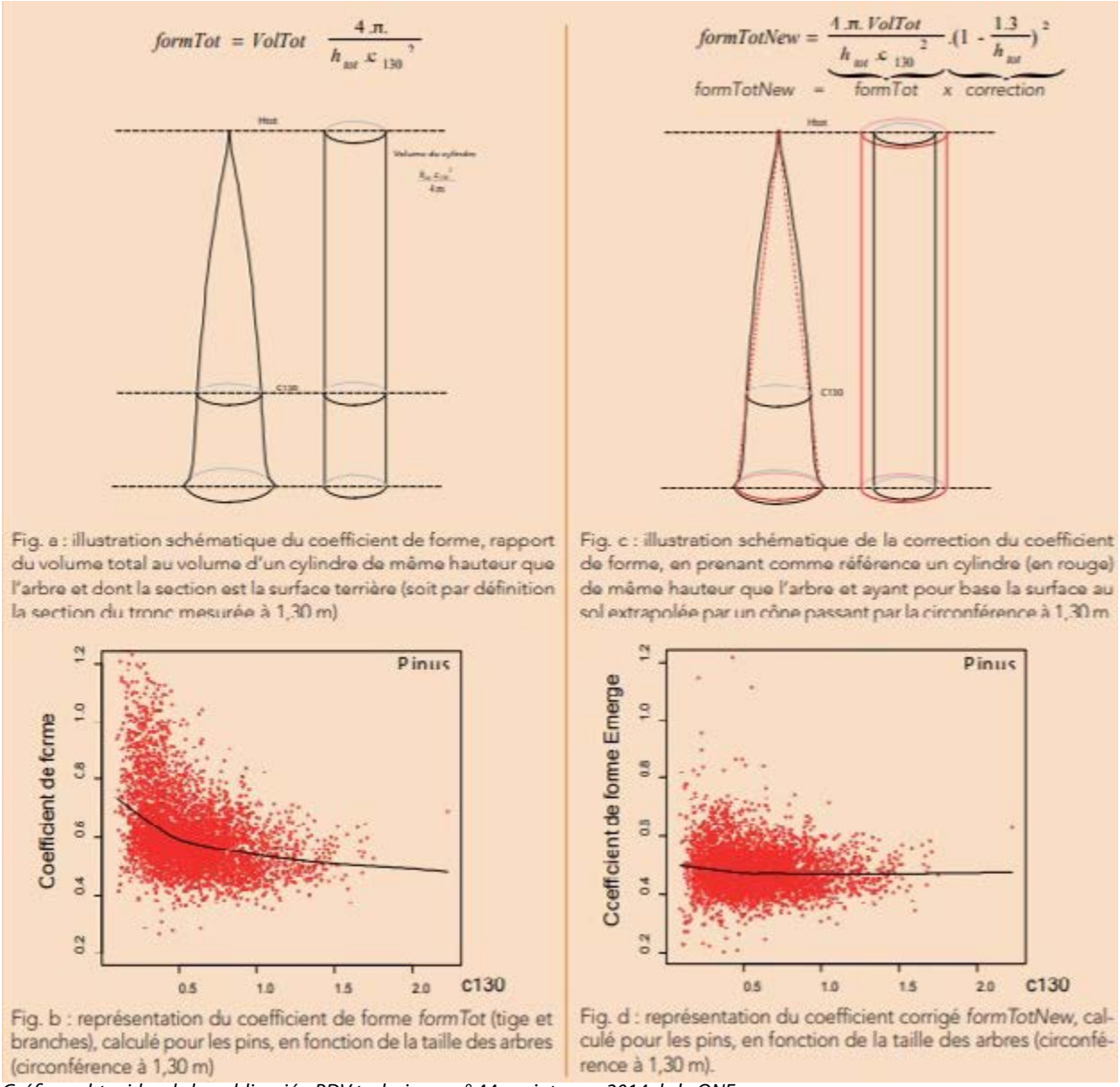


Fig. a : illustration schématique du coefficient de forme, rapport du volume total au volume d'un cylindre de même hauteur que l'arbre et dont la section est la surface terrière (soit par définition la section du tronc mesurée à 1,30 m)

Fig. c : illustration schématique de la correction du coefficient de forme, en prenant comme référence un cylindre (en rouge) de même hauteur que l'arbre et ayant pour base la surface au sol extrapolée par un cône passant par la circonférence à 1,30 m

Fig. b : représentation du coefficient de forme *formTot* (tige et branches), calculé pour les pins, en fonction de la taille des arbres (circonférence à 1,30 m)

Fig. d : représentation du coefficient corrigé *formTotNew*, calculé pour les pins, en fonction de la taille des arbres (circonférence à 1,30 m).

Gráficas obtenidas de la publicación RDV techniques n° 44 - *printemps 2014 de la ONF.*

Los autores probaron diversas variables explicativas de ese nuevo coeficiente de forma *formTotNew*. Una vez eliminado el efecto del diámetro, las variables de "robustez" (relación circunferencia$^{1/2}$/altura) y de "decrecimiento" de un árbol (relación altura/circunferencia, es decir, semejante a la esbeltez) aparecieron como las más explicativas para describir variaciones en la forma del árbol. El modelo final que explica, estadísticamente, el coeficiente de forma (sin unidades) y el volumen de un árbol (en m^3) se calcula así, partiendo de su circunferencia c_{130} y de su altura h_{tot} expresadas en metros:

$$formTotNew = a + b.\underbrace{\frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{tot}}}_{\text{robustesse}} + c.\underbrace{\frac{h_{tot}}{c_{130}}}_{\text{défilement}} \qquad formTotNew = \frac{4\pi.VolTot}{h_{tot}.c_{130}^{2}}.(1 - \frac{1.3}{h_{tot}})^2$$

$$VolTot = \frac{h_{tot}.c_{130}^{2}}{4\pi\left(1 - \frac{1.3}{h_{tot}}\right)^2}\left(a + b.\frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{tot}} + c.\frac{h_{tot}}{c_{130}}\right)$$

Según las conclusiones del proyecto EMERGE, los valores obtenidos para la especie *Pinus pinaster*, a partir de una muestra de 1.533 pinos, fueron: a=0,396, b=1,756, c=-0,002 y *formTotNew*=0,489 (la media para coníferas y para frondosas fue de 0,496).

Empleando esas mismas constantes a-b-c, las alturas medias obtenidas en el IFN1 (ver capítulo 2) se traducirían en un valor medio *formTotNew* de 0,500 para el pino marítimo del Norte, mientras que empleando las alturas medias del IFNN el valor obtenido sería de 0,451.

6.- Ecuación de cubicación en Portugal

El Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas ha publicado en 2019 el resumen del sexto ciclo Inventário Florestal Nacional de Portugal (IFN6), fechado en 2015.

En su Anexo Técnico 1.6.4 se incluyen las ecuaciones utilizadas en los cálculos de volumen y biomasa. En concreto, la ecuación de cubicación, calculada en 2007 por el equipo de Margarida Tomé, para *Pinus pinaster* (*Pinheiro-bravo*) es:

VCC = 0,7520 * (D/100)^2,0706 * H^0,8031

Volumen maderable con corteza VCC en dm^3, diámetro D en cm y altura H en m

Como curiosidad, la comparación de esta ecuación con la publicada en Galicia para el pino marítimo para los mismos diámetros y alturas medias que el IFNN, supone un mayor volumen medio de la ecuación portuguesa, con unas diferencias que varían linealmente entre el 18% (CD 10) y el 22% (CD65).

Pinar de Leiria, en Portugal.

7.- Ecuaciones de cubicación en el País Vasco

El primer Inventario Forestal del País Vasco fue realizado en 1985-1986 empleando medios propios del Gobierno Vasco, aunque siguiendo la metodología del IFN2. Entre otras novedades, presentaba unas ecuaciones de cubicación para diversas especies obtenidas a partir de árboles tipo medidos en proyectos de ordenación de montes. Las ecuaciones publicadas para *Pinus pinaster* fueron:

Formas 1 y 2: **VCC = 0,0027088 * D^0,94292 * H^0,58958 * D4h^1,12996**

Forma 3: **VCC = 0,124334 * D^1,77903 * H^0,34043 * Hf^0,47129**

Volumen maderable con corteza VCC en dm^3, diámetro D en cm, altura H en m, diámetro a 4 m de altura D4h en cm y altura a fin de fuste Hf en m

Posteriormente, HAZI elaboró en 2017 unas nuevas ecuaciones de cubicación para diversas especies productivas (7 coníferas y eucaliptos) mediante medición de árboles tipo repartidos por todo el País Vasco con la ayuda de un láser 3D. Estas ecuaciones biparamétricas o de dos entradas también iban acompañadas de ecuaciones de clasificación de productos maderables siguiendo el método de la razón de volumen, desarrollado por Chauchard y Sbrancia[5]. Las correspondientes al pino marítimo, basadas en el escaneo de 42 pinos con diámetros normales comprendidos entre 23 y 61 cm y situados en diversas plantaciones de los Territorios de Álava y Bizkaia, eran:

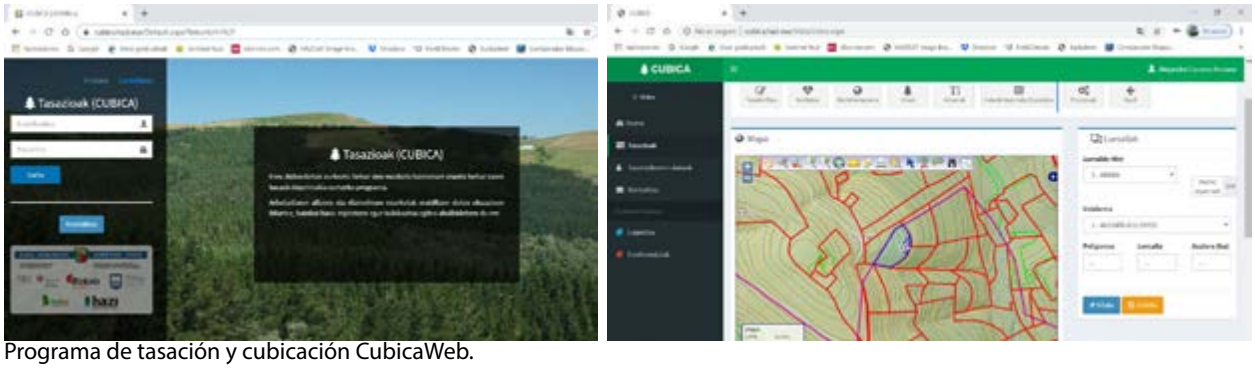
5 Chauchard, L.; Sbrancia, R.; 2005. Funciones de razón para la estimación de los volúmenes maderables de Pino radiata en el País Vasco. Invest Agrar: Sist Recur For 14(2), 185-194.

log(VTcc) = -10,6677 + 2,14662*log(D) + 0,954609*log(H)

R = 1-1,10772*(Dpf^3,04944)/(D^3,13474)

*Volumen maderable con corteza VTcc en m³, diámetro D en cm, altura H en m, con logaritmos neperianos. Para el cálculo de la razón de volumen (R), se emplea el volumen con corteza hasta distintos diámetros en punta fina (Dpf en cm); así, para poder estimar el volumen hasta 30 cm, se emplearía: V30=VTcc*R30*

La forma de cubicar pinos en pie en el País Vasco se basa en medir todos los diámetros normales de los pinos señalados para cortar, en medir en al menos un 10% de los pinos su altura total y en asignar una correcta tabla de diámetros/alturas con el fin de aplicar las fórmulas existentes y actualizadas dispuestas en el programa de tasación y cubicación CubicaWeb (https://cubica.hazi.eus/), programa gratuito disponible para uso de tasadores autorizados.



Programa de tasación y cubicación CubicaWeb.

8.- Otras ecuaciones de cubicación el País Vasco

En el marco de diversos proyectos (http://www.lifehealthyforest.com/es/ y https://www.hazi.eus/es/proyectoshazi/6768-healthy-forest.html), HAZI ha ido generando diversas ecuaciones para cubicar arbolados de *Pinus pinaster* basándose en los datos de campo de distintas parcelas IFN del País Vasco y en datos de altura dominante según distintos vuelos LiDAR, mediante el promedio de altura de los 100 árboles más altos por hectárea.

El primer modelo de cubicación se basaba en el procesado de la nube de puntos o rebotes LiDAR de cada zona cilíndrica de 25 m alrededor de cada centro de parcela para estimar una serie de parámetros relacionados con las existencias maderables u otros parámetros de cada parcela. El programa FUSION ha permitido calcular la altura dominante LiDAR 2017 a partir de la altura media de los 100 puntos de arbolado más altos de cada cuadrado de 1 ha, con una distancia de exclusión entre cada uno de esos 100 puntos/ha de 5 m. Es decir, se ha cortado cada cuadrícula en pequeños cuadrados de 5 m de lado y se ha calculado la máxima altura del árbol contenido en cada uno de ellos.

Así, se pudo elaborar la siguiente ecuación de cubicación para pino marítimo en función de esos parámetros de masa medidos en campo frente a alturas LiDAR:

VCC=-135,631335999005+6,87227495990619*medReb+14,7573093643244*HD_2017

Volumen con corteza VCC en m³/ha, alturas LiDAR medReb y HD_2017 en m

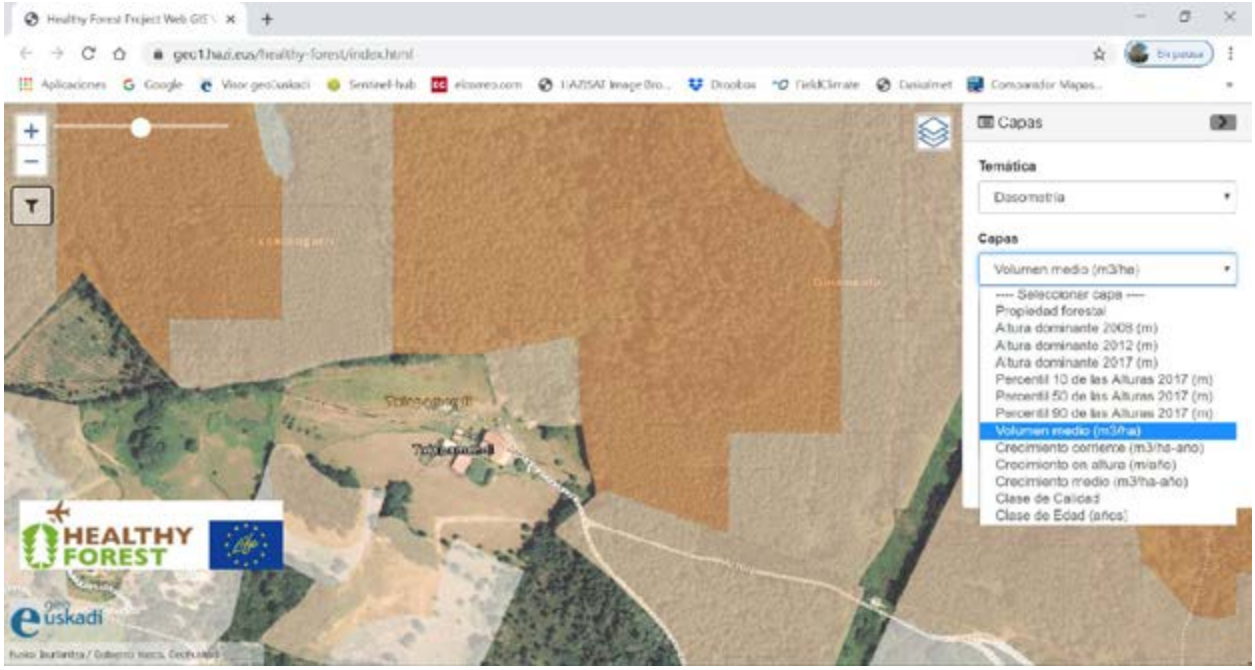
El segundo modelo de cubicación disponible en el País Vasco para *Pinus pinaster* o modelo definitivo también se elaboró a partir del IFNN y del LiDAR 2017. Los datos de campo del IFNN en el País Vasco (2017-2018) proporcionaba datos de cubicación para unas pocas especies (sólo había parcelas de campo de Pino radiata, Pino pináster y Eucaliptos), pero se necesitaba ampliar los resultados a todas las masas forestales vascas. Para ello, se recurrió a los datos ya calculados en el marco del proyecto FORRISK basados en el vuelo LiDAR de 2012 y las parcelas de campo del IFN4.

En los datos LiDAR de 2012 se pudo comprobar la buena relación existente entre VCC2012 y HD_2012, por lo que se decidió aplicar también en 2017 esa familia de ecuaciones, una para cada especie principal, con el fin de calcular VCC sólo en función únicamente de HD_2017. Hay que tener en cuenta que en el volumen VCC12 no se empleó esa variable HD_2012, sino que se calculó empleando únicamente el promedio de altura de los rebotes del arbolado situados por encima de 4 m en cada cuadrícula de 1 ha.

La fórmula que finalmente se empleó para cubicar en 2017 las masas de pino marítimo fue:

VCC=-18,2701 + 10,1785*HD_2017 + 0,120819*HD_2017^2

Volumen con corteza VCC en m³/ha, altura dominante LiDAR HD_2017 en m



Visor web del proyecto LIFE HEALTHY FOREST para poder consultar la cubicación LiDAR 2017 de las masas forestales del País Vasco: https://geo1.hazi.eus/healthy-forest/index.html.

Como ya se ha visto en el capítulo 2, los vuelos LiDAR, que en el caso del País Vasco han sido 3 hasta hoy (2008, 2012 y 2017), se pueden complementar con los cálculos realizados por fotogrametría de los vuelos anuales del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea PNOA (IGN-Gobierno Vasco). En el marco del proyecto POCTEFA Canopée (2016-2019) se han estimado los valores de altura dominante y otros parámetros calculados para cada hectárea arbolada del País Vasco a partir del vuelo de verano de 2019, por lo que se abren nuevas posibilidades en la estimación continua del crecimiento del volumen y de la productividad de las masas de pino marítimo.

9.- Otros métodos de cubicación

El reciente IFNN también ha supuesto la introducción de una nueva herramienta de inventario y cubicación, el llamado ForeStereo. Este dispositivo, desarrollado por Fernando Montes, Isabel Cañellas y Mariola Sánchez-González y patentado por el INIA-CIFOR en 2005, ha sido probado con éxito en diversas parcelas de pino marítimo, radiata y eucalipto en 2017-2018. Por medio de la toma de pares de imágenes hemisféricas, mediante técnicas fotogramétricas se realizan estimaciones a nivel de árbol individual, obteniendo medidas del diámetro a lo largo del fuste, y también a nivel de parcela, mediante estimación del área basimétrica, reduciendo el coste de toma de datos en campo respecto a la cubicación manual.

Los resultados de este estudio se enmarcan en la Encomienda de Gestión "Soporte científico a la generación de información forestal" del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (antiguo MAPA). De las 32 parcelas del IFNN muestreadas, 9 de ellas se ubicaban en masas de *Pinus pinaster*, 14 en masas de *Pinus radiata* y otras 9 en eucaliptales. Las imágenes de ForeStereo tomadas en dichas parcelas del IFNN se procesaron utilizando la aplicación de análisis desarrollada en el INIA, realizando en primer lugar la segmentación supervisada de las imágenes, que permite la identificación de los fustes mediante un proceso de crecimiento de regiones a partir de un punto del fuste definido por el usuario (ver figura). El algoritmo implementado en la aplicación utiliza los criterios de intensidad, varianza entre píxeles vecinos en dirección radial y tangencial y saturación relativa de verde, así como restricciones geométricas, para delimitar el fuste en ambas imágenes del par estereoscópico (Sánchez-González *et al.* 2016[6]). A lo largo del fuste se mide la distancia, altura y diámetro de las secciones para las que se encuentra correspondencia entre ambas imágenes en incrementos de 1º de ángulo respecto a la horizontal, utilizando las ecuaciones desarrolladas por Rodríguez García *et al.* (2014[7]), que relacionan la distancia con la diferencia entre los ángulos azimutales desde el centro de cada una de las imágenes y la distancia de separación entre las cámaras. Los árboles con más de 10

6 Sánchez-González, M., Cabrera, M., Herrera, P.J., Vallejo, R., Cañellas, I., Montes, F., 2016. *Basal area and diameter distribution estimation using stereoscopic hemispherical images. Photogramm*. Eng. Remote Sens. (PE&RS) 82, 605–616.

7 Rodríguez-García, C., Montes, F., Ruiz, F., Cañellas, I., Pita, P., 2014. *Stem mapping and estimating standing volume from stereoscopic hemispherical images*. Eur. J. For. Res. 133, 895–904.

secciones identificadas se utilizaron para ajustar 4 modelos de ecuaciones de perfil para relacionar el diámetro de las diferentes secciones identificadas con la altura de dichas secciones, siendo esos modelos:

$$Di = a + b * Hi \quad \text{(modelo 1)}$$

$$\pi * Di\,\hat{}\,2 = a + b * Hi \quad \text{(modelo 2)}$$

$$Di = a + b * \ln(Hi) \quad \text{(modelo 3)}$$

$$Di = a + b * \mathrm{sqrt}(Hi\,\hat{}\,3) \quad \text{(modelo 4)}$$

Di es el diámetro del árbol a una altura Hi, ambos en m; b es el parámetro interespecífico de la pendiente del modelo, es decir, b es único para cada especie y ecuación de perfil; a es un parámetro asociado a cada árbol individual

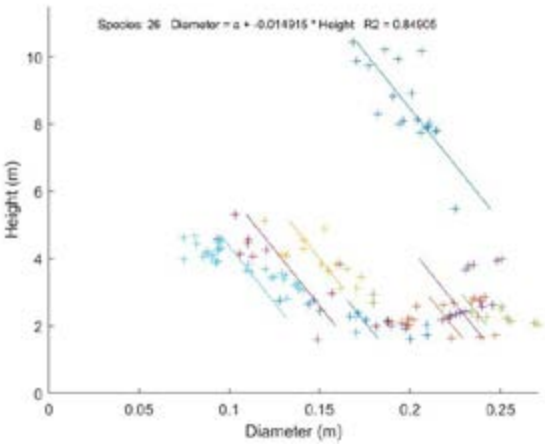
De esta forma, se evaluaron las cuatro ecuaciones para las tres especies. El estadístico R^2 alcanza valores bastante altos para todos los ajustes, siempre mayores de 0,8, siendo los modelos 1 y 4 los que en general mejor se ajustaban a esas especies, aunque la que presentaba peores ajustes (R^2 0,85 y RMSE 0.022 m) era *P. pinaster*. El número de árboles de *P. pinaster* con más de 10 secciones identificadas que reunían las características para el cálculo de las ecuaciones de perfil fue de 8, para *P. radiata* fue de 25 y para el *Eucalyptus* 10. En cuanto al parámetro b, cabe destacar que los valores del pino pináster se sitúan entre los del pino radiata y del eucalipto, con cierta tendencia del eucalipto a ser más cilíndrico y del radiata a ser más cónico.

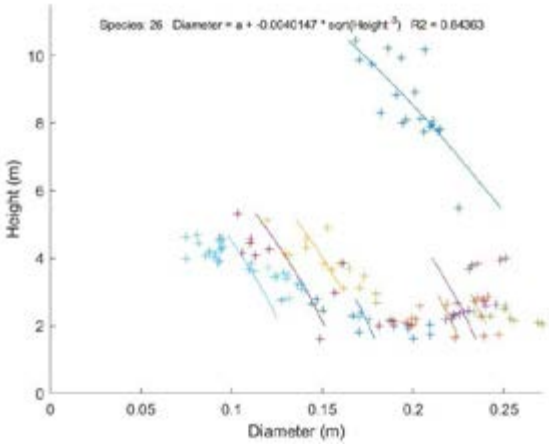
Para *P. pinaster* los mejores resultados se obtuvieron con el modelo 4 con un R^2=0,85:

Ecuación	a	b
Di = a + b * Hi	D-(b*1,3)	-0,014916
π * Di^2 = a + b * Hi	π * D^2 - (b*1,3)	-0,003264
Di = a + b * ln(Hi)	D-(b*ln(1,3))	-0,052152
Di = a + b * (Hi^3)^0,5	D-b*(1,3^3)^0,5	-0,004015

D es el diámetro normal en m; H es su altura total en m; b es un parámetro asociado a cada especie y ecuación de perfil; a es un parámetro asociado a cada árbol individual

Las figuras del ajuste de los modelos que mejor se ajustan son la del modelo 1 y el modelo 4:





Instalación del ForeStereo en dos parcelas IFNN en el País Vasco.

Ejemplos de pares de imágenes hemisféricas, con las secciones de los pinos señaladas.

Sin embargo, la muestra de pinos marítimos utilizada para este estudio no parece muy representativa de los pinares actuales, ya que el número de parcelas y árboles tipo es escaso y presenta unos diámetros normales entre 13 y 29 cm (media de 21 cm) y unas alturas entre 11 y 18 m (media de 14 m) si se utiliza el modelo 4 y alturas entre 11 y 22 m (media de 16 m) si se utiliza el modelo 1. Curiosamente, esas cifras medias se asemejan a la muestra de árboles tipo del IFN2 (pinos con diámetro medio de 26 cm y altura media de 14 m). Ello supone que los valores a y b resultantes podrían ajustarse bien a muestras de pinos más delgados, pero pueden no ajustarse bien a la muestra de árboles cercanos a la corta final empleada en este proyecto.

10.- Ecuaciones de cubicación con 3 entradas

Ya se ha comentado el caso de las tarifas de una sola entrada (diámetro o circunferencia) para obtener el volumen total, suelen ser útiles aunque la elección de una tarifa adecuada puede ser una fuente de error. La introducción de una segunda variable explicativa del volumen permite obtener ecuaciones biparamétricas válidas para un mayor rango de etapas de desarrollo o de regiones. Esta segunda variable suele ser una altura: la mayoría de las veces es la altura total del árbol, pero cuando se trata de calcular volúmenes comerciales puede ser la altura hasta un corte o diámetro concreto. A nivel europeo, en la mayoría de las tarifas disponibles suele haber una doble entrada: diámetro/circunferencia a 1,30 m y altura total del árbol.

Como ya se ha podido analizar en distintos IFN, la introducción de un tercer parámetro relacionado con la forma de los troncos (como la altura de fuste Hf o el diámetro a 4 m de altura D4h) suele suponer mejoras evidentes en la exactitud de la cubicación. Otros parámetros que también podrían incluirse, como se ha ido mostrando en las páginas precedentes, serían la altura maderable, la edad del pinar o la calidad de la estación (como índice de fertilidad), ya que guardan una gran relación con el volumen de madera unitario. Incluso factores físicos como la altitud o la orografía pueden ser interesantes para cuantificar la variabilidad observada en los árboles de una misma especie entre regiones y entre diversos tipos de arbolado.

Sin embargo, en ocasiones el costo y la dificultad de medición en campo de esos nuevos parámetros frente a los clásicos de diámetro normal D y altura total H no suelen compensar las ganancias en exactitud.

Por ejemplo, en Suecia proponen el empleo de ecuaciones de cubicación con 3 entradas para las especies escandinavas: diámetro, altura total y **altura de la copa** o corona viva.

Ya en el siglo XIX, el ingeniero forestal alemán Pressler había calculado que la altura para la cual el diámetro es la mitad del diámetro de la base del árbol, llamada "**altura de Pressler**", permitía calcular exactamente el volumen geométrico de un fuste de forma regular (cono, paraboloide o neiloide). Esta relación es la base, por ejemplo, para estimar el volumen de un fuste mediante el relascopio de Bitterlich. En Bélgica se emplea el volumen del fuste hasta dicha altura de Pressler, el llamado volumen de Delevoy, como un buen indicador del volumen de madera gruesa del fuste, especialmente para maderas de frondosas[8].

Otra tercera entrada puede ser también el diámetro a una altura fija del fuste: en Suiza se suele usar la circunferencia de un árbol a 7 metros de altura, aunque es más fácil medir ese **diámetro a 4 metros** con la ayuda de una forcípula finlandesa, como se ha visto en IFN1.

En Francia, el protocolo IFN de cubicación mide la **altura de bifurcación** (*hauteur de décrochement*), correspondiente a la altura de la primera disminución abrupta (10%) del diámetro del fuste del árbol. Hasta 2005, la circunferencia y la altura total eran los únicos parámetros comunes, medidos en todos los árboles inventariados, mientras que esa altura de bifurcación sólo era medida en una submuestra de árboles inventariados para el protocolo del volumen. Al desarrollar su nuevo método, el Inventario Forestal Nacional francés ha detectado el interés de esta variable adicional para describir variaciones de la forma de los árboles y, ya desde 2006, se unió ese tercer parámetro a la medición sistemática de todos los pies inventariados, junto con su circunferencia normal a 1,30 m y su altura total.

La posibilidad de empleo de un tercer parámetro en la cubicación de los pinos marítimos incluidos en este proyecto SiGCa-PIMA ha sido también valorada en el capítulo 5.

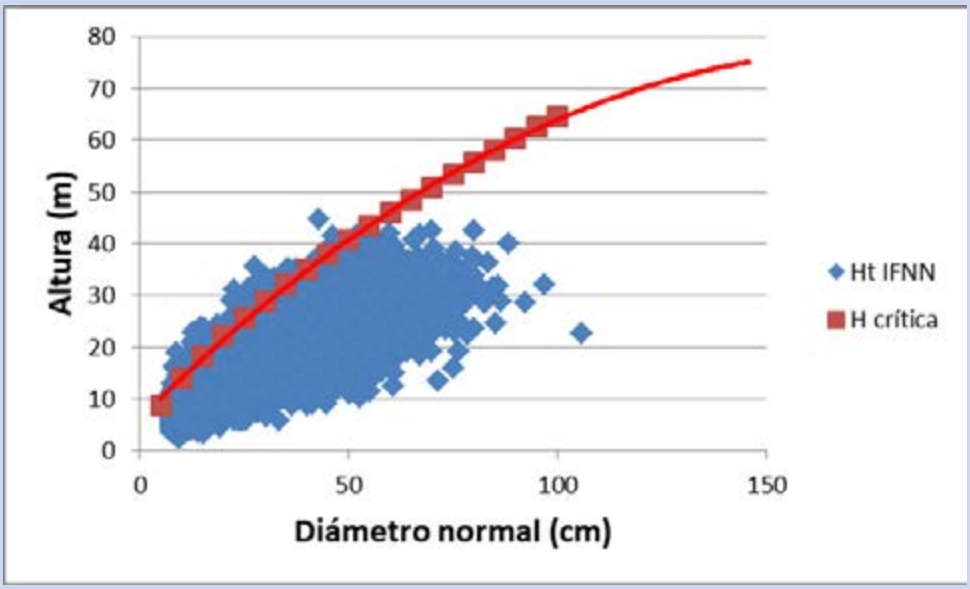
8 Rondeux , J . *Pour une définition du volume du bois d'oeuvre de nos principales essences forestières feuillues. Revue forestière française*, vol . XXVII, n° 5, 1975, pp . 371-376.

A MODO DE RECORDATORIO

El biomatemático escocés D´Arcy Wentworth Thompson (1860-1948) escribió unas interesantes ideas sobre biología y matemática en su conocida obra On Growth and Form - Sobre el crecimiento y la forma (1942):

> *El estado actual de una porción de materia, que incluye su configuración o forma, es la resultante de un conjunto de fuerzas, que representan o simbolizan las manifestaciones de varios tipos de energía.*
>
> *(…)*
>
> *Es muy curioso que Galileo hubiera sugerido precisamente la misma altura (ducente braccie alta, 300 pies, 90-10 m) como el límite máximo de la altura de un árbol. En general, como demostró Greenhill, el diámetro de un cuerpo homogéneo alto debe aumentar según la potencia 3/2 de su altura, lo que explica las proporciones más finas de los árboles jóvenes en comparación con el aspecto rechoncho y achaparrado de los grandes y viejos.*
>
> *(…)*
>
> *No solo los movimientos de las huestes celestiales deben determinarse por observación y elucidarse por las matemáticas, sino que cualquier otra cosa puede expresarse en números y definirse por una ley natural. Esta era la enseñanza de Platón y de Pitágoras y el mensaje de la sabiduría griega para la humanidad.*

El citado enunciado o Ley de Greenhill (1881) viene a afirmar que la altura crítica o máxima de un árbol era proporcional a su diámetro en la base elevado a la potencia 2/3 ($Ht \propto D^{2/3}$), como parece comprobarse en la distribución de alturas y diámetros de los pinos marítimos medidos en el reciente IFNN. La fórmula de Euler-Greenhill prevé que la biomasa máxima del tronco de un árbol es proporcional a su diámetro en la base elevado a la potencia 8/3 ($M \propto D^{8/3}$).



La conocida Ley de Yoda (1963) para evaluar la densidad de un rodal se basa en la ley del auto-aclareo (relación máxima densidad-tamaño) o ley de los -3/2: $w = k * N^{-3/2}$. En escala logarítmica, la relación entre el número de árboles por unidad de superficie y su biomasa media unitaria es una relación lineal con una pendiente universal de -1,5 (ver página 168). En dasometría se puede utilizar, por tanto, el volumen promedio de los árboles y el número de árboles por unidad de superficie para evaluar la espesura de un rodal.

5.- RESULTADOS DEL PROYECTO SIGCA-PIMA: CUBICACIÓN

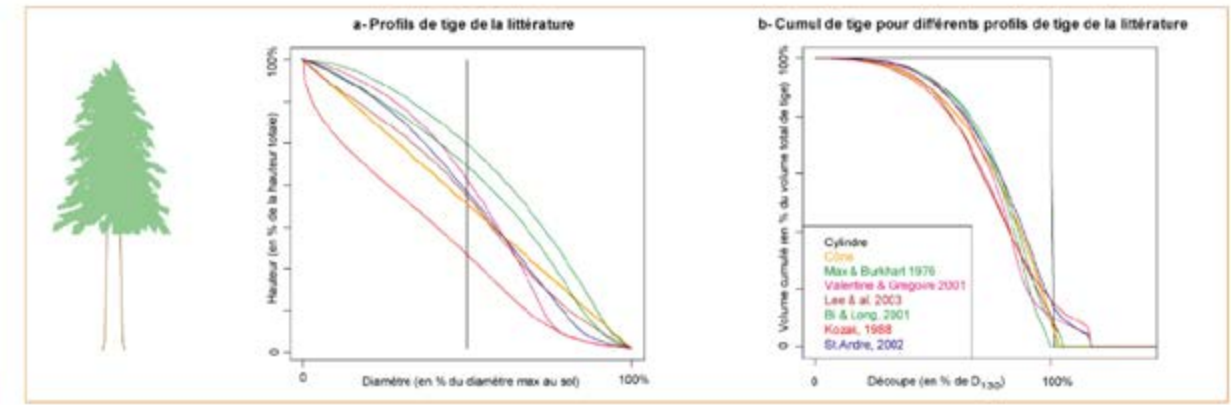
Alejandro Cantero Amiano
HAZI Fundazioa

1.- Introducción

En este capítulo se describen los trabajos realizados por HAZI en el marco del presente proyecto SiGCa-PIMA. Se han centrado en la búsqueda de unas ecuaciones de cubicación adaptadas a las actuales masas de pino marítimo en el Norte de España, probando diversas herramientas para la toma de datos en campo y para el cálculo de los volúmenes de madera.

Obviamente, al ser SiGCa-PIMA un proyecto colectivo, se ha trabajado en coordinación con el resto de socios en la planificación de la muestra elegida y en las distintas fases del trabajo. Los principales resultados del proyecto se explican en el último capítulo, dejando para las siguientes líneas la explicación de la tarea de HAZI en cuanto a la determinación de unas ecuaciones de cubicación actualizadas para *Pinus pinaster*. Estas ecuaciones serán principalmente del tipo V=f(d,h), ya que son las más usadas, aunque se van a probar otras posibilidades.

De todas formas, no se deben esperar resultados perfectamente adaptados a cualquier tipo de pinar, de cualquier edad o calidad. Como se ha visto en capítulos anteriores, la forma de crecimiento de los pinos es muy variable, dependiendo de su genética, de sus condiciones naturales de vida y de la selvicultura, lo que imposibilita la asunción de una ecuación de cubicación perfecta. Por tanto, lo que se espera conseguir es una serie de ecuaciones generales, que se puedan adaptar a la mayor parte de los pinares en la actualidad con el menor margen de error posible.



Representación de 8 modelos de perfil de tronco (a) y del volumen acumulado de madera (b). Imagen tomada de la publicación RDV techniques n° 44 - *printemps 2014 de la ONF.*

2.- Selección de parcelas y árboles

El esquema de trabajo en la elección de las parcelas SiGCa-PIMA fue consensuado entre todos los socios y se enmarca en la fase R1 del proyecto "Inventario cuantitativa y obtención de una muestra representativa de las masas de pino marítimo a nivel nacional". El día 17 de junio de 2019 tuvo lugar una reunión entre AGRESTA y FÖRA en las oficinas de esta última empresa en Soria con el objetivo de dejar cerrada la planificación y organización de la toma de datos en las parcelas de muestreo, con estos criterios:

- Se plantea inicialmente elegir 36 parcelas, 3 de ellas en cada uno de los 12 sectores o tipologías elegidos en función de 3 clases de edad/calidad y 4 clases de densidad (fracción de cabida cubierta FCC) del pinar. Los datos procesados por FÖRA de los últimos vuelos LiDAR de estas parcelas ayuda a sectorizar las distintas parcelas en esos 12 sectores.
- Posteriormente, se decidió reducir de 12 a 8 tipologías, dada la dificultad de encontrar 3 parcelas en cada una de ellas. Se clasifican, por tanto, en 8 tipologías según 2 clases de edad (FM-fustal medio y FA-fustal alto), 2 clases de calidad (Alta y Media) y 2 clases de FCC (60-70% y 75-100%).
- Se da prioridad a zonas de corta inmediata, es decir, pinares cuya corta final estuviera prevista en los siguientes meses y que se pudieran aprovechar en este proyecto con el objeto de seleccionar 10 pinos en cada una de las parcelas elegidas.
- Se da prioridad también a las zonas de corta propuestas por el aserradero EXFOPINO. Obviamente, estas se ubican en diversas zonas de Galicia, aunque también se ha diversificado la muestra incluyendo sendos grupos de parcelas en Asturias, en Cantabria (Liencres) y en el País Vasco (Larrabetzu y Galdakao, Bizkaia).
- Personal de las empresas AGRESTA y FÖRA procede en campo a elegir, geoposicionar, medir y numerar con pintura los 10 árboles seleccionados por parcela, seleccionados como muestra representativa de la masa y ubicados dentro de un radio de 14,1 m alrededor del punto seleccionado como centro de la parcela.
- La empresa MADERA+ se encarga de medir, mediante técnicas no destructivas (NDT), la calidad de la troza basal de cada árbol en pie.
- La madera y transporte de los 10 árboles extraídos por parcela se pagará por parte de EXFOPINO a los propietarios o, en su caso, a los adjudicatarios del aprovechamiento, pactando un precio en peso o volumen.

Los parámetros que se miden secuencialmente en cada parcela son:

- Centro de la parcela (a partir de la estaca previamente colocada por MADERA+)
- Rumbo y distancia de los 10 árboles de la submuestra. FÖRA
- Diámetro en cruz de los 10 árboles de la submuestra, indicando número de árbol (indicado con spray por Madera+) siguiendo el orden. AGRESTA
- Altura total de los 10 árboles de la submuestra (dos alturas por árbol). FÖRA
- Altura de la base de la copa o Altura de la primera rama viva en los 10 árboles seleccionados. FÖRA
- Diámetro del resto de los árboles de la parcela. AGRESTA
- Datos cualitativos de la parcela. FÖRA
- Foto 360º y dos fotos (norte y sur). FÖRA
- Altura total de los 10 árboles de la submuestra. FÖRA
- Otros datos selvícolas cualitativos: AGRESTA
  - Matorral: % ocupación y altura
  - Gestión realizada observable: podas, claras, ninguna, etc.
  - Procedencia: repoblación o natural.
- No se barrenan los pinos ni se mide edad ni espesor de corteza, ya que son parámetros a determinar en aserradero.

Además de las mediciones por MND, MADERA+ se encarga de tomar dos tipos de datos:

i. Calidad visual cada 4 metros, en 4 trozas máximo: haciendo coincidir con la longitud de trozas que posteriormente se hagan para los estudios de resistencia, etc.

ii. Calidad visual por trozas según industria: haciendo coincidir la calidad a la longitud y diámetro mínimo en punta que exige la industria.

Equipo de FORA localizando y marcando una parcela de Larrabetzu.

RESULTADOS	ACTIVIDADES DE EJECUCIÓN	MIEMBROS PARTICIPANTES	RESPONSABLE DEL RESULTADO
R1	Recopilación de vuelos y datos de LIDAR aereo en las zonas de muestreo establecida	FORA	AGRESTA
	Establecimineto de muestreo a nivel nacional.	AGRESTA	
	Preparación de zona de muesteo y toma de datos selvicolas en cada parcela.	AGRESTA, HAZI, FORA	
	Inventario cuantitativo de las masas de Pino Maritimo existentes en base a a todos los resultados obtenidos.	FORA	
R2	Aplicación de Lidar terrestre en zonas de muestero.	HAZI	FORA
	Desarrollo de ecuaciones de cubicación y de perfiles para distintos tipos morfológicos de árboles en pie y en montes con y sin gestión.	HAZI	
	Delineación de copas e identificación de copas y árboles aprtir de información LDAR aerotransportada.	FORA	
	Desarrollo de modelos de cubicación precisos a partir del control de variables de interés. Modelos que ofrecerán información no solo en volumennes sino también en tipologias productos en base a los estandares desarrollados en el R1.	FORA	
R3	Aplicación de técnicas acústicas en pies incluidos en las parcelas objeto de estudio.	MADERA PLUS	MADERA PLUS
	Meta-Analisis de los datos recopilados para examinar los patrones generales de efectos en las distintas variables en el valor de la propiedad técnologica de la madera.	MADERA PLUS	
	Aplicación modelos de prediccion preexistentes para la precalsificación tecnologica de la madera.	MADERA PLUS	
	Desarrollo plataforma informatica SIG para asignacion indice de calidad.	MADERA PLUS	
R4	Desarrollo trabajos explotación forestal	EXFOPINO.	CESEFOR.
	Clasificación de la madera en rollo 100 trozas	MADERA PLUS, CETEMAS, CESEFOR.	
	Desarrollo de trabajos de transformación de la madera.	EXFOPINO, CETEMAS, CESEFOR.	
	Clasificación de madera aserrada al menos 500piezas	MADERA PLUS, CETEMAS, CESEFOR.	
R5	Clasificación estructural (madera destinada para construció) 100 trozas, 500 piezas en humedo y 500 piezas en seco.	MADERA PLUS, CETEMAS, CESEFOR.	

Salvo las parcelas de Asturias (julio 2020) y Cantabria (julio-agosto 2019), a principios de julio de 2019 ya estaban elegidos y marcados todos los pinos del proyecto, por lo que ya se pudo comenzar la siguiente tarea por parte de HAZI, la elección de la submuestra de pinos a escanear mediante distintos tipos de láser 3D.

En Tineo (Asturias) solo fue posible medir una sola parcela (34) y en Bizkaia, por problemas ligados a la pandemia y a la propiedad, finalmente no se realizó la corta del pinar ni de los 30 pinos elegidos. Al no poder cortarse los pinos de Larrabetzu, tuvo que levantarse en julio de 2020 una parcela extra (99) en el MUP colindante de Galdakao, con un pinar de edad y calidad semejante al de las 3 parcelas iniciales de Larrabetzu (23, 24 y 25), parcela extra de la que partieron 10 pinos más hacia EXFOPINO.

Ubicación de las parcelas del proyecto SiGCa-PIMA.

3.- Escaneado de los pinos

El escaneo o escaneado de un objeto o de un paisaje ("escena") consiste en el empleo de un láser escáner para obtener la mayor información posible de ese objeto o paisaje, mediante una nube de puntos de la geometría existente, y transmitirla a un modelo en 3D que se puede utilizar después con un programa adecuado con el objeto de medir distancias, superficies o volúmenes. El escáner 3D se basa en la emisión de un haz de luz láser, el cual incide sobre un elemento y rebota volviendo al escáner, calculando así la distancia a cada punto. El escáner posee un espejo el cual gira a gran velocidad sobre un eje rotacional sobre el que se emite el láser, que proporciona ese haz de luz. Los puntos así generados se pueden transformar en una superficie o en un volumen continuo mediante un *software* adecuado.

La llamada metodología de trabajo virtual en tres dimensiones (*Building Information Modelling*-BIM) mediante láser 3D se está imponiendo desde hace años en diversas disciplinas técnicas gracias a su ahorro de costos y facilidad de trabajo: arquitectura, arqueología, minería,…

Por dar un ejemplo, la Generalitat catalana lleva trabajando desde 2016 a través de una comisión interdepartamental para la implantación de una BIM para la obra pública y para las obras de edificación promovidas por la Administración. Está previsto que se aplique BIM en todos los contratos con un presupuesto de licitación a partir de 5 millones de euros para las obras y concesiones de obras públicas y de 200.000 para los contratos de suministro y de servicios. Por debajo de esa cantidad, el BIM se podrá establecer como criterio a valorar en los pliegos de prescripciones técnicas o en los documentos descriptivos, o bien como condición de ejecución en los pliegos de cláusulas administrativas particulares. Incluso está previsto que la empresa contratada ceda una copia del proyecto finalizado como BIM en el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). El ICGC podrá utilizar la información proporcionada por el BIM para actualizar de manera rápida y precisa sus bases de datos de geoinformación[1].

Hay que tener en cuenta que el láser escáner no sólo realiza el levantamiento de puntos, sino que también este tipo de herramientas suelen incorporar una cámara para poder tomar imágenes y generar una vista panorámica de 360º, imágenes que sirven de apoyo para colorear la nube de puntos generada. En el tema forestal, la posibil-

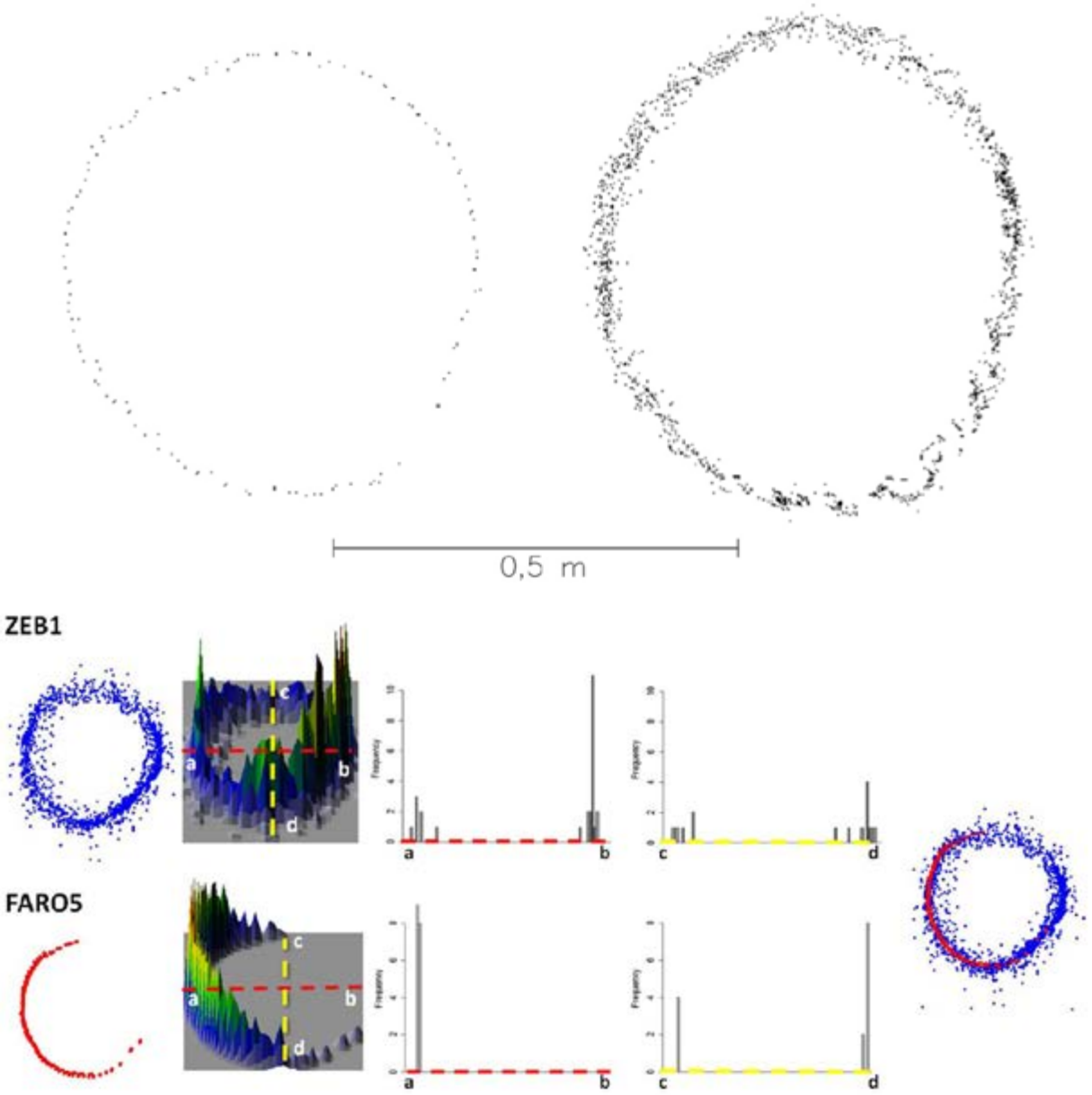
1 Normativa disponible en http://territori.gencat.cat/ca/01_departament/04_actuacions_i_obres/BIM/normativa_BIM/

idad de contar con nubes de puntos en color real es fundamental para la medición de ciertos parámetros y para visualizar, por ejemplo, la pintura que se emplea para numerar los troncos.

Los láser 3D empleados de forma manual suelen denominarse TLS (*Terrestrial Laser Scanner*), para diferenciar de los láseres incorporados en medios aéreos o motorizados (LiDAR). Los TLS se suelen clasificar en dos grupos: estacionarios y móviles.

- Los láseres estacionarios son los primeros escáneres que se usaron para el levantamiento de nube de puntos terrestres. Estos equipos presentan una gran precisión, con una desviación milimétrica. El funcionamiento se basa en estacionar el escáner en una base estable o trípode para realizar el barrido. Se suelen emplear unas esferas o unas dianas fijas colocadas de forma adecuada para poder unir o relacionar las distintas nubes de puntos generadas en los distintos estacionamientos.
- Los láseres móviles son más recientes y más adaptados para realizar escaneos o levantamientos en zonas poco accesibles o con firmes muy inestables. De tamaño mucho más reducido y con una menor precisión en sus puntos, su empleo permite no tener que estacionar, sino poder desplazarse a lo largo de todo el recorrido mientras se escanea y se toman los puntos de forma continua. Suele ser adecuado seguir recorridos circulares para una correcta toma de datos, acabando el escaneado en las cercanías del punto donde se comenzó.

Un ejemplo de láser móvil o de mano es el ZEB-REVO de GeoSLAM, un láser escáner giratorio ligero y portátil. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta menor precisión de los escáneres de mano frente a los láseres estacionarios puede repercutir en unos mayores errores en las mediciones o, como en el ejemplo de comparativa tomado de la página de Computree, en una sobre-estimación de los diámetros obtenidos por un láser móvil ZEB1 frente a los que proporciona un láser estacionario FARO.



Dado el interés innovador de este proyecto SiGCa-PIMA, se ha creído conveniente emplear diversos tipos de escáneres para la toma de datos en las parcelas de campo y para la comparación de los resultados obtenidos.

Láser FARO

HAZI ha empleado el láser escáner del modelo FARO Focus3D 120 en el escaneo de las parcelas 18, 19, 20 y 21 de Pontevedra y 23, 24 y 25 del País Vasco, durante los primeros días de julio 2019. Este modelo de la empresa americana FARO fue el primero de la gama de pequeño tamaño y compacto, con la cámara integrada. Pesa unos 5 kg y presenta una pantalla táctil con un interfaz muy fácil de usar. Sus características principales son:

Precisión: hasta ±2mm

Distancia de medición: entre 0,6 m y 120 m

Velocidad de medición: hasta un millón de puntos/segundo

Normalmente, un escaneo con fotografías dura cerca de 10 minutos con las opciones estándar de calidad y precisión elegidas y se han empleado unos 5 escaneos por parcela. Se ha solido emplear un primer escaneo central en cada parcela y otros 4 escaneos desde las 4 esquinas imaginarias de esa parcela, tratando de que se vea bien el número de cada árbol elegido y de que los troncos sean visibles al menos desde dos posiciones.

La tarea que más suele retardar este trabajo de escaneado es el posicionamiento de bolas fijas (las empleadas por HAZI son de diámetro 20 cm) para la unión de los escaneos y, posteriormente, el manejo del gran volumen de información recogido.

Hay que recordar que el FARO Focus3D 120 es el láser escáner elegido por la Administración francesa para su empleo en las parcelas de su IFN. Ello ha facilitado el desarrollo de la plataforma Computree por parte, entre otros promotores, de la ONF.

*L*áser escáner FARO Focus3D.

Láser RTC360 de Leica

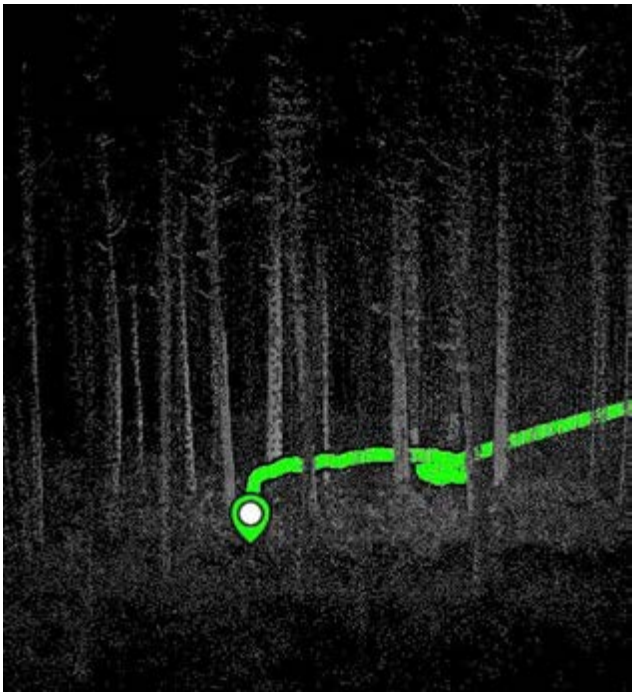
HAZI ha subcontratado a la empresa Global Geosystems el empleo de este láser escáner en el escaneo de las parcelas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12 y 13 de Galicia, durante los primeros días de julio 2019. Este modelo de la empresa suiza Leica Geosystems sigue el modelo del Focus3D y lo mejora, al ser más moderno y avanzado. Su aplicación para dispositivo móvil Leica Cyclone FIELD 360 registra automáticamente los escaneos en tiempo real y, posteriormente, el software de oficina Leica Cyclone REGISTER 360 permite integrar esta metodología BIM a cada ritmo de trabajo.

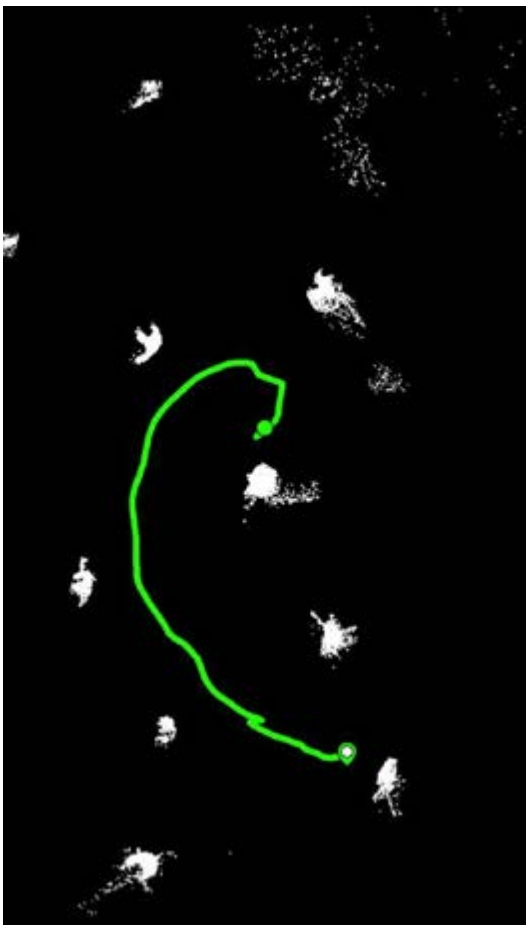
Esa es precisamente la gran ventaja de este láser escáner Leica RTC360, la posibilidad de acelerar la captura 3D hasta unos 2 millones de puntos por segundo y de contar con una nube de puntos 3D en color que puede completarse en menos de 2 minutos por escaneo. Además, el registro de campo automatizado no necesita de dianas, sino que emplea un sistema inercial para ir uniendo los distintos escaneos en tiempo real, mientras el láser se posiciona de un punto a otro y sin necesidad de GPS. Al poderse conectar con un móvil o una *tablet*, se puede ir viendo el resultado de cada escaneo *in situ*, por ejemplo, mientras se realiza el siguiente escaneo.

Láser escáner *Leica RTC360*.

Láser de mano Leica BLK2Go

En 2019, Leica y Autodesk han lanzado el nuevo BLK 360, que es un escáner 3D diseñado para un uso muy simple y enfocado para interiores. El BLK 360 puede completar un escaneo 3D de 360º en solo 3 minutos. Es muy





*L*áser escáner *Leica BLK2Go.*

pequeño (16 cm de alto y 10 cm de diámetro), pesa menos de 1 kg y sólo tiene un único botón. Es capaz de capturar 360.000 puntos por segundo con un alcance de 60 metros y una precisión de 4 mm, pudiendo incorporar imágenes térmicas, imágenes láser y luz visible.

En 2020, Leica ha lanzado al mercado el láser de mano BLK2Go, que es una versión simple del BLK 360 y ya no es estacionario, sino móvil. Se ha probado su empleo para escanear algunas parcelas siguiendo un recorrido circular, empezando y acabando el recorrido en el mismo punto. Sin embargo, presenta la limitación de que su distancia máxima efectiva de escaneo es de 25 m, lo que dificulta su empleo en la medición de árboles altos o lejanos.

HAZI ha alquilado el empleo de un láser escáner de mano BLK2Go en el escaneo de las parcelas 23, 24, 25 y 99 del País Vasco, junto con las 3 de Cantabria, durante el mes de junio 2020. Las nubes de puntos conseguidas permitirán ir analizando la evolución de esos fustes.

4.- Procesado de las secciones

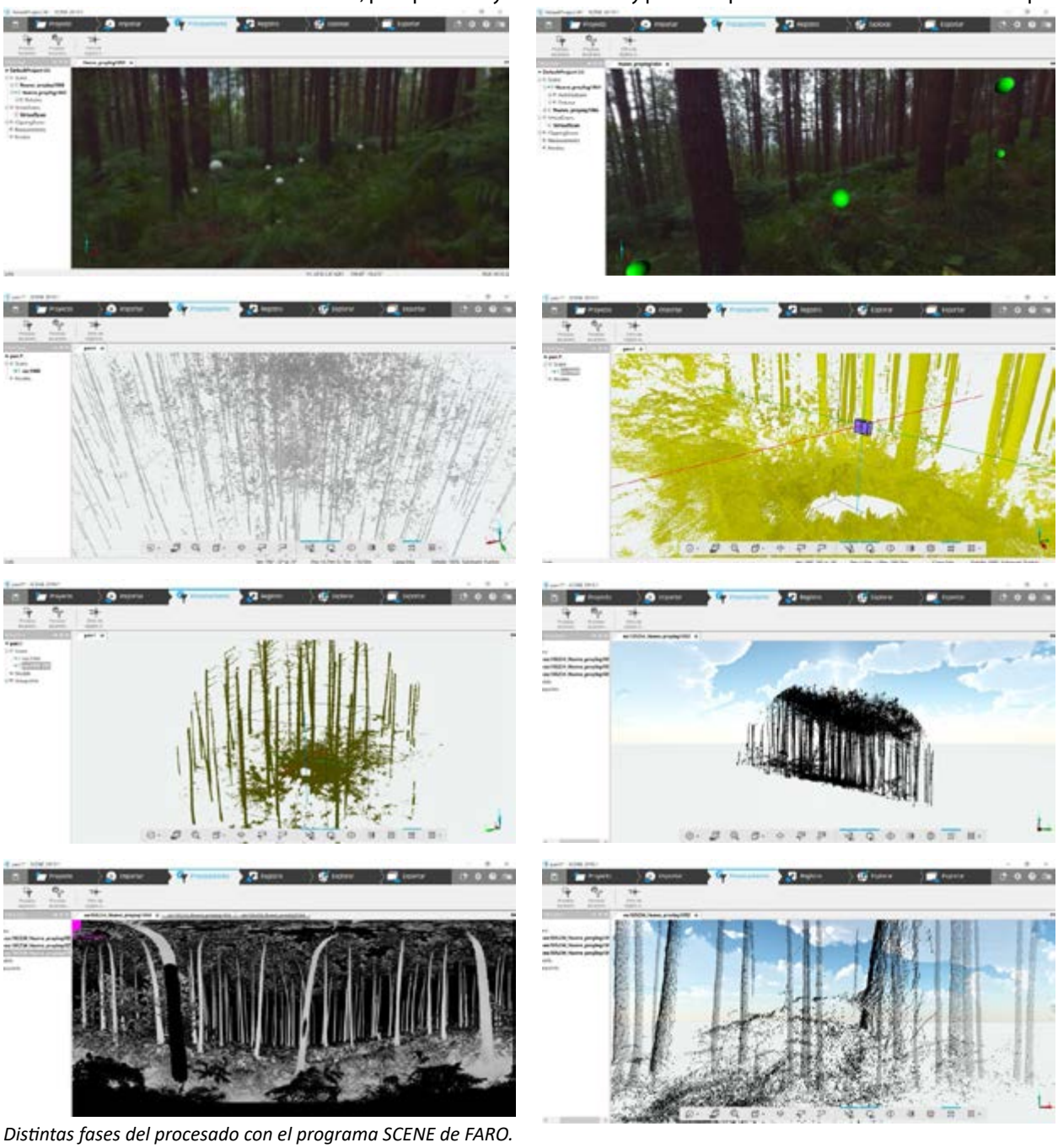
El procesado de las nubes de puntos es la operación que permite, mediante los programas o *softwares* correspondientes, unir las nubes de puntos 3D a partir de escáneres láser o, incluso, de fotografías adecuadamente tomadas. El objetivo es la creación fotogramétrica de esas nubes de puntos y su transformación a superficies continuas, mediante el mallado. El procesado es una tarea compleja y puede conllevar errores importantes si no se ha realizado bien la unión de los escaneos.

En este trabajo, se han procesado las distintas nubes de puntos tomadas en campo para poder modelar en 3D los 10 pinos de cada parcela y proceder a su seccionamiento, de forma que se pueda medir el perímetro o diámetro en cruz de los troncos a distintas alturas y así cubicarlos.

Programa SCENE de FARO

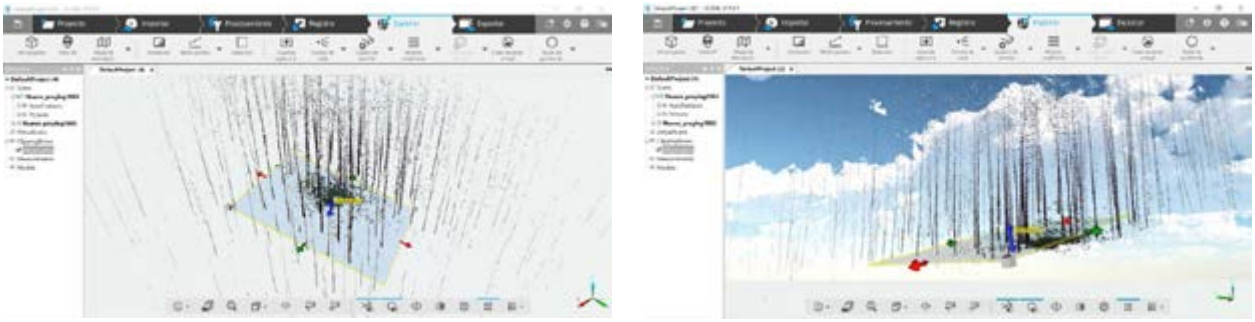
El *software* SCENE ha sido diseñado para todos los escáneres láser Focus y de otros fabricantes. Aunque está diseñado para procesar y administrar datos de los escaneados de forma sencilla y eficiente, su coste de actualización y los errores que conlleva la medición en campo de diversos escaneos unidos mediante bolas fijas ha dificultado su empleo

en el presente proyecto. No obstante, se ha empleado la última versión del programa SCENE (disponible de forma gratuita durante un mes en la web de FARO[2]) para procesar y unir escaneos y para comprobar ciertas mediciones de campo.

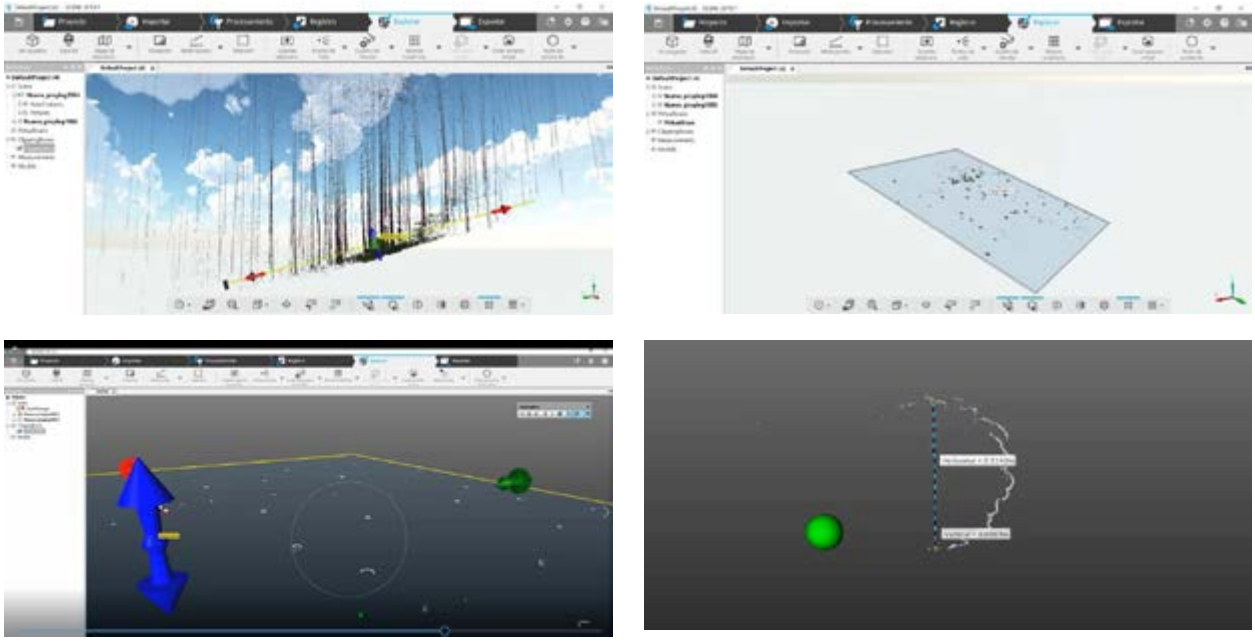


Distintas fases del procesado con el programa SCENE de FARO.

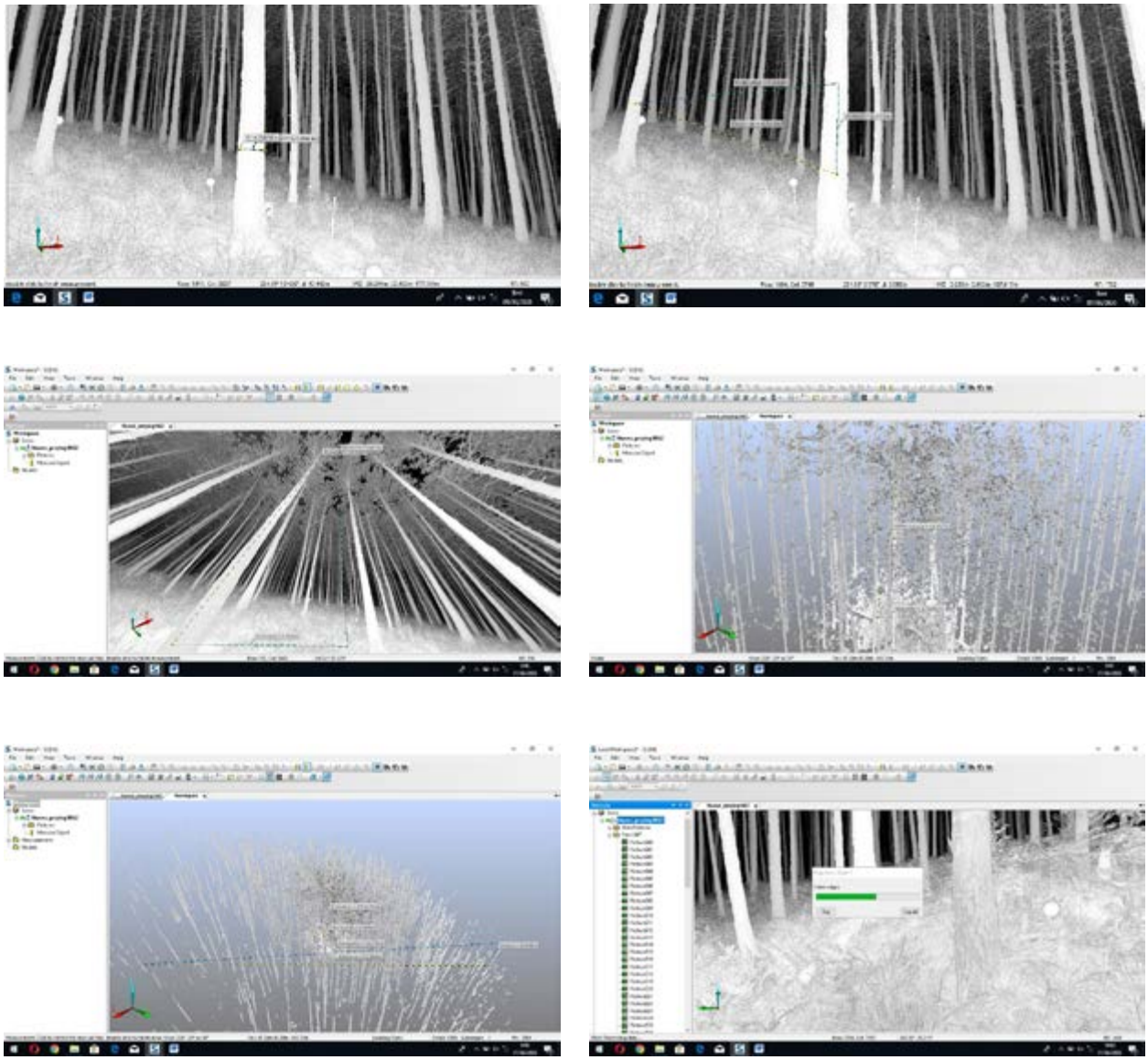
Una vez procesada la unión de las nubes de puntos, el programa SCENE permite realizar el seccionado de los troncos de forma automatizada mediante la opción *clipping box*, repitiendo a diversas alturas los cortes mediante planos inclinados y paralelos al terreno.

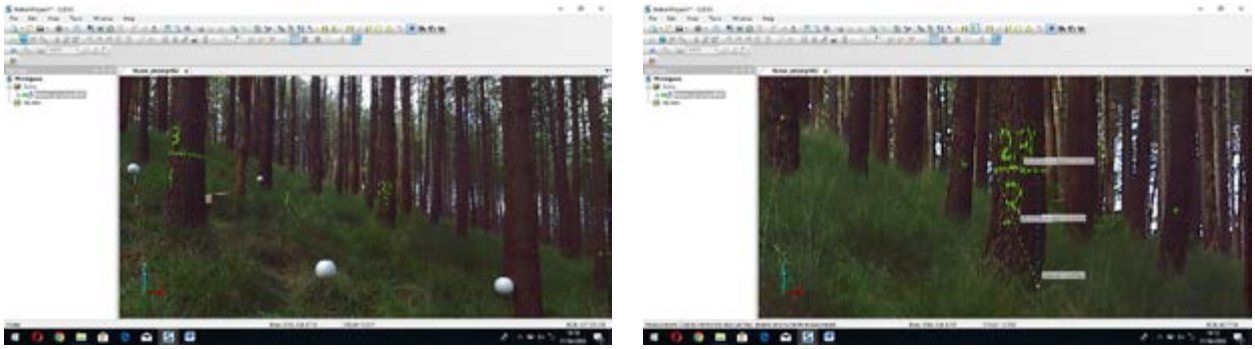


2 https://www.faro.com/es-es/productos/construccion-bim-cim/scene-webshare-cloud/software-para-las-series-focus-de-faro-laser-scanner/



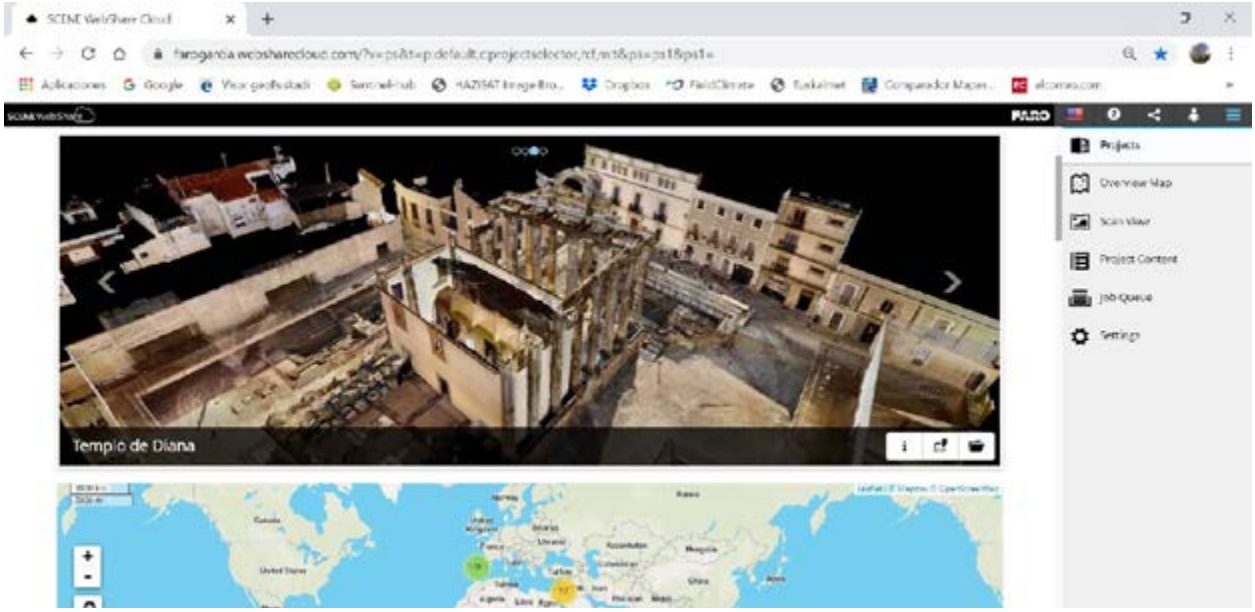
Distintas fases del seccionado con el programa SCENE de FARO.





Medición de distancias de forma manual mediante el programa SCENE de FARO.

Hay que citar también la posibilidad de empleo de SCENE WebShare Cloud, que es una solución de FARO basada en la nube que permite compartir datos de cualquier escaneo de manera fácil y segura a nivel mundial a través de internet.



Programa Cyclone de Leica

La familia Cyclone se compone de diversos módulos de *software* individual que satisfacen diversas necesidades de una gran variedad de sectores y flujos de trabajo, como la ingeniería civil, los modelos 3D, los levantamientos topográficos o los modelos BIM.

Al igual que SCENE, se trata de programas muy completos, pero sujetos a un coste de mantenimiento o actualización, por lo que son adecuados para gabinetes técnicos que se dediquen de forma más o menos continuada a este tipo de tareas 3D.

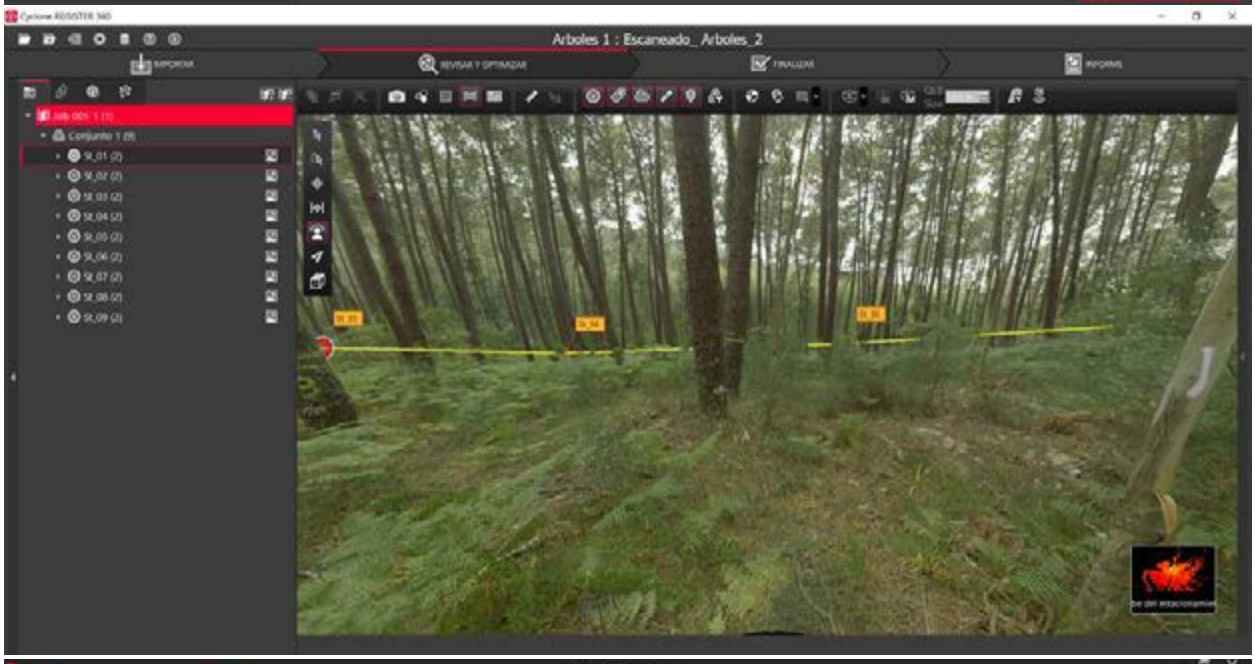
La empresa Global Geosystems, subcontratada por HAZI, ha proporcionado una base de datos con los valores del perímetro de los troncos de cada pino escaneado en las 11 parcelas gallegas, por medio de secciones de los fustes cada 50 cm de altura.

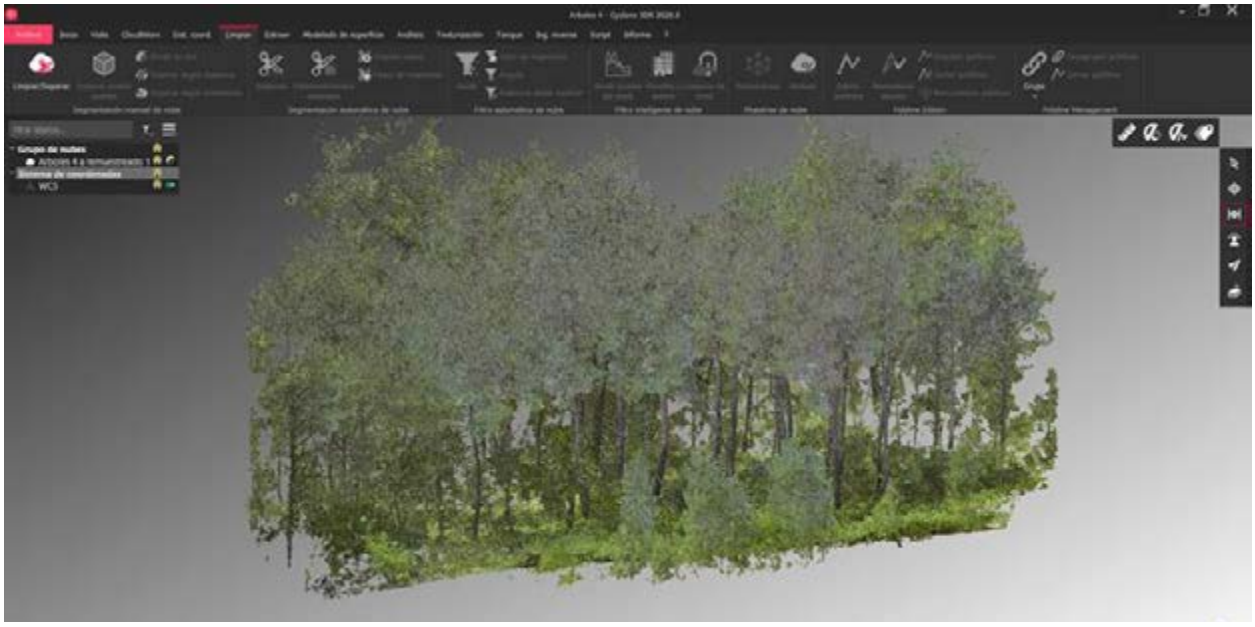
El flujo de trabajo desarrollado por esta empresa ha seguido estas fases:

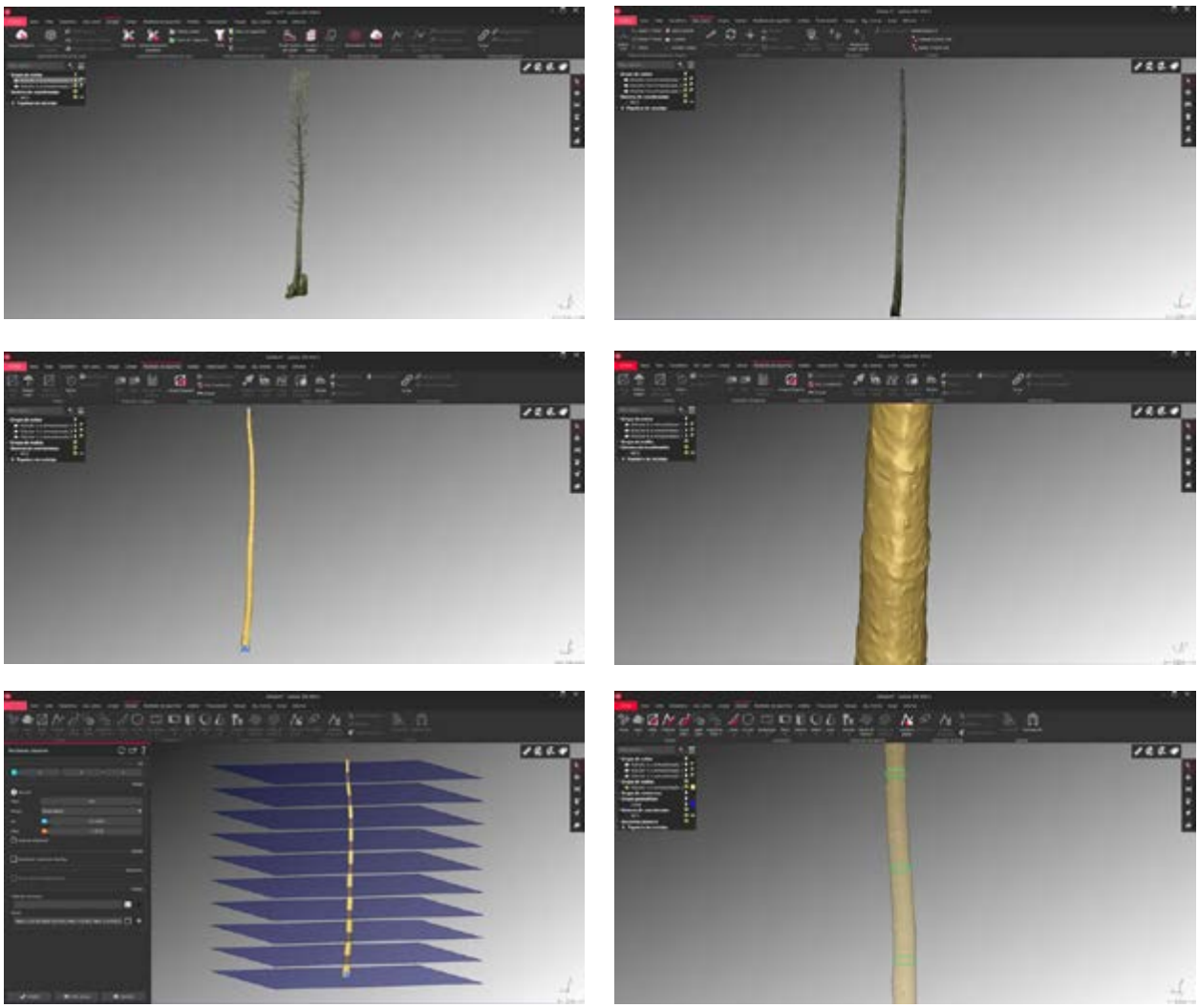
1.- Software para el registro y unión de escaneados CYCLONE REGISTER 360: Registro automático gracias al sistema VIS de Láser escáner 3D Leica RTC360 (https://leica-geosystems.com/es-es/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360/visual_inertial_system_technology)

2.- Software para extracción de geometrías CYCLONE 3DR
   2.1.- Unificación de nube de puntos
   2.2.- Remuestreo de nube por distancia 5 mm
   2.3.- Segmentación de nube por color
   2.4.- Limpieza de nube y extracción de árboles de interés.
   2.5.- Mallado 3D de árbol
   2.6.- Extracción de secciones planares

Arboles 1 : Escaneado_ Arboles_2
Conjunto 1
Optimizar conjunto


Arboles 1 : Escaneado_ Arboles_2





Distintas fases del procesado con el programa Cyclone de Leica.

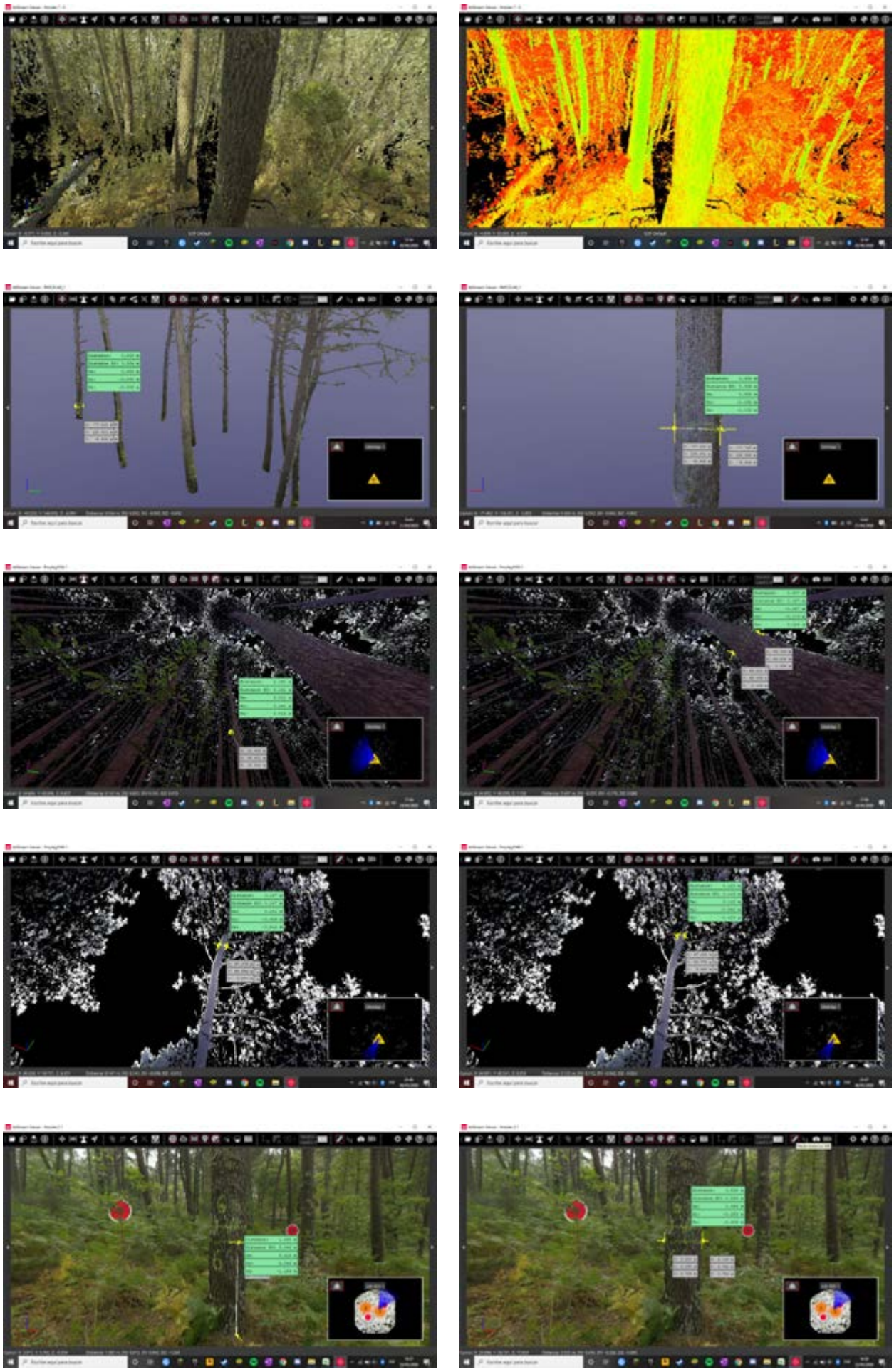
Programa Jetstream Viewer de Leica

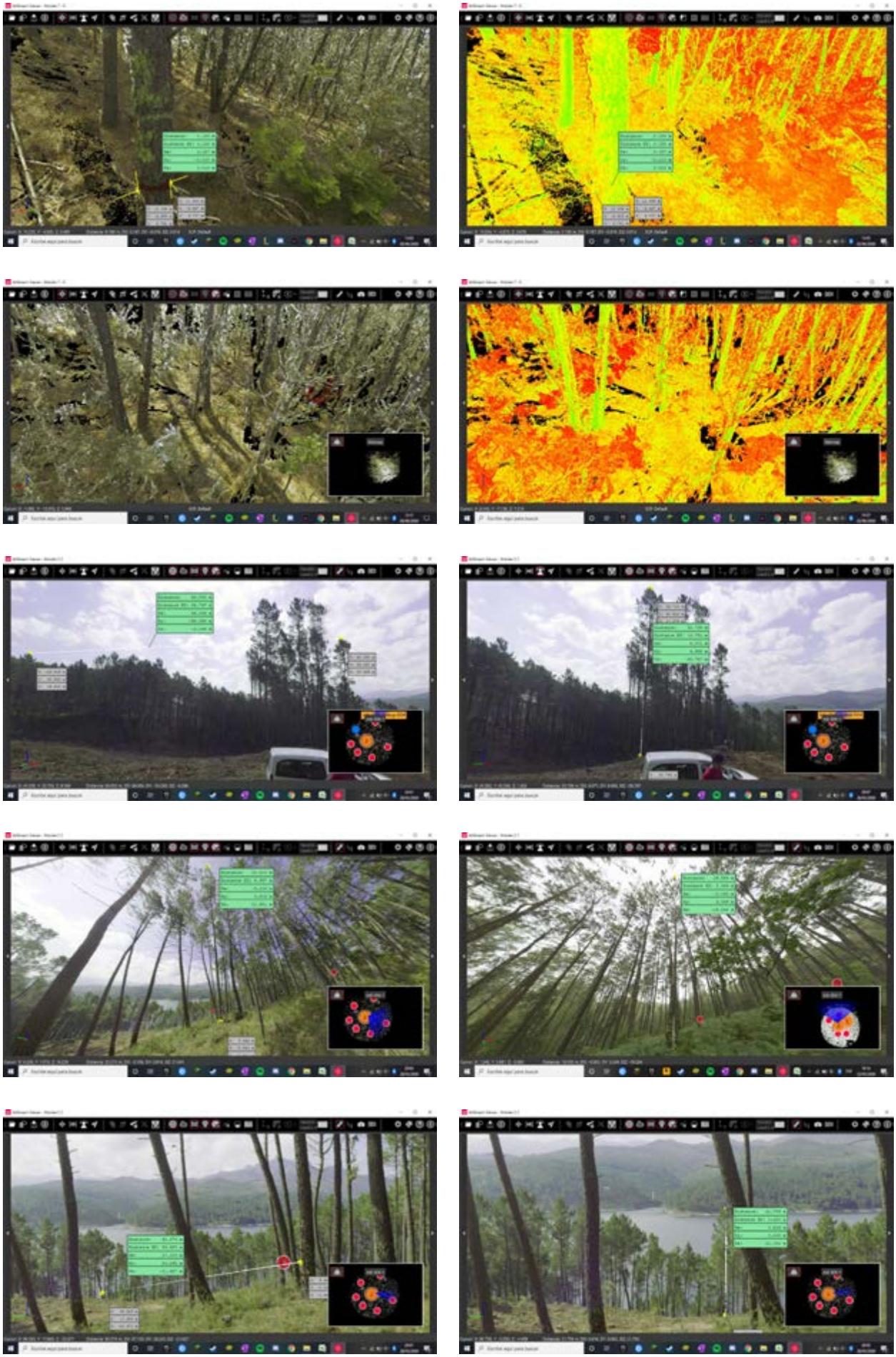
Además, la empresa Leica permite el empleo[3] del programa gratuito Jetstream Viewer para visualizar nubes de puntos procedentes de escaneos y para realizar mediciones. Para ello, la nube de puntos debe estar en formato .lgs de Leica, diferente del formato .fls propio de FARO.

Una vez instalado el programa, se puede visualizar la nube de puntos coloreada con las fotografías y, desde cualquier perspectiva, medir directamente en pantalla distancias entre los puntos que se elijan. Presenta la gran ventaja de que se toma el borde de un objeto si se elige un punto cercano a ese borde, lo que facilita la medición de diámetros de los troncos ya que no hay que activar el *zoom* continuamente. También permite visualizar diversas longitudes cuando se mide una distancia entre dos puntos: no sólo la distancia en línea recta, sino también en proyección horizontal, así como las cotas relativas de los puntos elegidos, lo que también facilita la medición de diámetros a diversas alturas del tronco.

La empresa Global Geosystems, subcontratada por HAZI, ha suministrado las nubes de puntos de las 11 parcelas gallegas en formato .lgs de Leica, lo que permite la comprobación de las mediciones realizadas en secciones de los troncos, separadas cada 50 cm de altura. Cada nube de puntos ocupa cerca de 5 Gb e incluye los 10 árboles seleccionados y el resto de pinos de cada parcela.

3 Disponible en: https://leica-geosystems.com/es-es/products/laser-scanners/software/leica-jetstream/leica-jetstream-viewer





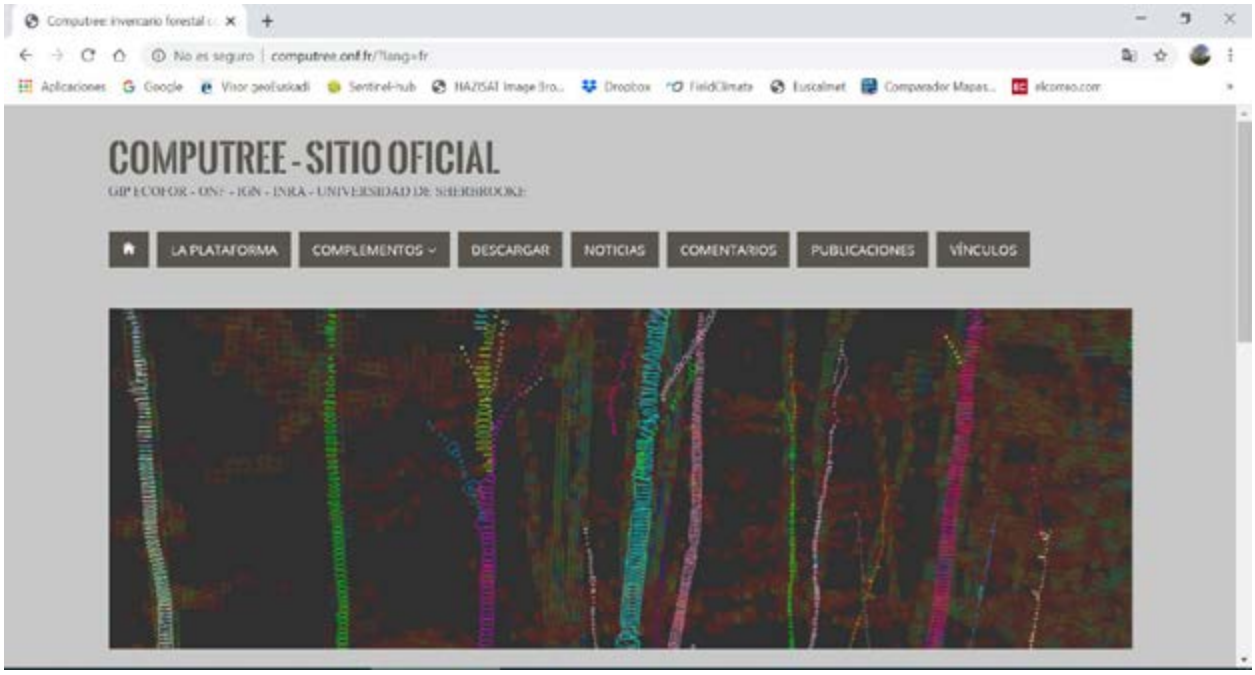
Medición de distancias de forma manual mediante el programa Jetstream Viewer de Leica.

Otros Programas: Computree

Computree[4] es una plataforma de procesamiento de nube de puntos 3D, derivada de sensores láser, LiDAR o del procesamiento fotogramétrico. Su objetivo es reunir algoritmos para el análisis de escenas forestales, con el fin de extraer datos sobre la estructura de árboles y rodales. Es administrada por el grupo Computree, compuesto por GIP ECOFOR, ONF, IGN, INRA y la Universidad de Sherbrooke.

Se trata de una plataforma modular: los algoritmos Computree se agrupan en complementos desarrollados de forma independiente. Es también una plataforma abierta: el corazón del sistema se encuentra bajo licencia GPL / LGPL (*Lesser General Public License*). La licencia de cada complemento se deja a la libre elección de su desarrollador.

Otra de las ventajas de este programa Computree , además de su gratuidad, es la posibilidad de trabajo en equipo *on-line* entre todos los investigadores que contribuyen a esta plataforma mediante sus aportaciones y sus observaciones.



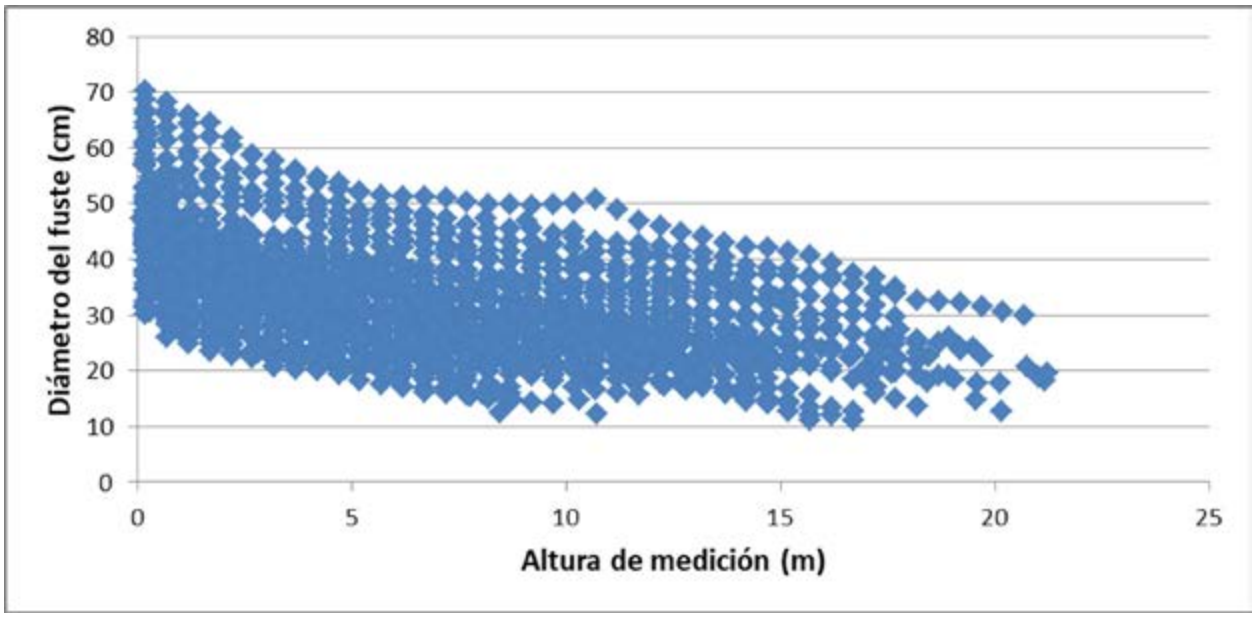
5.- Cubicación de las trozas

El procesado de las nubes de puntos permite, por tanto, ir midiendo el diámetro o el perímetro de las distintas secciones visibles del tronco o, si se desea, el número, diámetro y longitud de las ramas. Sin embargo, al tratarse de escaneos desde el suelo, se suele alcanzar una altura dl fuste a partir de la cual no es posible apreciar bien el tronco debido a la presencia de la copa verde, lo que impide también la consecución de puntos de escaneo. Si se trata de árboles en competencia, unos dificultan la visibilidad de la punta de los otros y el escaneo no permite calcular la altura total de cada árbol.

La solución suele ser la medición de la altura total de cada árbol mediante hipsómetro, alejándose de cada árbol, normalmente ladera arriba, para poder medir toda la longitud de cada fuste, desde el suelo hasta la punta. Dicha altura total de cada árbol se emplea para ajustar la altura a la que se alcanzan diversos diámetros del fuste en punta delgada (30, 25, 20, 15, 10 y 7,5 cm).

Hay disponibles pocos datos de diámetros/perímetros por encima de la altura de fuste de 20 m, debido a la dificultad que conlleva el método empleado en este tipo de mediciones mediante láser 3D y a la presencia de ramas y copa verde, que dificultan la visibilidad del fuste en su parte superior. El empleo de hipsómetros para medir la altura total de un árbol conlleva alejamiento (se aconseja alejarse hasta la altura aproximada del árbol medido), una posición del observador normalmente aguas arriba y una elección de un punto adecuado desde el cual visibilizar simultáneamente la base y la punta de un árbol. Con el láser 3D, en cambio, no puede haber un alejamiento excesivo del fuste escaneado, ya que mayores distancias conllevan menos puntos de rebote en el fuste y una menor precisión al medir los diámetros a distintas alturas.

4 Disponible en: http://computree.onf.fr/?lang=fr

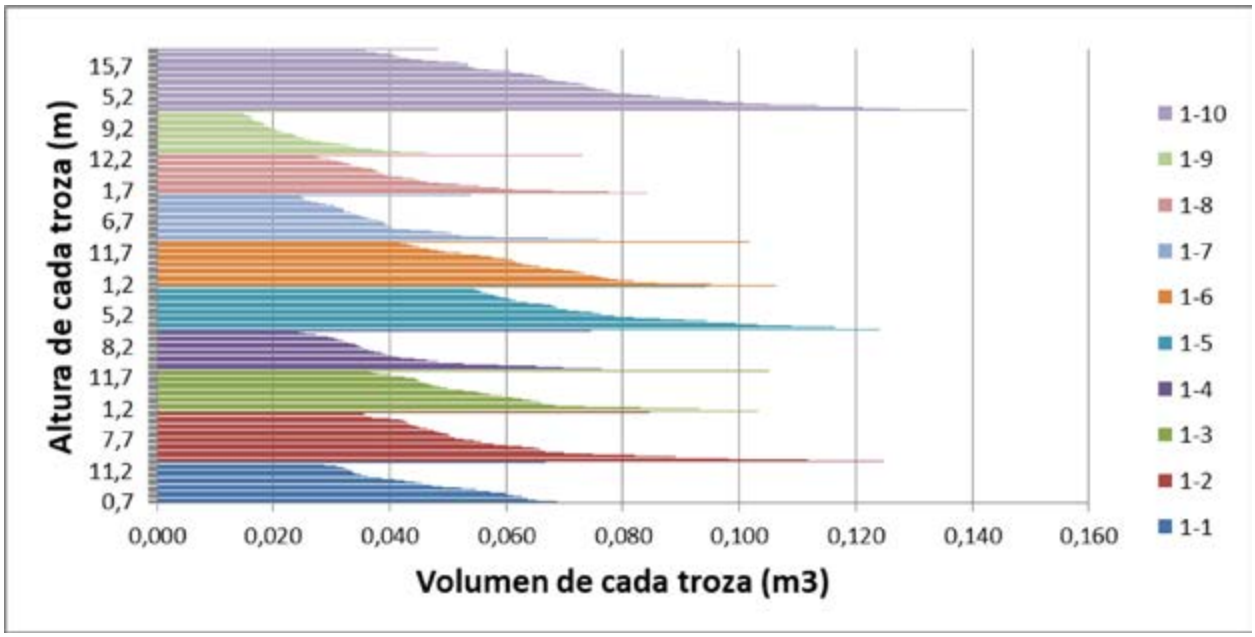


Cubicación mediante la fórmula de Smalian

Se dispone de 2.134 datos de diámetros con corteza, medidos a distintas alturas y correspondientes a los 103 fustes de pino empleados en la cubicación. Al aportar el láser datos de secciones de longitud conocida, el fuste se puede dividir en sucesivos troncos de cono y se puede aplicar la fórmula de Smalian para cubicarlos uno a uno, fórmula que no expresa más que la semisuma de las secciones extremas multiplicada por la longitud de cada troza (50 cm en la mayor parte de las trozas disponibles). La sección más baja empieza a una altura de tocón, de 20-30 cm contando desde el suelo, dependiendo de la visibilidad por parte del láser según la densidad del matorral, y se van añadiendo trozas hasta que la nube de puntos escaneada deja de proporcionar datos de las secciones porque la copa verde dificulta la visibilidad. A partir de esa altura, se emplea una reducción lineal del diámetro en función de su altura hasta alcanzar la altura total de cada pino.

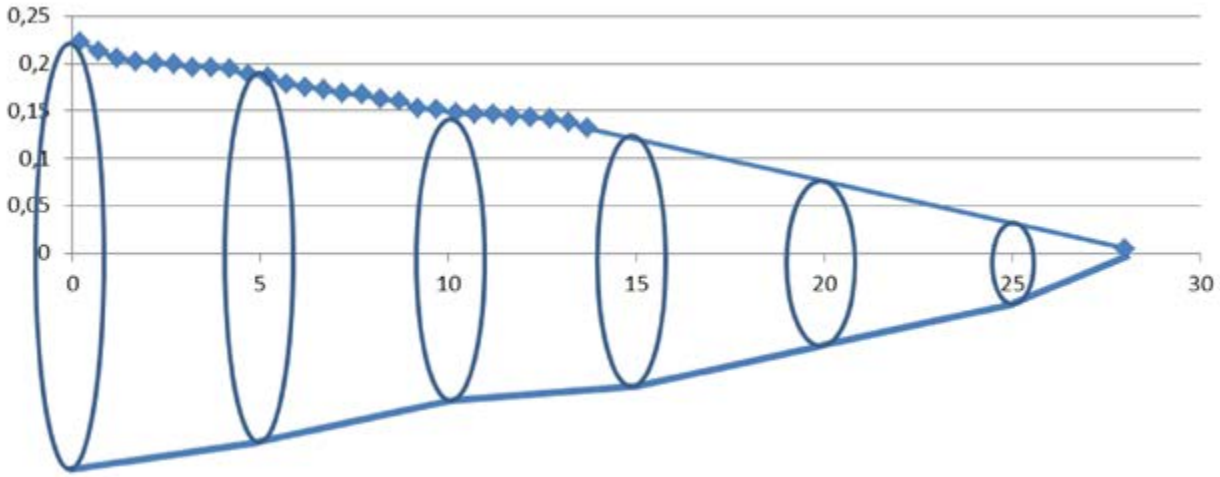
El volumen total con corteza de cada pino es, pues, la suma de todas sus trozas, calculándose además las fracciones de ese volumen hasta los diámetros comentados en punta delgada: hasta 30, 25, 20, 15, 10 y 7,5 cm.

En la gráfica se reflejan los volúmenes aportados por cada troza en la parcela 1, incluida la troza apical o superior, calculada como un cono, con una disminución lineal del diámetro hasta la punta (diámetro = 0 cm).



Cubicación mediante regresión polinómica

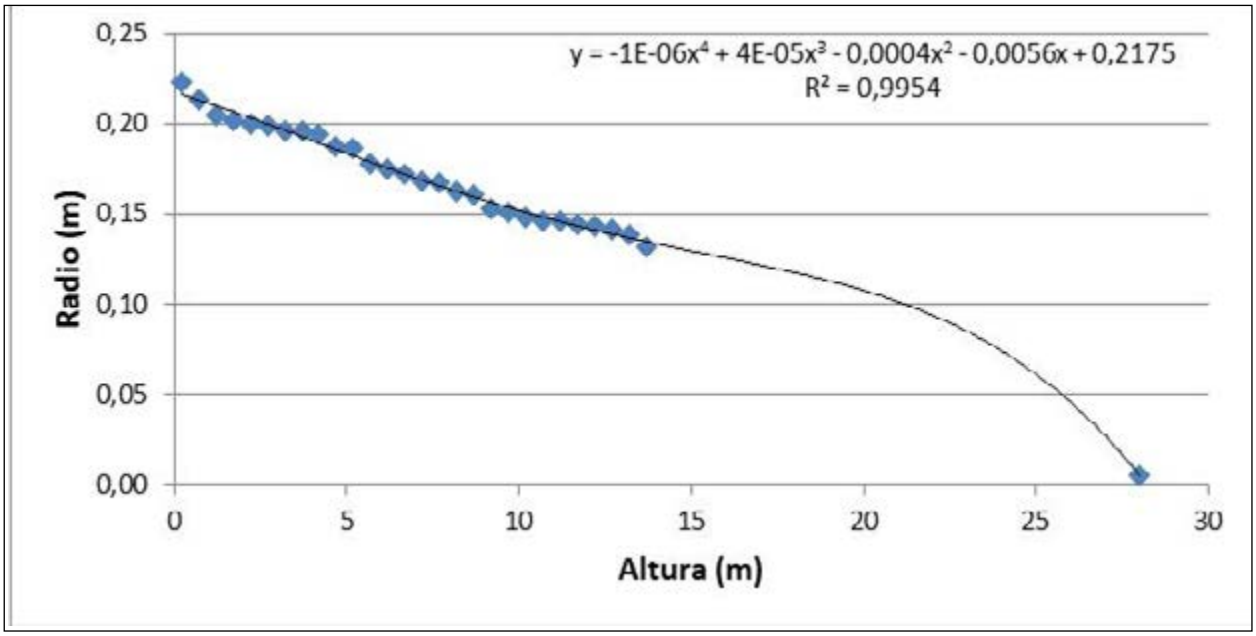
Se ha empleado también un sencillo método gráfico basado en las regresiones gráficas disponibles en las hojas de cálculo tipo Excel. Se trata de representar la función que se ajusta a la variación de los distintos radios del fuste (eje Y) a sus alturas correspondientes (eje X) y calcular el volumen de ese sólido de revolución mediante una integral de dicha fórmula entre la punta (altura total) y la base (altura del tocón, normalmente 0,2-0,3 m). Obviamente, si se desea obtener el resultado en m^3, hay que emplear radios y alturas del fuste en metros.



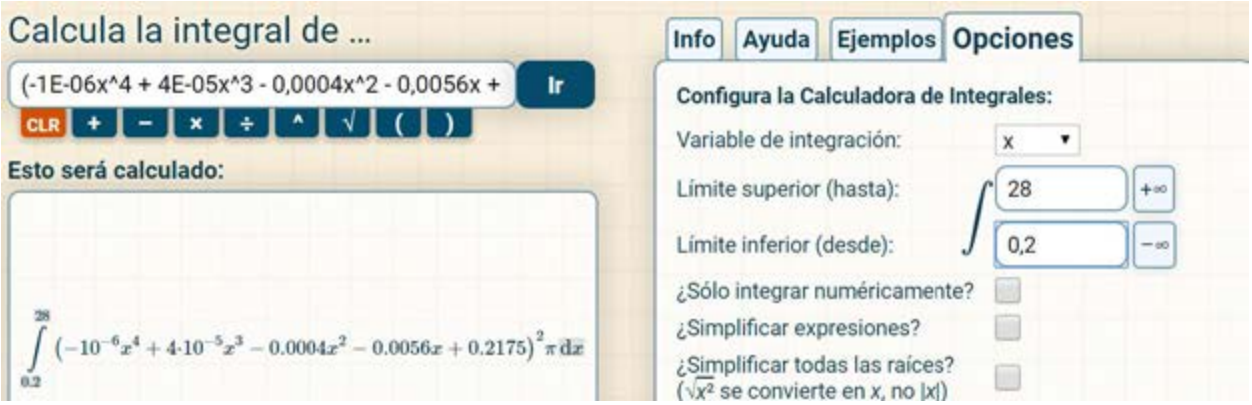
Una función que se ajusta bien a este tipo de perfiles de tronco es la curva polinómica de cuarto grado, ya que suele presentar una primera parte del fuste o parte basal con una forma tipo neiloide, una parte intermedia más bien lineal y una parte apical tipo parabólica. La *web* https://www.calculadora-de-integrales.com/ facilita este tipo de cálculos:

Por ejemplo, para el árbol escaneado numerado como 1-1 se obtiene esta fórmula:

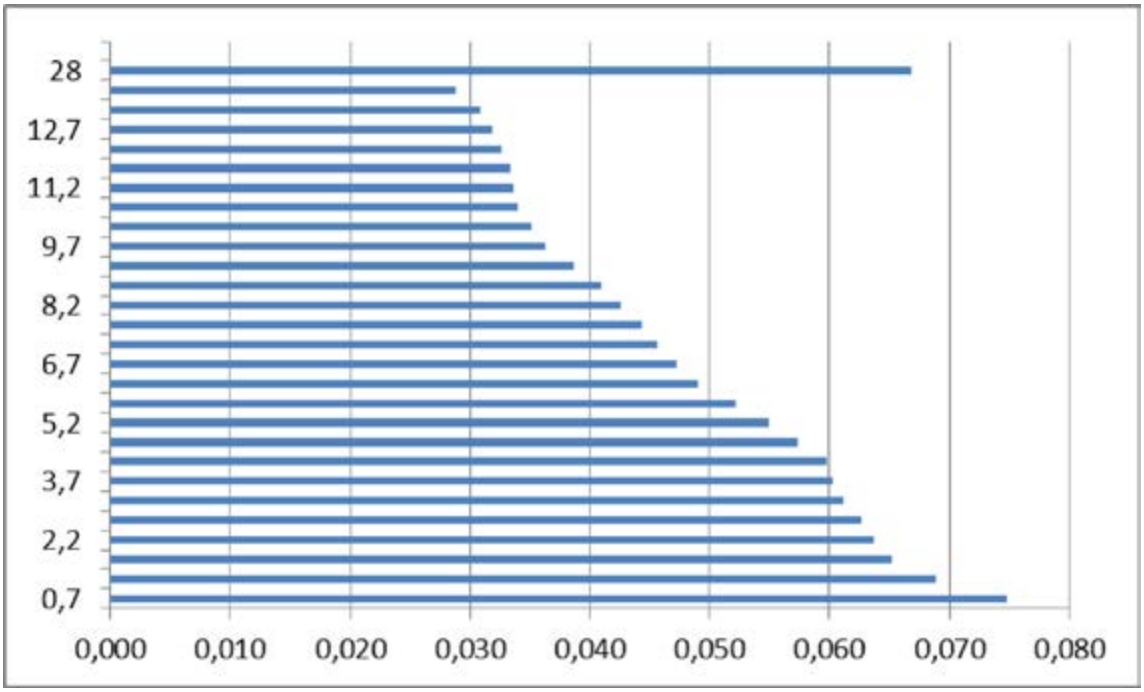
$(-1E\text{-}06x^4 + 4E\text{-}05x^3 - 0{,}0004x^2 - 0{,}0056x + 0{,}2175)$ en la gráfica de Excel



(-1E-06x^4 + 4E-05x^3 - 0,0004x^2 - 0,0056x + 0,2175)^2*π una vez adaptada a esa *web*

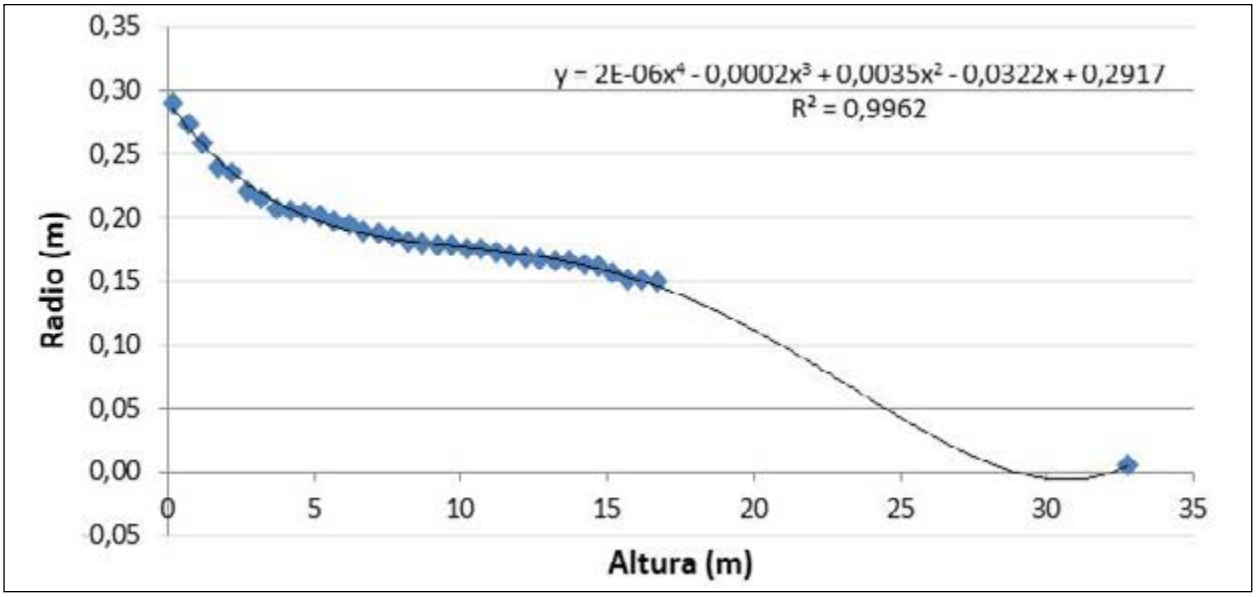


Y la *web* aporta el resultado de V=1,7059 m³, muy similar al resultado de V=1,668 m³ obtenido mediante la cubicación por trozas por la fórmula de Smalian, que se expresa en esta gráfica:

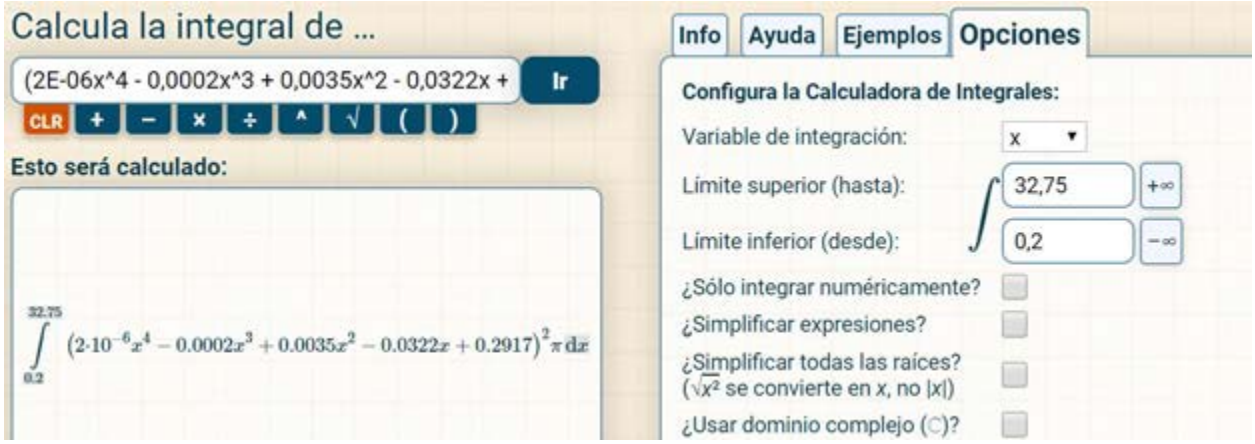


Para el árbol escaneado numerado como 1-2 se obtiene esta fórmula:

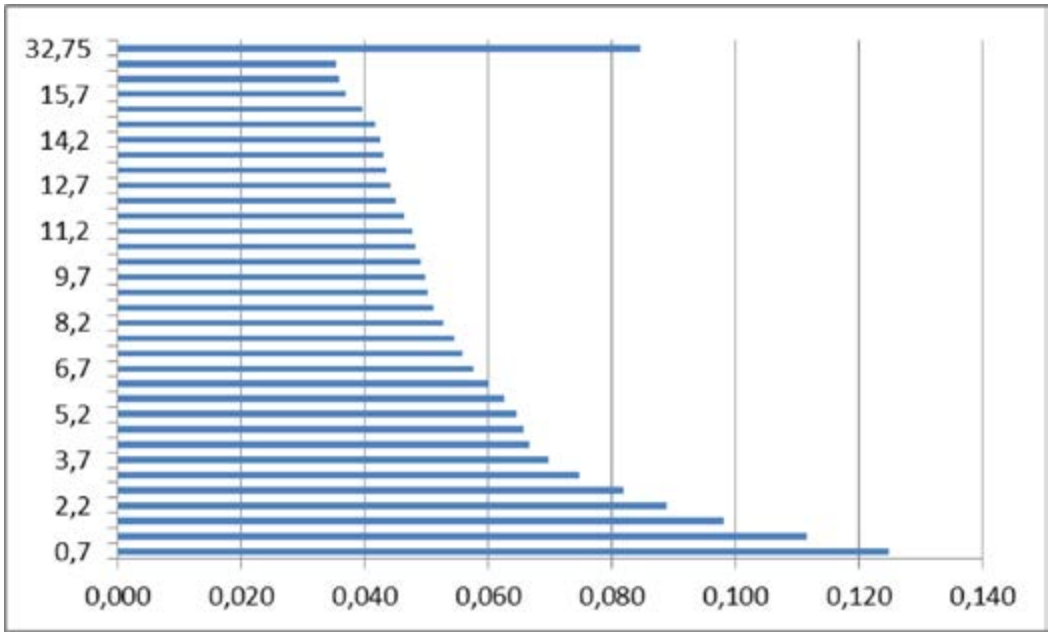
(2E-06x⁴ - 0,0002x³ + 0,00035x² - 0,0322x + 0,2917) en la gráfica de Excel



(2E-06x^4 - 0,0002x^3 + 0,0035x^2 - 0,0322x + 0,2917)^2*π una vez adaptada a esa *web*

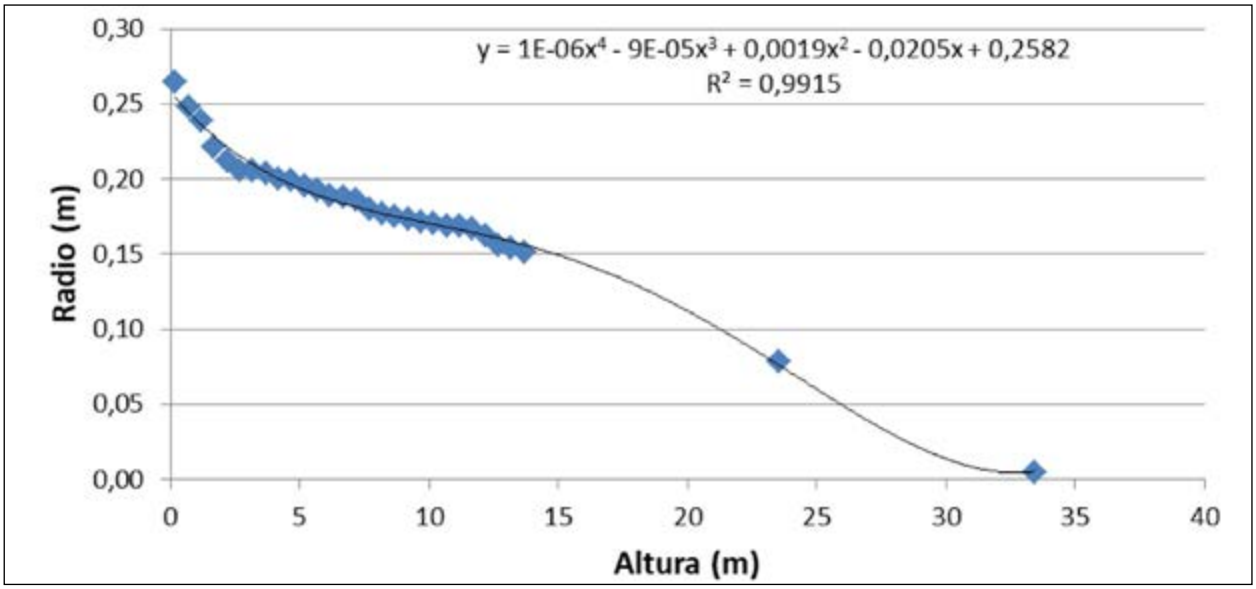


Y la *web* aporta el resultado de V=2,34157 m³, similar al resultado de V=2,492 m³ obtenido mediante la cubicación por trozas por la fórmula de Smalian, que se expresa en esta gráfica. Es posible que la pequeña diferencia entre ambos volúmenes por defecto se deba al ajuste de la curva en la parte negativa en las cercanías de la altura de 30 m:



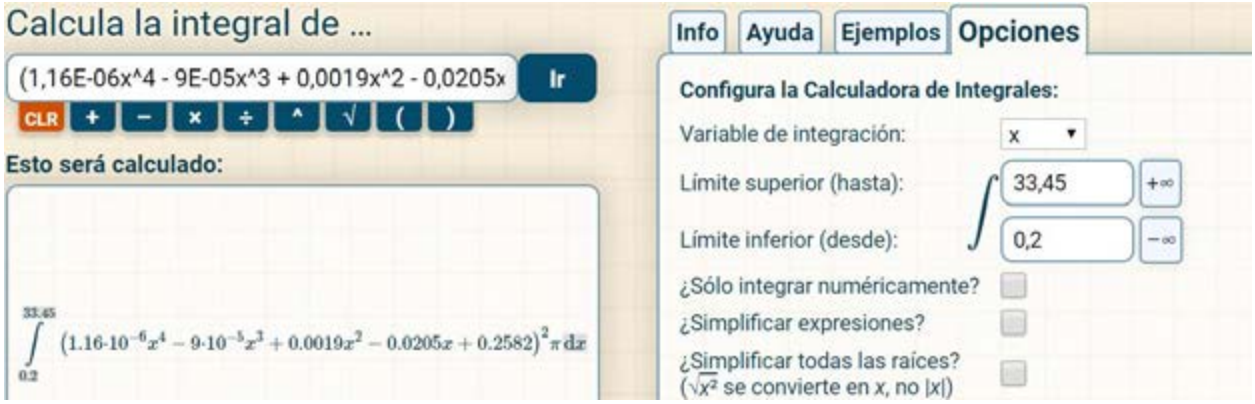
Y para el árbol escaneado numerado como 1-3 se obtiene esta fórmula:

(1E-06x4 - 9E-05x3 + 0,0019x2 - 0,0205x + 0,2582) en la gráfica de Excel

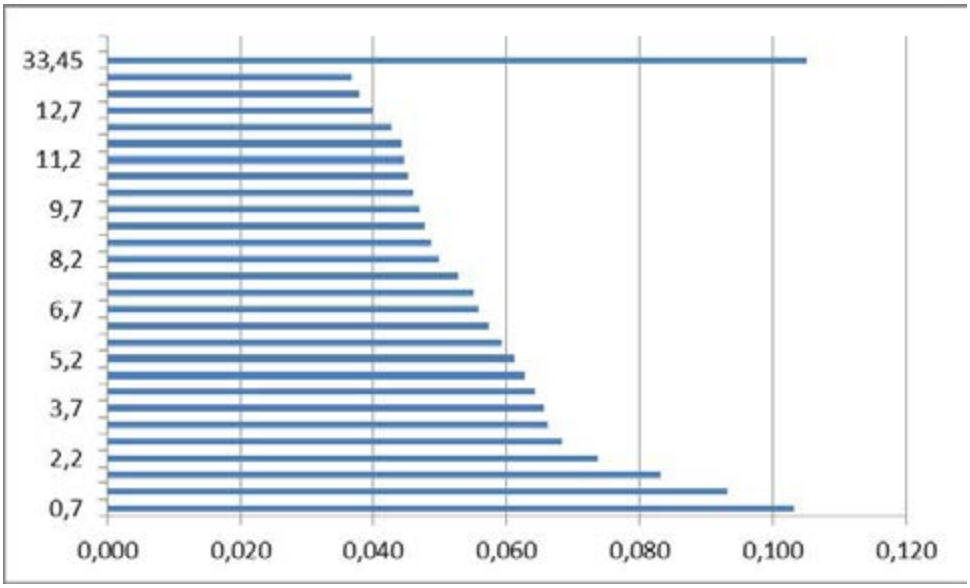


Para conseguir un mejor ajuste y evitar partes negativas en la curva, se ha añadido un punto intermedio entre la altura de la última troza y la altura total del árbol con ajuste lineal.

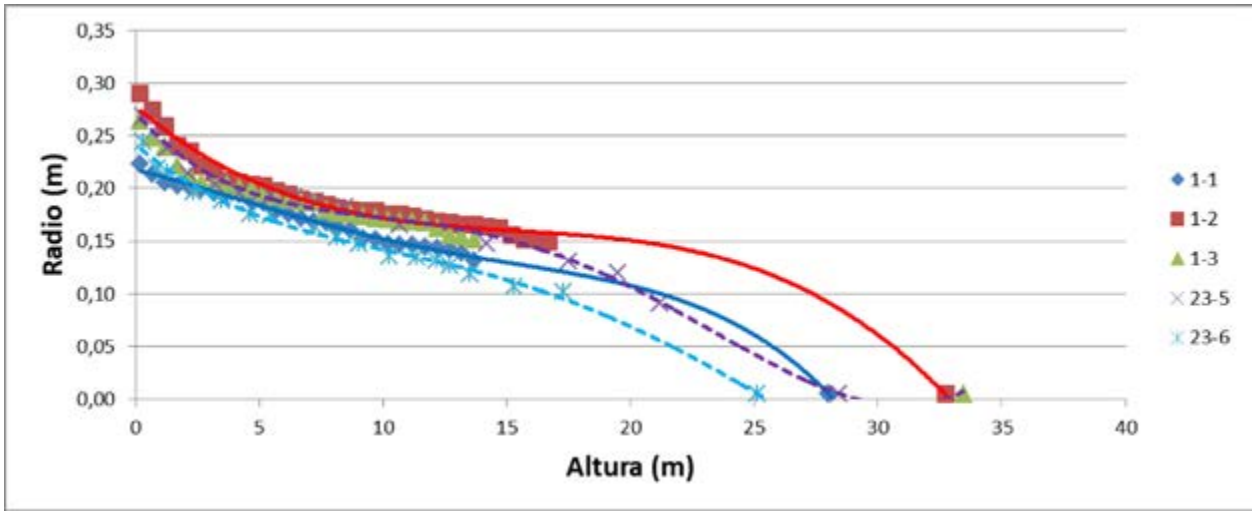
(1E-06x^4 - 9E-05x^3 + 0,0019x^2 - 0,0205x + 0,2582)^2*π una vez adaptada a esa *web*



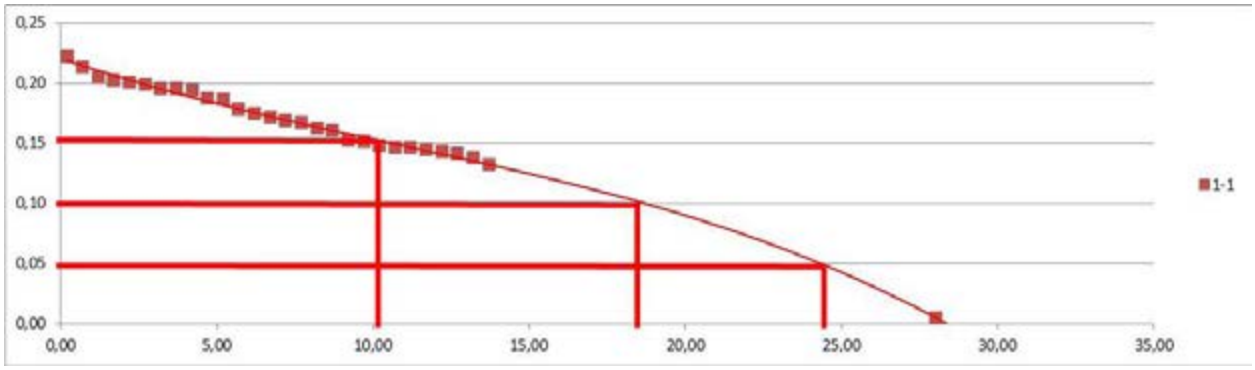
Y la *web* aporta el resultado de V=2,249 m³, muy similar al resultado de V=2,242 m³ obtenido mediante la cubicación por trozas por la fórmula de Smalian, que se expresa en esta gráfica:



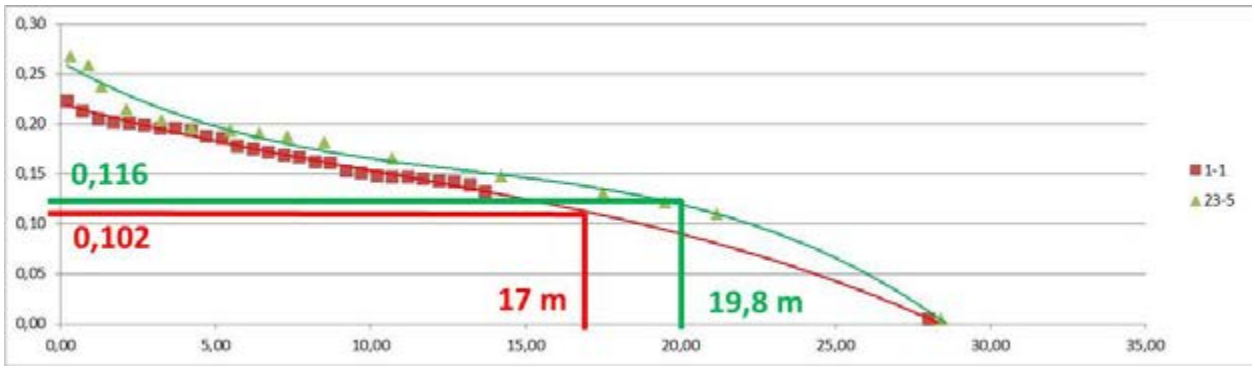
La forma de cada fuste (radio/altura) varía según diversos factores ya analizados en el capítulo 2. Por ejemplo, comparando los anteriores pinos de la parcela 1 con dos pinos de la parcela 23, con diámetros normales y alturas semejantes a la parcela 1, se muestra cómo estos pinos vascos son más cónicos. Dicha conicidad se aprecia por la menor curvatura de las curvas polinómicas ajustadas (en discontinuo), dando un aspecto similar a una recta que sería correspondiente a una regresión lineal:



Estas curvas que representan la forma propia de cada fuste (radio ó diámetro/altura) son también útiles para calcular distintas alturas hasta determinados diámetro en punta delgada. Por ejemplo, las alturas hasta 30, 20 o 10 cm en punta delgada:



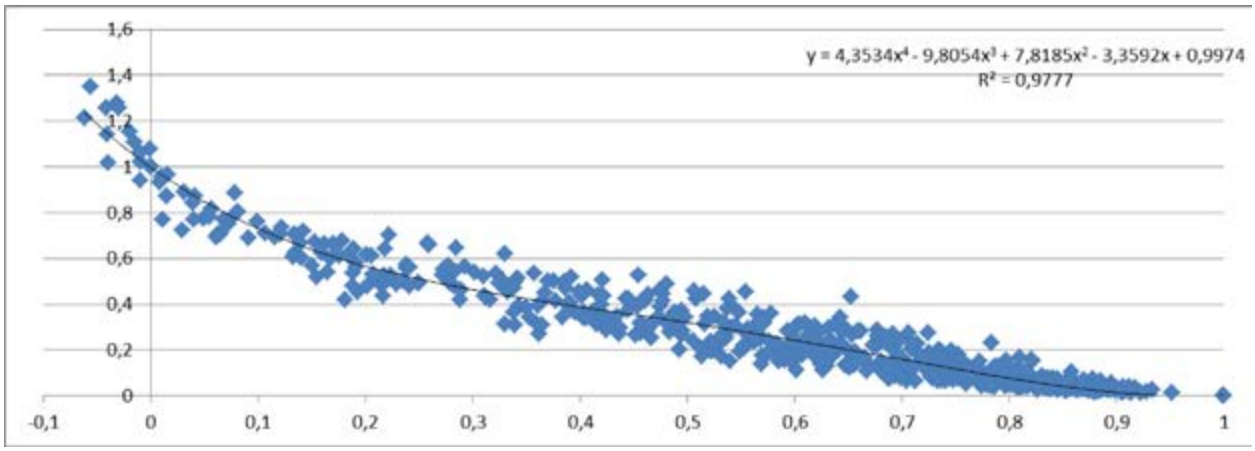
Igualmente, pueden emplearse estas curvas para calcular la altura de Pressler de un árbol, que es la altura a la que el fuste alcanza un diámetro igual a la mitad del diámetro de la base o del diámetro normal. En el caso de los árboles 1-1 y 23-5, de semejantes diámetros normales (42-46 cm) y alturas totales (28 m), es patente la diferente altura de Pressler.



Cubicación mediante coeficientes mórficos

Otra forma de empleo de métodos gráficos para cubicar árboles es mediante el método desarrollado en el IFN1 (capítulo 4) que propone una ecuación de perfil de tronco de tipo polinómico para relacionar diámetro y altura a lo largo del fuste. La ventaja es que presenta el diámetro al cuadrado, por lo que la superficie que queda por debajo de esa curva representa el volumen del fuste hasta distintas alturas.

Empleando la muestra disponible de diámetros a distintas alturas de los 103 pinos escaneados y troceados en 12 parcelas del proyecto SiGCa-PIMA, se obtiene esta nueva ecuación polinómica de cuarto grado en Excel:

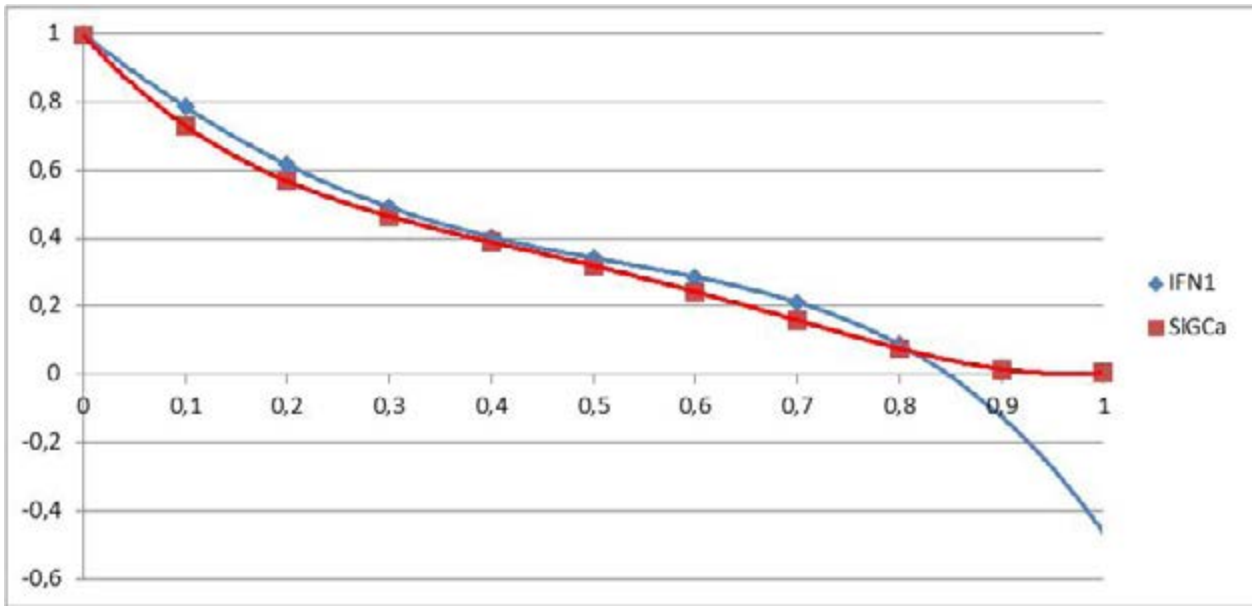


La ecuación de perfil de tronco así conseguida es similar a la obtenida en IFN1 para *P. pinaster* (Norte):

$$\textbf{IFN1: } y = 1 - 2{,}3610*x + 2{,}0069*x^2 + 1{,}4356*x^3 - 2{,}5460*x^4$$

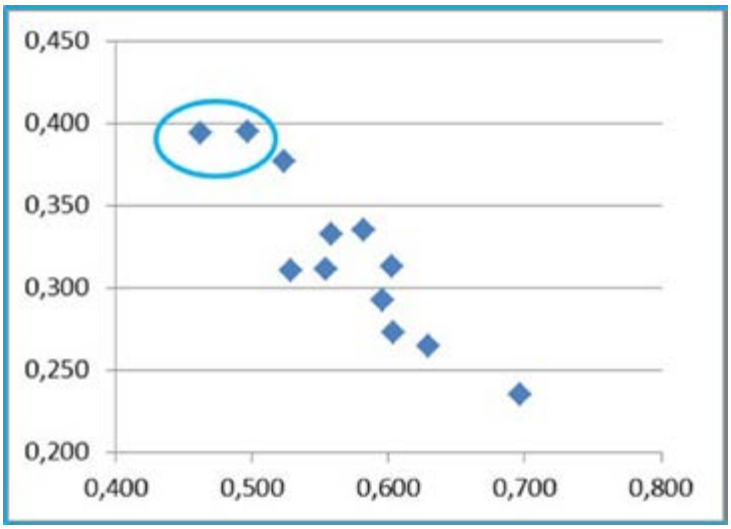
$$\textbf{SiGCa: } y = 0{,}9974 - 3{,}3592*x + 7{,}8185*x^2 - 9{,}8054*x^3 + 4{,}3534*x^4$$

y es la proporción al cuadrado, en tanto por uno, del diámetro a distintas alturas sobre el diámetro normal, mientras que x es la proporción, en tanto por uno, de la altura correspondiente, siendo 0 a la altura normal (hi=1,30 m) y 1 a la altura total o altura en punta (hi=h); ***y=(di/d)^2 x=(hi-1,3)/(h-1,3)***

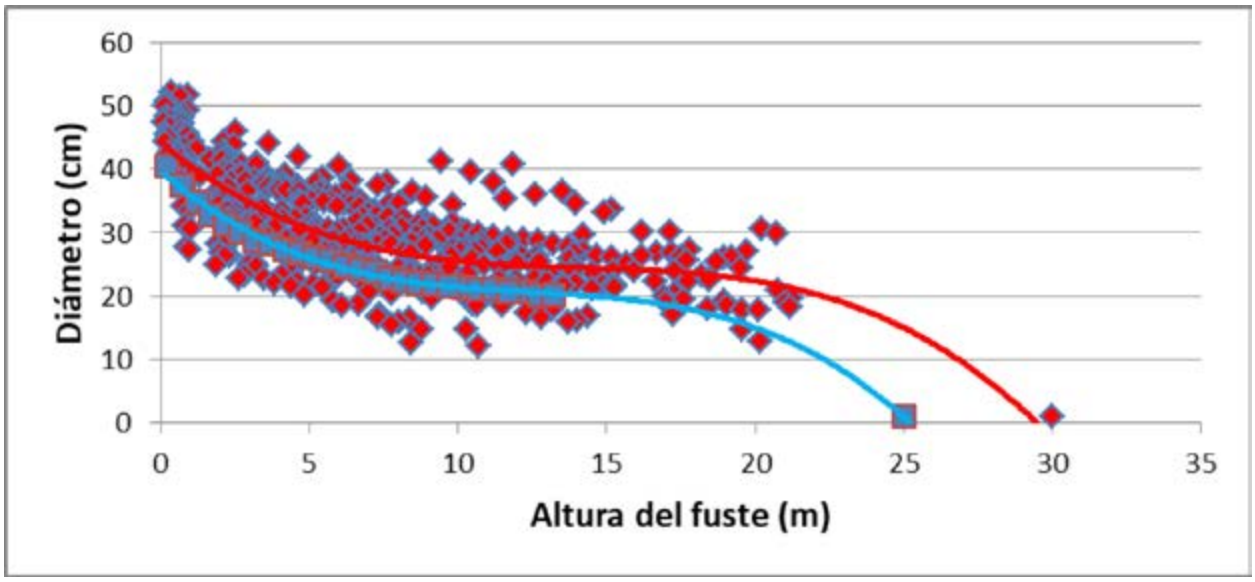


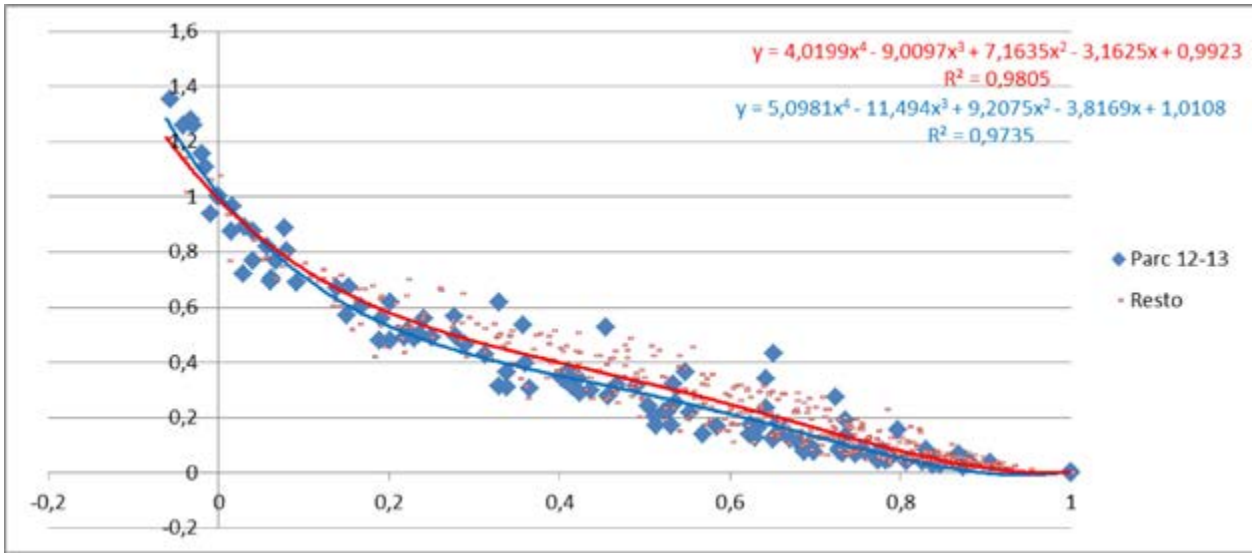
No obstante, puede haber ciertas diferencias en la forma promedio de los fustes de cada parcela, como ya se ha analizado en capítulos anteriores, debido a diversas causas.

Parcela	Valor medio x	Valor medio y
1	0,630	0,265
4	0,582	0,335
5	0,554	0,311
6	0,696	0,235
8	0,604	0,273
12	0,497	0,395
13	0,462	0,394
18	0,558	0,333
19	0,523	0,377
23	0,596	0,292
24	0,603	0,313
25	0,528	0,311

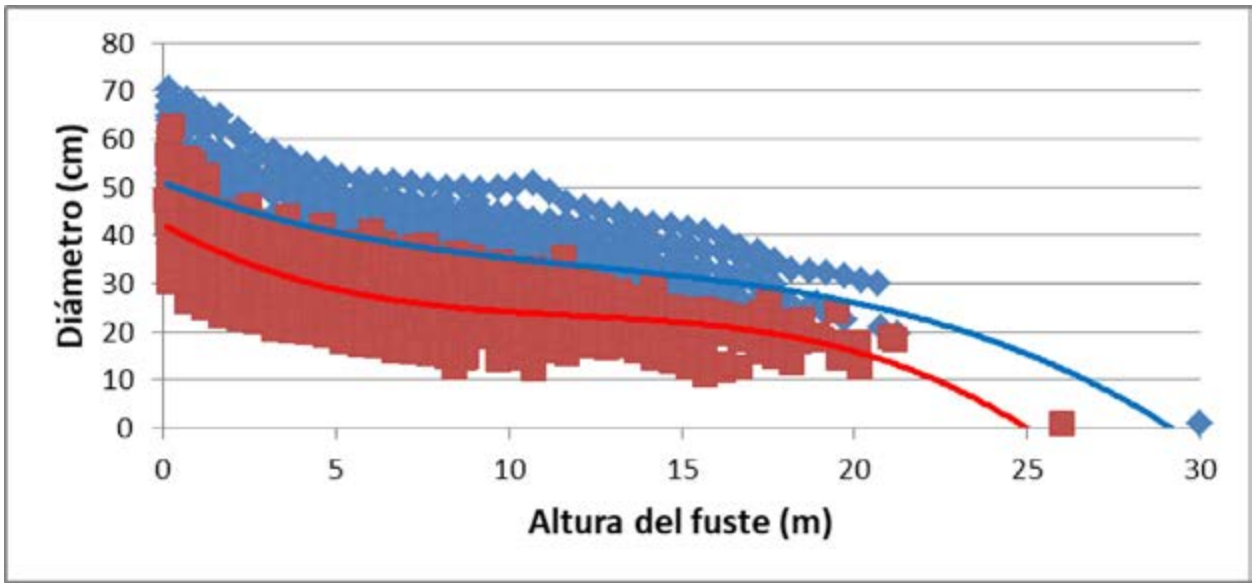


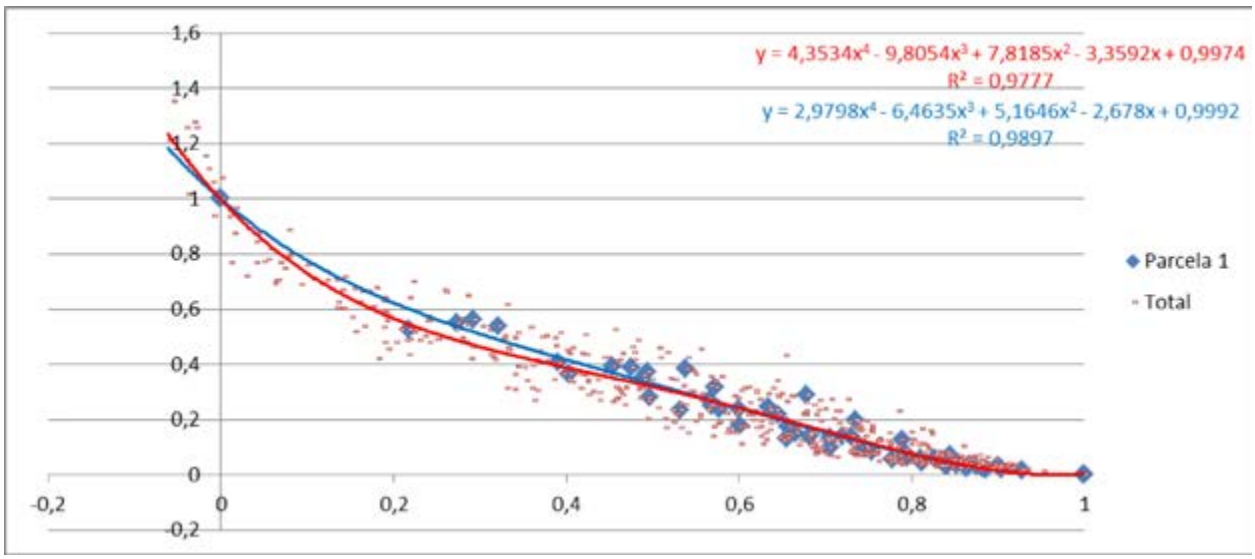
Las parcelas **12** y **13** son las que presentan unos menores valores medios de x y mayores valores de y, lo que se relaciona con perfiles de tronco algo más cónicos. Se trata de las parcelas más densas, con más de 900 pinos/ha, y de menor diámetro cuadrático medio, en torno a 20 cm.

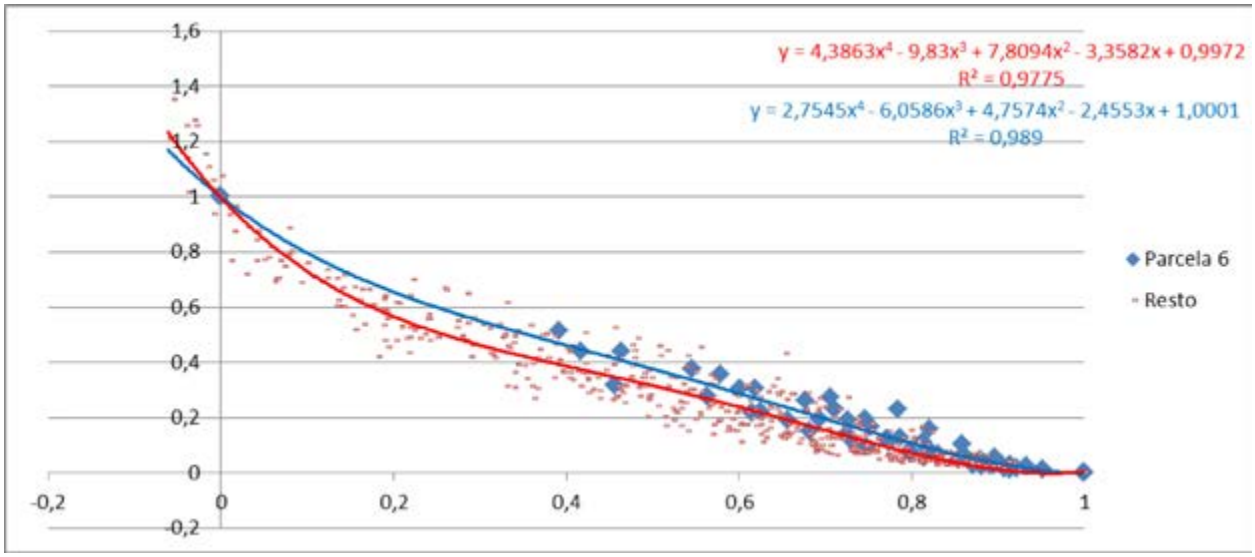




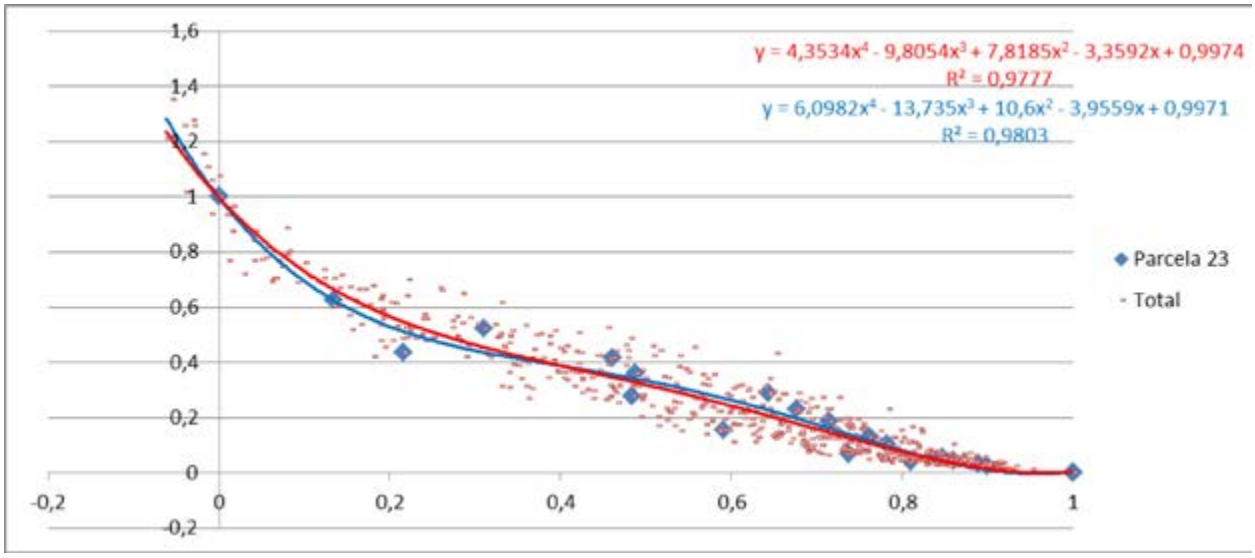
En el otro extremo, las parcelas **1**, **6** y **8** son las que presentan unos mayores valores medios de x y menores valores de y, lo que se relaciona con perfiles de tronco más cilíndricos. Se trata de las parcelas con pinos más gruesos, con un diámetro medio en torno a 43 cm.

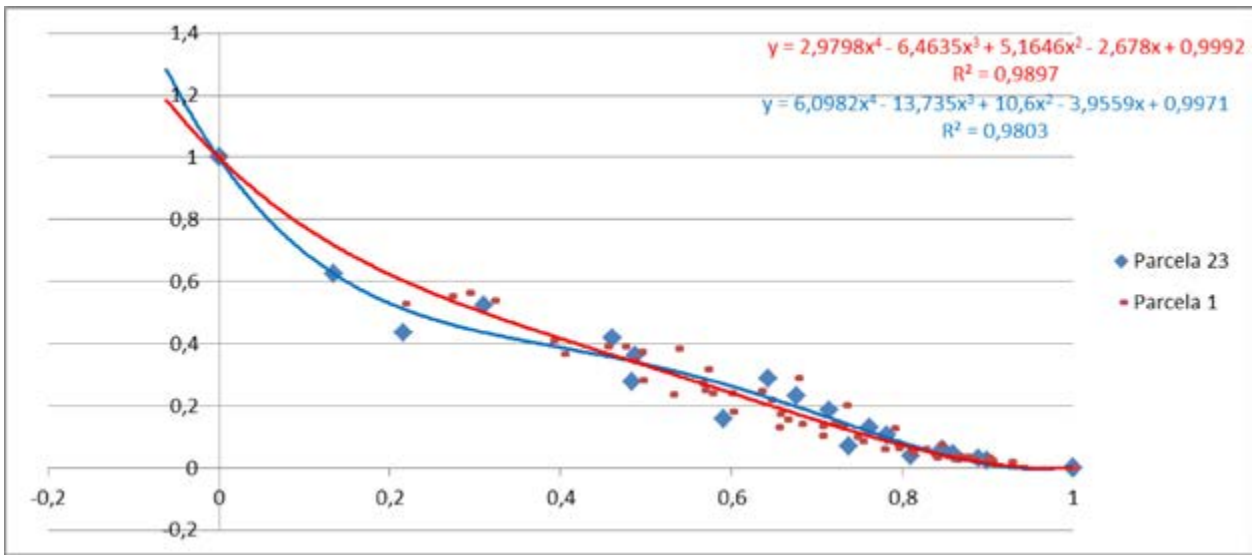




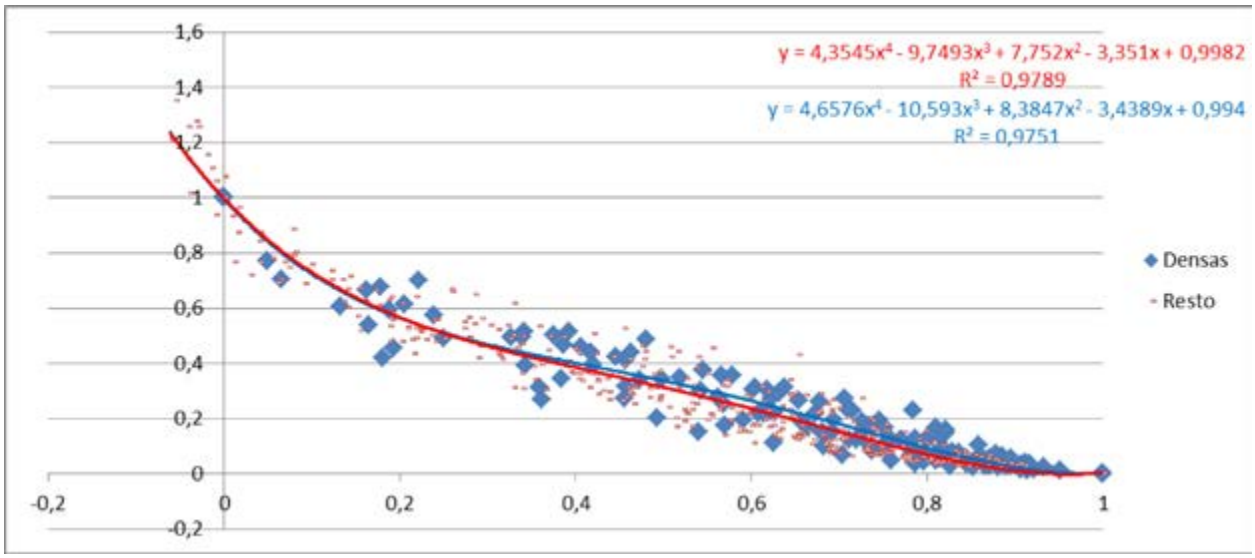


Cercana a estas parcelas **1**, 6 y 8 se encuentra la parcela **23**, una de las parcelas vascas junto a la 24 y la 25.

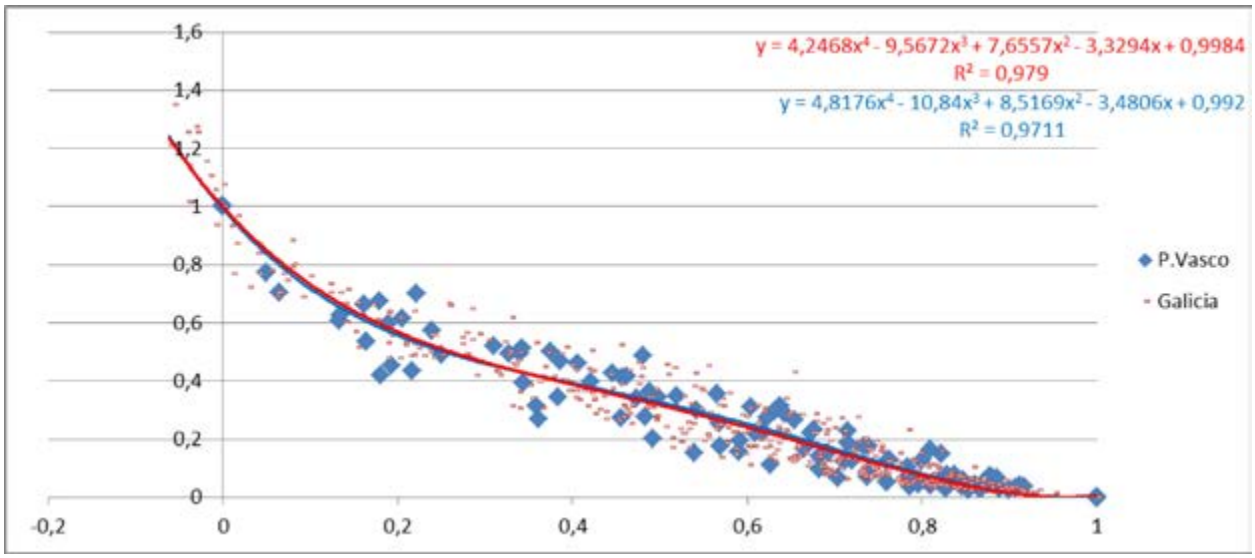




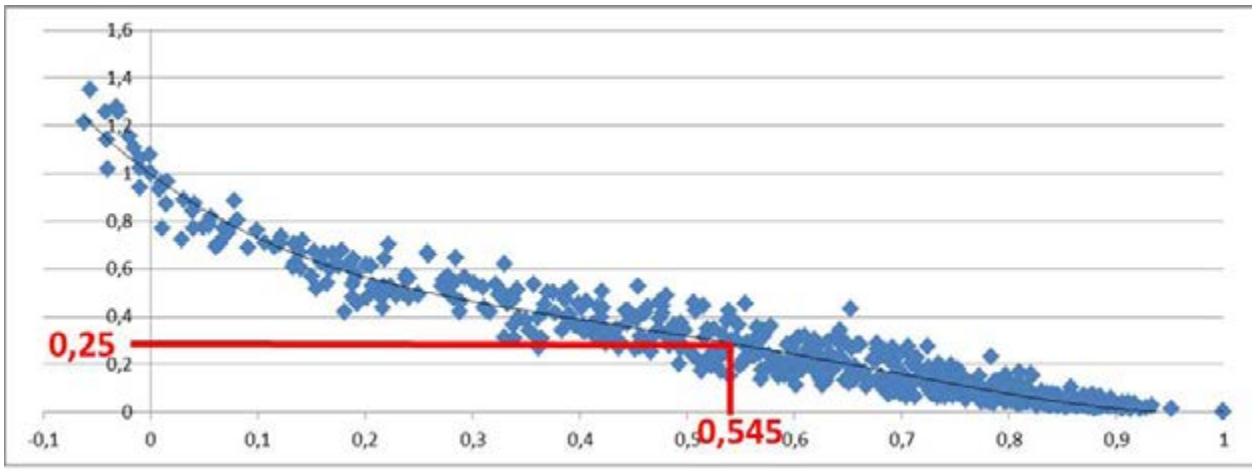
Aparentemente, la densidad o volumen medio en madera de estas parcelas no se relaciona con la forma de los árboles, ya que el conjunto de las parcelas 6, 24 y 25, con más de 600 m3/ha, no se distingue del resto de parcelas.



Curiosamente, la influencia de la región tampoco es apreciable, ya que el conjunto de las 3 parcelas vascas no se distingue del conjunto de las parcelas gallegas.



Estas gráficas también son útiles para calcular la altura de Pressler. La altura de Pressler es la altura a la que el fuste alcanza un diámetro que es igual a la mitad del diámetro de la base o del diámetro normal. Al ser una gráfica que representa ***y=(di/d)^2*** y partiendo de 0,25*d² como el cuadrado de 0,5*d, ello equivaldría a una altura de Pressler media de 0,545*h para los árboles de la muestra de SiGCa-PIMA.

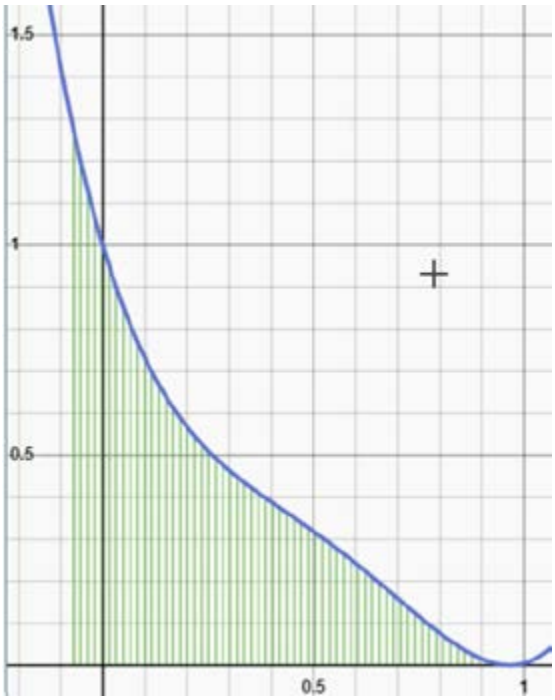


Este tipo de gráficas que enfrenta los valores de ***y=(di/d)^2*** y de ***x=(hi-1,3)/(h-1,3)*** también es útil para calcular de forma gráfica coeficientes mórficos o volumen del fuste hasta distintas alturas para un conjunto de árboles o para cada árbol representado. La *web* https://www.calculadora-de-integrales.com/ resulta ser muy práctica para realizar este tipo de representaciones gráficas y cálculos.

Representando en la citada *web* el conjunto de árboles escaneados en SiGCa-PIMA a través de esta fórmula:

y = 4,3534x^4 - 9,8054x^3 + 7,8185x^2 - 3,3592x + 0,9974

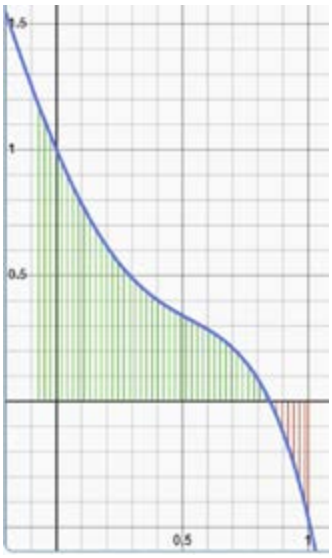
Coeficiente mórfico (f): esta integración permite calcular una superficie de **0,4223** entre los valores de 1 y -0,07; o de **0,3433** entre 0 y 1



Representando en la citada *web* la ecuación de perfil de tronco del IFN1:

y = 1 – 2,3610*x + 2,0069*x^2 + 1,4356*x^3 – 2,5460*x^4

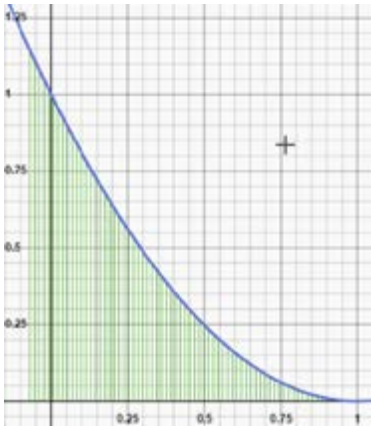
Coeficiente mórfico (f): esta integración permite calcular una superficie de **0,41417** entre los valores de 1 y -0,07, de **0,4453** entre 0,85 y -0,07, de **0,36933** entre 0,85 y 0 o de **0,338166** entre 0 y 1; la superficie coloreada en **rojo** es negativa



Se puede representar también en la citada *web* la ecuación de perfil de tronco de un cono, y = 1 –x, que al cuadrado [y = (1 –x)^2 = (di/d)^2] se convierte en:

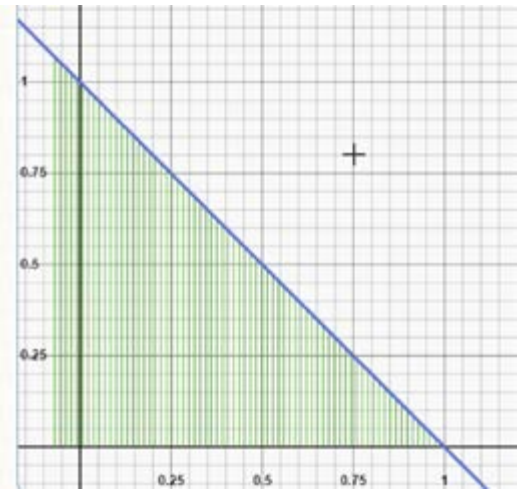
y = x2-2x+1 = 1 – 2*x + x^2

Coeficiente mórfico (f): esta integración permite calcular una superficie de **0,40684** entre los valores de 1 y -0,07; o de **0,333** entre 0 y 1, como correspondería a un cono (f=1/3)

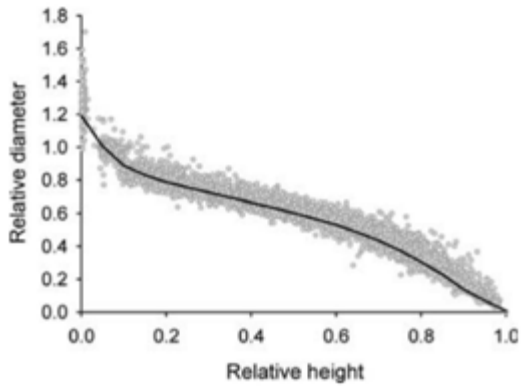
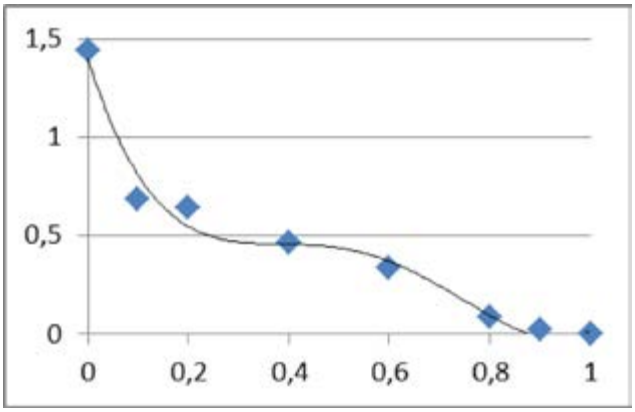


Y también se puede representar también la ecuación de perfil de tronco de esa misma forma pero sin elevar al cuadrado, y = 1 –x = (di/d)^2, lo que se asemejaría a un neiloide:

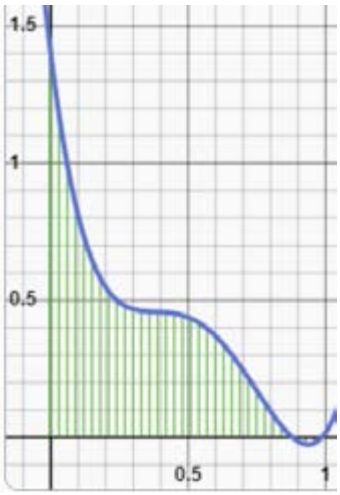
Coeficiente mórfico (f): esta integración permite calcular una superficie de **0,57245** entre los valores de 1 y -0,07; o de **0,5** entre 0 y 1



La ecuación de perfil obtenida con estos pinos escaneados en SiGCa-PIMA se asemeja a la publicada por Rojo *et al.* (2005)[5] basada en 203 pinos marítimos troceados en Galicia:

	
Curva ajustada mediante una regresión local no paramétrica del diámetro relativo frente a la altura relativa: ***y=(di/d)*** vs. ***x=hi/h*** y = 7,3775x4 - 17,457x3 + 13,025x2 - 4,1221x + 1,1829	Curva ajustada mediante una regresión local no paramétrica del diámetro relativo frente a la altura relativa: ***y=(di/d)^2*** vs. ***x=hi/h*** y = 14,864x4 - 33,654x3 + 25,552x2 - 8,144x + 1,3994

Coeficiente mórfico (f): la integración de esa curva permite calcular una superficie de **0,40403** entre los valores entre 0 y 1



6.- Porcentaje de corteza

Muestra disponible del proyecto SiGCa-PIMA

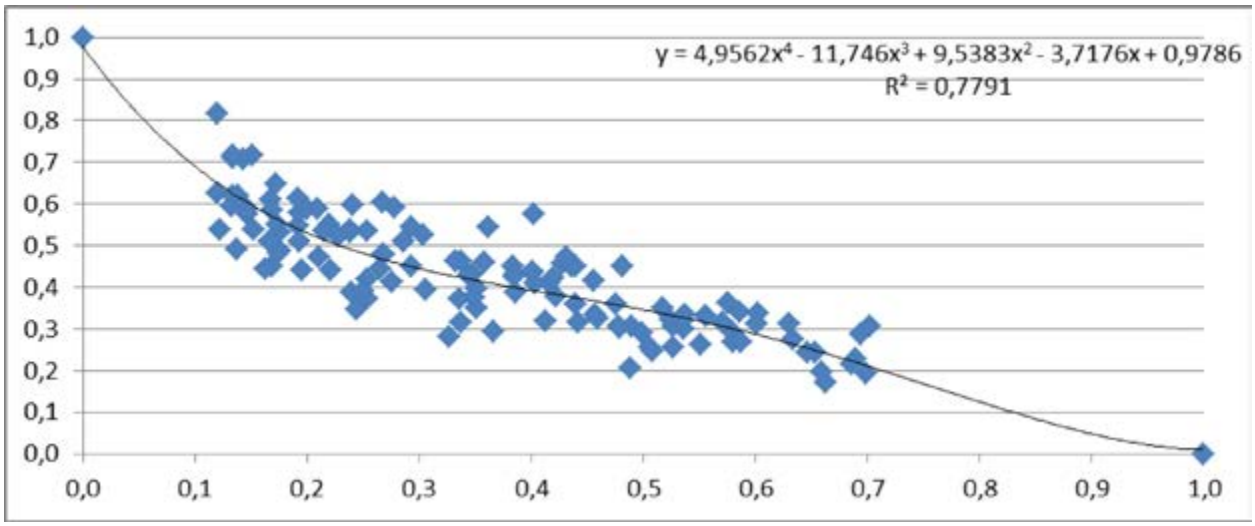
El pino marítimo es una especie con una gruesa corteza, por lo que un estudio sobre la dendrometría de esta especie no podría dejar de lado ese análisis. Sin embargo, al haberse tomado los datos de los árboles tipo de este proyecto SiGCa-PIMA mediante láser 3D no se dispone de datos completos de diámetros con y sin corteza a lo largo de los fustes. Únicamente se cuenta con los datos de las trozas de 4 m de longitud ya cortadas y procesadas, ya que la entrada en fábrica de las trozas se realiza ya descortezadas.

Se cuenta con los datos de diámetro sin corteza de 165 trozas de 4 m de longitud correspondientes a 36 trozas de 9 pinos de la parcela 1, 33 trozas de 10 pinos de la parcela 4, 29 trozas de 10 pinos de la parcela 5, 18 trozas de 8 pinos de la parcela 12, 16 trozas de 8 pinos de la parcela 13, 17 trozas de 7 pinos de la parcela 18 y 16 trozas de 8 pinos de la parcela 19. La mayoría de esos pinos han producido 3 trozas, por lo que aportan diámetros sin corteza a 0, a 4, a 8 y a 12 m de altura.

Se puede representar el conjunto de esas trozas medidas sin corteza SC en la anteriormente citada *web* https://www.calculadora-de-integrales.com/ a través de esta fórmula de perfil de tronco:

y = 4,9562*x^4 - 11,746x*x^3 + 9,5383*x^2 - 3,7176*x + 0,9786

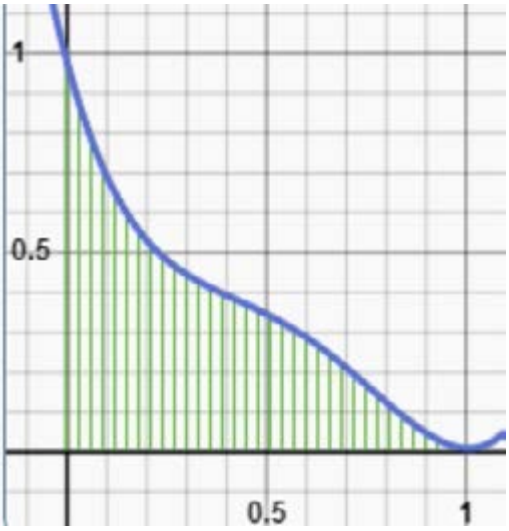
5 A. Rojo, X. Perales, F. Sánchez-Rodríguez, J. G. Alvarez-González, K. von Gadow, 2005. *Stem taper functions for maritime pine (Pinus pinaster Ait.) in Galicia (Northwestern Spain)*. European Journal of Forest Research, 124, 177-186.



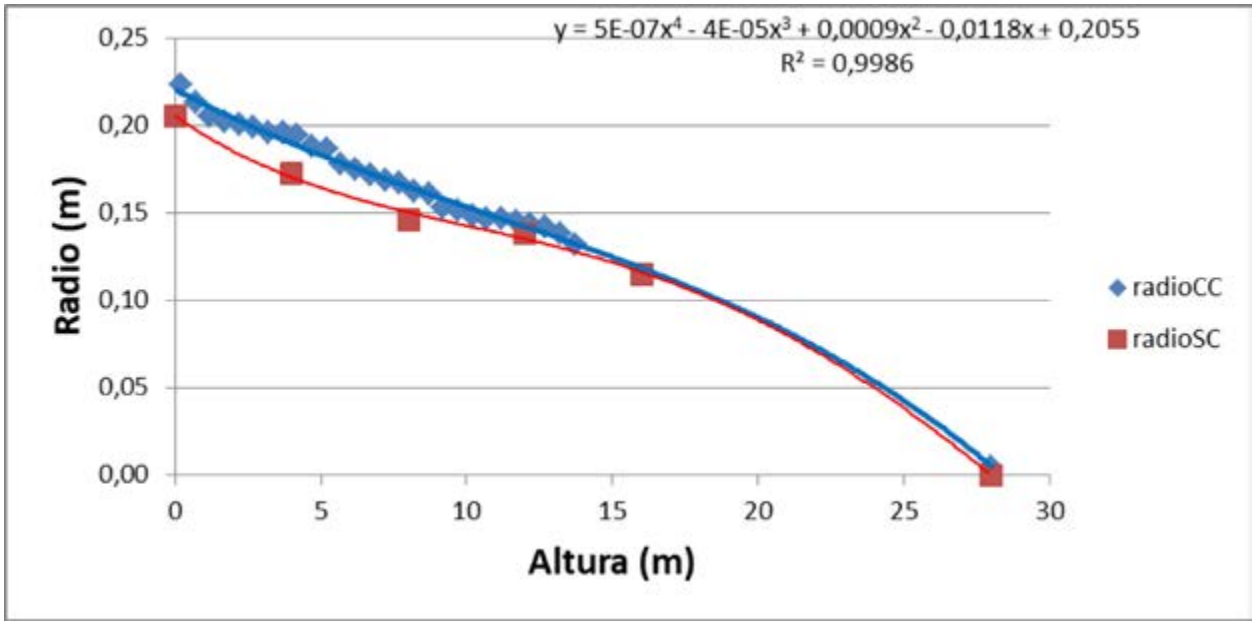
SiGCa SC: $y = 4{,}9562x^4 - 11{,}746x^3 + 9{,}5383x^2 - 3{,}7176x + 0{,}9786$

y es la proporción al cuadrado, en tanto por uno, del diámetro sin corteza a distintas alturas sobre el diámetro sin corteza en la base, mientras que x es la proporción, en tanto por uno, de la altura correspondiente, siendo 0 a la altura de la base (hi=0 m) y 1 a la altura total o altura en punta (hi=h); ***y=(di/d)^2*** y ***x=hi/h***

Coeficiente mórfico (f): para el volumen sin corteza, esta integración permite calcular una superficie de **0,353973** entre 0 y 1

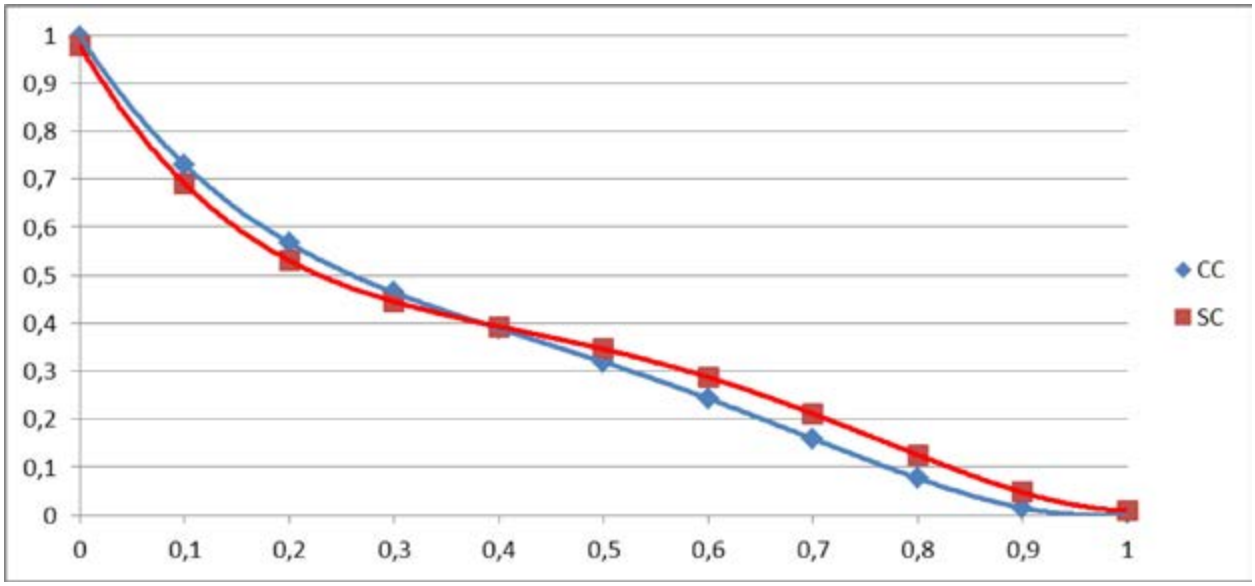


Si se analizan las 4 trozas del pino 1-1, se puede comparar a lo largo de su fuste los diámetros con corteza CC medidos por el láser con 5 diámetros sin corteza SC medidos en esas trozas:

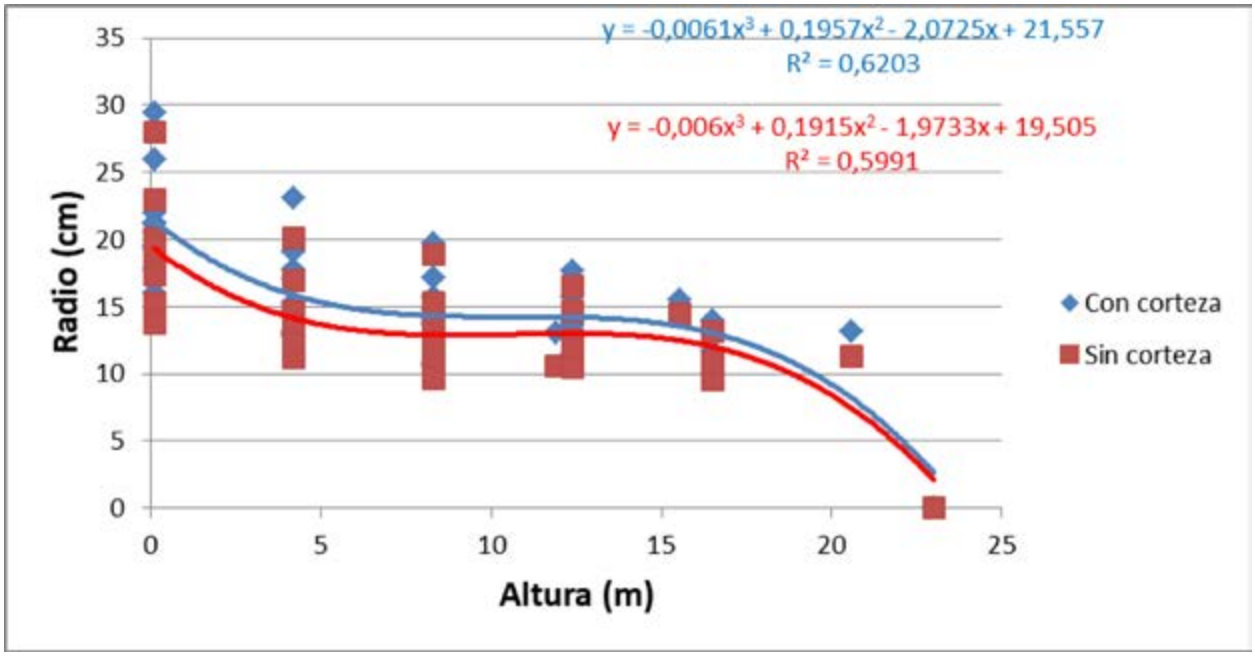


Integrando esa ecuación de perfil de tronco (5E-07x^4 - 4E-05x^3 + 0,0009x^2 - 0,0118x + 0,2055)^2*π, entre 28 y 0 m, se obtiene su volumen total sin corteza de 1,429 m3, frente a un volumen total con corteza de 1,6676 m3 obtenido sumando sus diversas trozas, lo que supone un porcentaje en volumen de corteza del 14%.

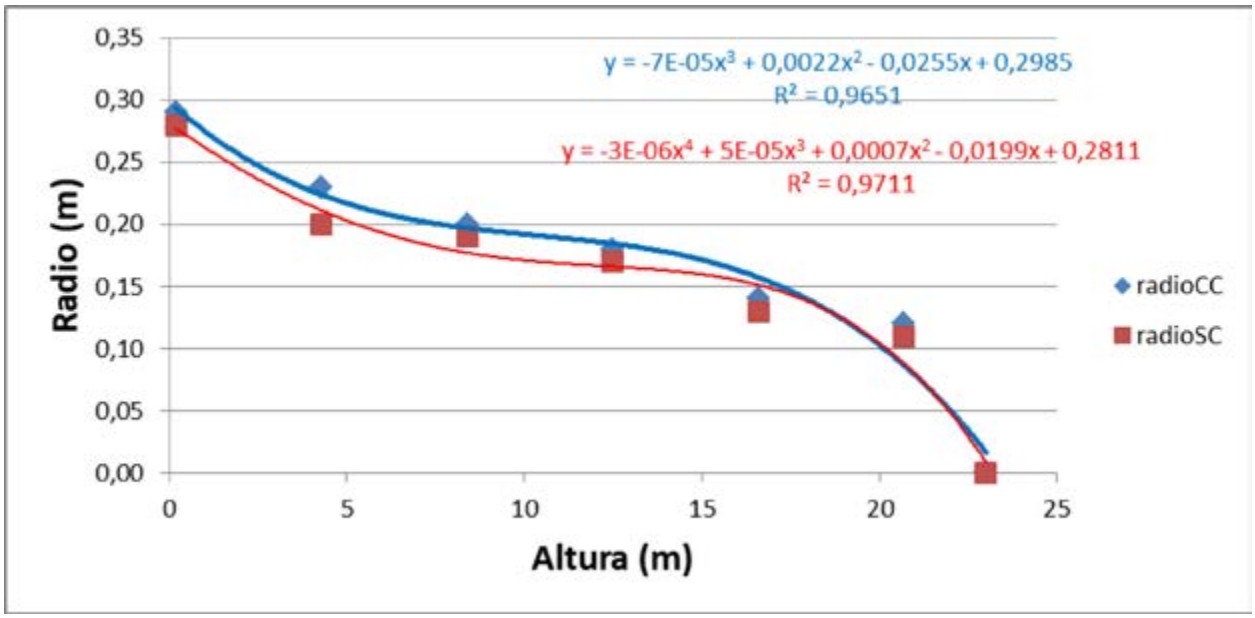
Si se compara la ecuación obtenida para el perfil de tronco sin corteza SC con la obtenida en el apartado anterior para todas las trozas de los árboles escaneados en el proyecto SiGCa-PIMA con corteza (CC), se obtiene esta gráfica. Hay que tener en cuenta que son magnitudes relativas, no absolutas, y se constata que a partir de la altura correspondiente al 40% de la altura media de estos pinos se produce una disminución relativa del espesor de corteza.



En julio de 2020 se ha procedido a levantar una parcela extra en Galdakao (Bizkaia) numerada como 99. En esta parcela se pudieron medir los diámetros de las 30 trozas de 4 m extraídas, con y sin corteza.

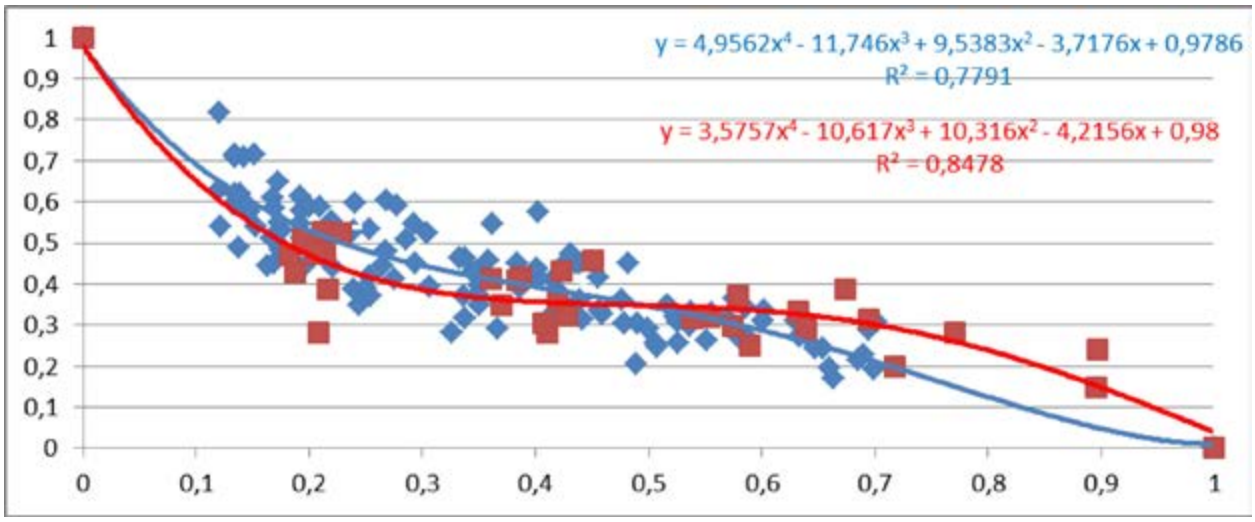


Si se analizan las 5 trozas del pino 99-1, se puede comparar a lo largo de su fuste los diámetros medidos con y sin corteza SC y se puede representar y calcular en la anteriormente citada *web* https://www.calculadora-de-integrales.com/ a través de esta fórmula de perfil de tronco:

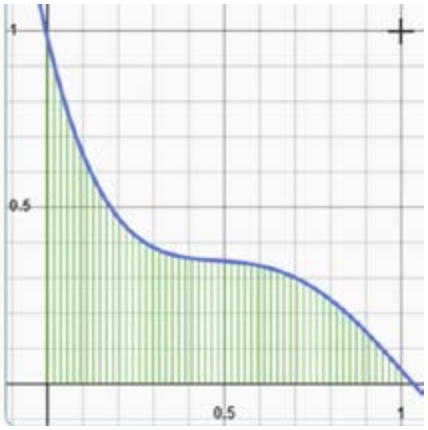


Integrando ambas ecuaciones de perfil de tronco CC y SC, entre 23 y 0 m, se obtiene un volumen total sin corteza de 2,1319 m^3, frente a un volumen total con corteza de 2,5597 m^3, lo que supone un porcentaje en volumen de corteza del 16,7%.

Las 30 trozas obtenidas en los 10 pinos de esa parcela extra de (color **rojo**) frente a la muestra gallega (color **azul**) permiten comprobar que la muestra de Galdakao presenta menores espesores de corteza en las trozas basales, las que más cubican. El porcentaje medio del volumen de la corteza de esas 30 trozas es del 18,22%:



Coeficiente mórfico (f): para el volumen sin corteza de esos 10 pinos, la integración permite calcular una superficie de **0,37176** entre 0 y 1

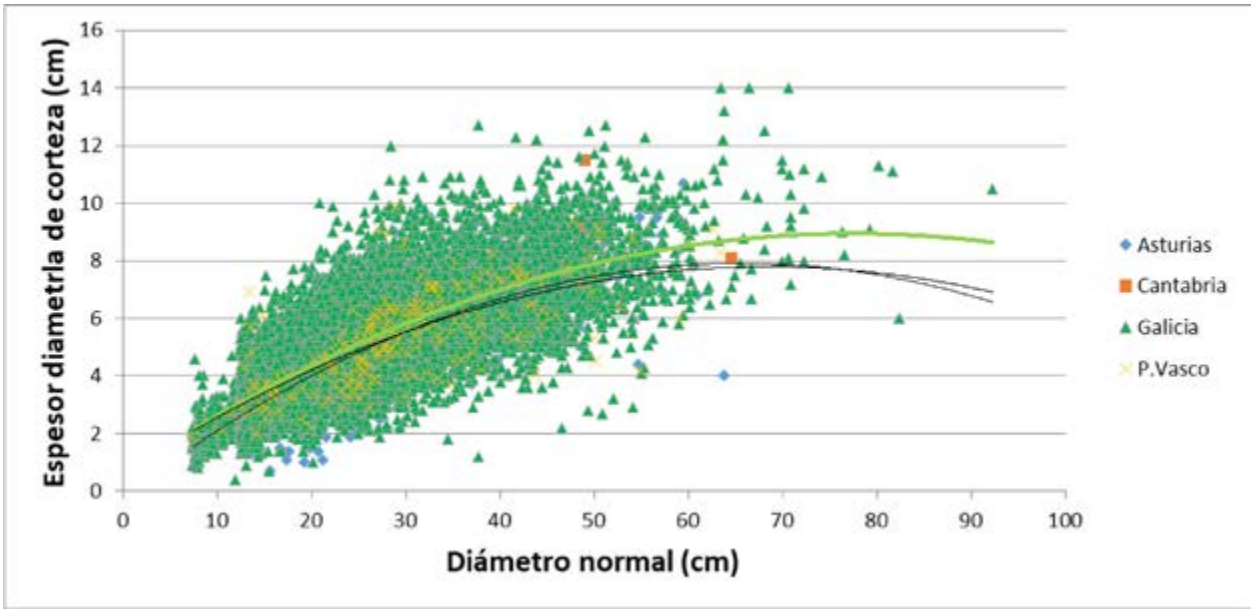


Aspecto de la corteza en trozas basales de los pinos de Galdakao.

Muestra disponible del IFN

Los 13.000 pinos marítimos medidos como árboles tipo en el IFN2 también aportan un gran volumen de información sobre el espesor de corteza, pero únicamente disponible a la altura del diámetro normal.

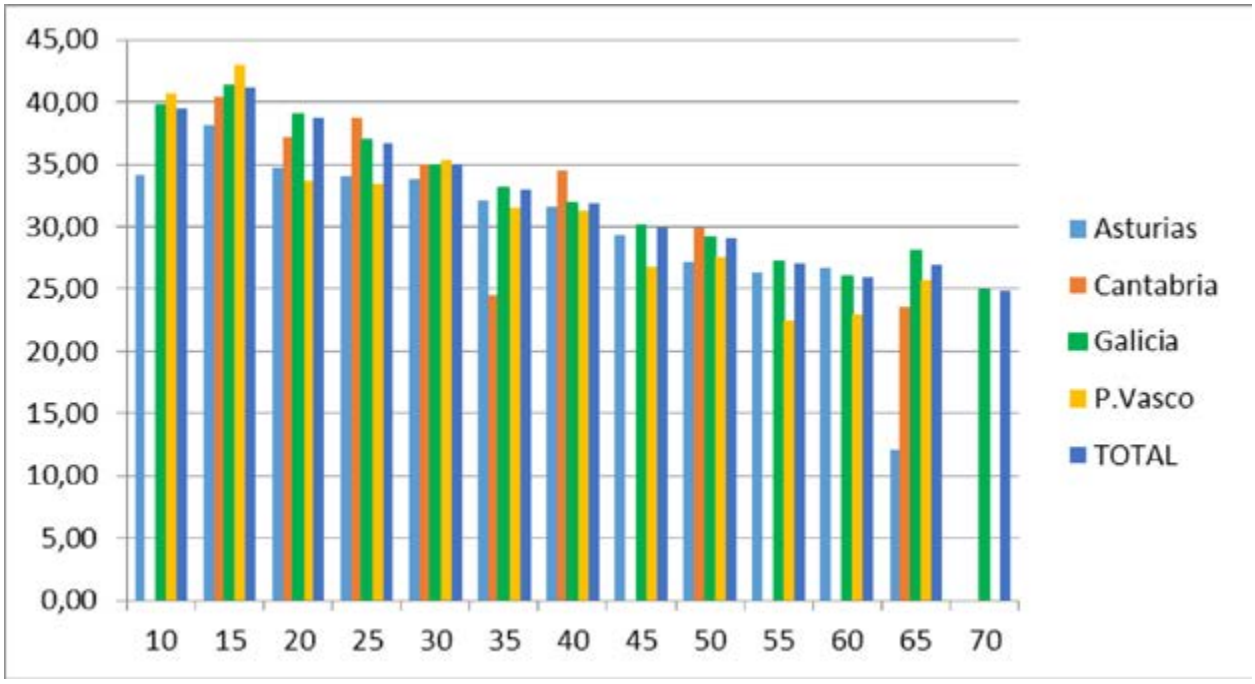
Gráfica y numéricamente, la muestra procedente de pinos gallegos presenta unos mayores espesores medios de corteza en todas las clases diamétricas frente al resto de la Cornisa Cantábrica.



Espesor diametral medio de corteza (mm)					
CD (cm)	Asturias	Cantabria	Galicia	P.Vasco	CANTÁBRICO
10	1,88		2,16	2,23	2,14
15	3,25	3,45	3,48	3,67	3,47
20	3,86	4,09	4,39	3,79	4,36
25	4,66	5,28	5,14	4,70	5,11
30	5,58	5,73	5,79	5,89	5,78
35	6,18	4,30	6,34	6,00	6,32
40	6,87	7,40	6,96	6,82	6,95

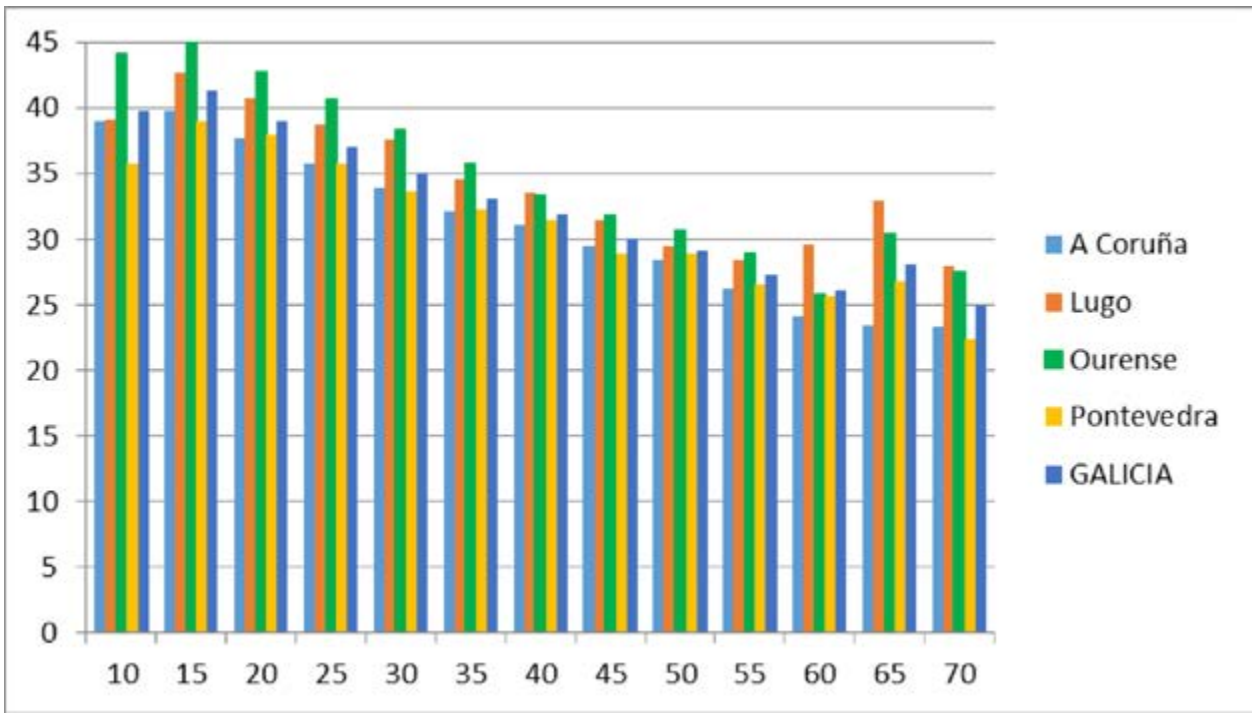
Espesor diametral medio de corteza (mm)					
CD (cm)	Asturias	Cantabria	Galicia	P.Vasco	CANTÁBRICO
45	7,13		7,34	6,41	7,31
50	7,18	8,20	7,87	7,43	7,85
55	7,79		8,07	6,47	8,02
60	8,63		8,38	7,30	8,36
65	4,00	8,10	9,88	8,70	9,43
70			9,80	0,00	9,80
Total	**4,85**	**4,96**	**5,16**	**5,36**	**5,15**

Porcentaje de la sección normal ocupada por la superficie de corteza (%)					
CD (cm)	Asturias	Cantabria	Galicia	P.Vasco	CANTÁBRICO
10	34,16		39,81	40,62	39,51
15	38,18	40,47	41,31	42,96	41,17
20	34,72	37,21	39,03	33,66	38,74
25	34,01	38,80	36,95	33,38	36,73
30	33,84	35,05	35,00	35,42	34,95
35	32,12	24,47	33,08	31,52	32,99
40	31,58	34,47	31,89	31,27	31,86
45	29,29		30,07	26,79	29,96
50	27,14	30,00	29,15	27,57	29,10
55	26,31		27,20	22,43	27,04
60	26,71		26,08	22,94	26,00
65	12,13	23,51	28,10	25,69	26,94
70			24,88		24,88
Total	**33,99**	**34,00**	**36,58**	**33,70**	**36,40**



Esas diferencias medias también son apreciables si se comparan las provincias gallegas:

Porcentaje de la sección normal ocupada por la superficie de corteza (%)					
CD (cm)	**A Coruña**	**Lugo**	**Ourense**	**Pontevedra**	**GALICIA**
10	38,96	39,12	44,13	35,71	39,81
15	39,82	42,72	45,74	38,93	41,31
20	37,69	40,72	42,73	37,89	39,03
25	35,74	38,73	40,71	35,78	36,95
30	33,85	37,62	38,32	33,66	35,00
35	32,14	34,58	35,83	32,25	33,08
40	31,12	33,49	33,37	31,40	31,89
45	29,51	31,47	31,83	28,88	30,07
50	28,37	29,43	30,65	28,90	29,15
55	26,19	28,43	28,96	26,57	27,20
60	24,11	29,54	25,86	25,60	26,08
65	23,43	32,91	30,41	26,79	28,10
70	23,34	27,90	27,56	22,34	24,88
Total	**35,42**	**38,72**	**39,85**	**34,84**	**36,58**



Por tanto, en el IFN2 la corteza ocupa una media del 36,40% de la sección normal.

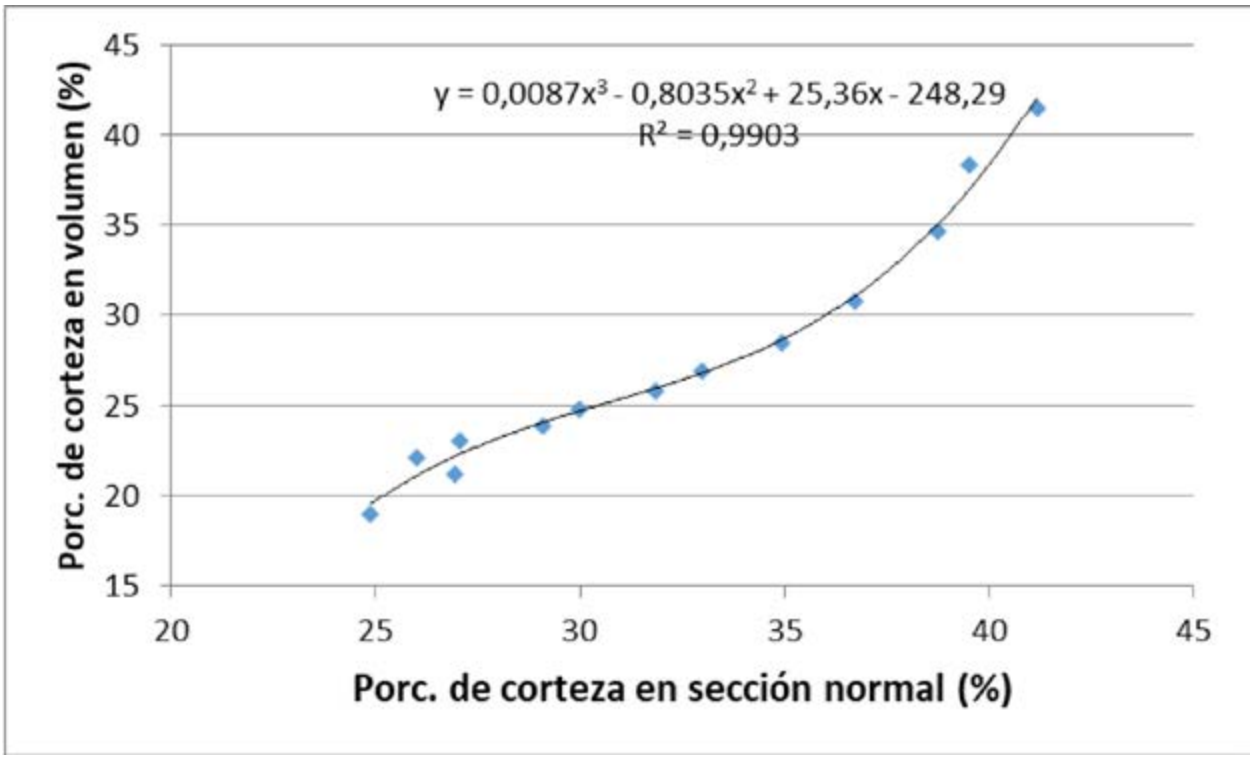
El IFN incluye también ecuaciones para los cálculos de volumen sin corteza, partiendo de los valores de volumen con corteza. En concreto, la ecuación de cubicación sin corteza para *Pinus pinaster* en el IFN (tipo 7) de A Coruña, la provincia con mayor volumen de madera, es:

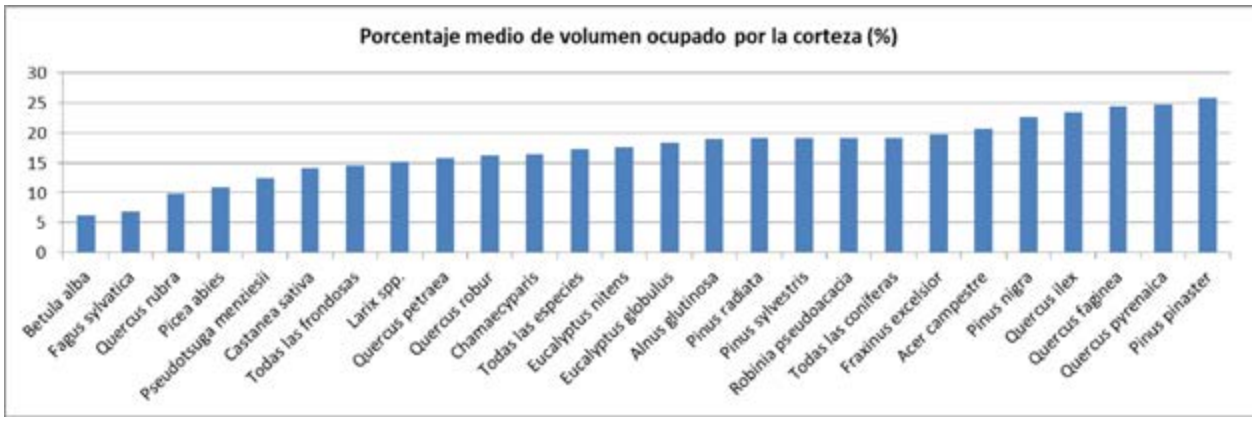
VSC = -15,69+0,7459322*VCC+0,0000167*VCC^2

Volumen maderable VCC y VSC en dm³

La comparación de los resultados de esta ecuación respecto a la aplicada al volumen con corteza VCC supone un volumen medio de corteza cercano al 30%, con unas diferencias que varían entre el 45% (CD 15), el 25% (CD40) y el 20% (CD65) en el conjunto de los pinos del IFN2. Igualmente, relacionando los porcentajes de sección normal y del volumen total ocupados por la corteza en los pinos marítimos empleados como árboles tipo en el IFN2, se obtiene esta curva (R^2 =0,94): **Porcentaje de corteza en volumen (%) = 146,77*D^(-0,472)**. La corteza, de media, alcanzaría el **27%** del volumen total de esos pinos del IFN2.

El pino marítimo es la especie forestal con mayor porcentaje de volumen ocupado por la corteza, como puede comprobarse en los promedios publicados por el IFN3 en el País Vasco.





Ecuación disponible del IFN portugués

El IFN6 portugués, ya citado en el capítulo 4, también incluye en su Anexo Técnico 1.6.4 ecuaciones "mercantiles" para los cálculos de volumen y biomasa. En concreto, la ecuación de cubicación sin corteza para *Pinus pinaster*, calculada en 1994 por Falcão, es:

VSC = 0,0000247 * D^2,1119 * H^0,9261

Volumen maderable sin corteza VSC en m³, diámetro D en cm y altura H en m

La comparación de los resultados de esta ecuación respecto a la publicada en el IFN6 para el volumen con corteza supone un importante volumen medio de corteza, que presenta unas diferencias que varían según una curva entre el 35% (CD 10), el 23% (CD40) y el 18% (CD65). Esta curva (R^2 =0,99) sería: **Porcentaje de corteza en volumen (%) = 0,004*D^2 - 0,5813*D + 39,344**. La corteza, por tanto, alcanzaría de media el 25% del volumen, media ponderada calculada en función del número de árboles del IFNN por CD.

Ejemplo de tocones y trozas descortezadas en Portugal.

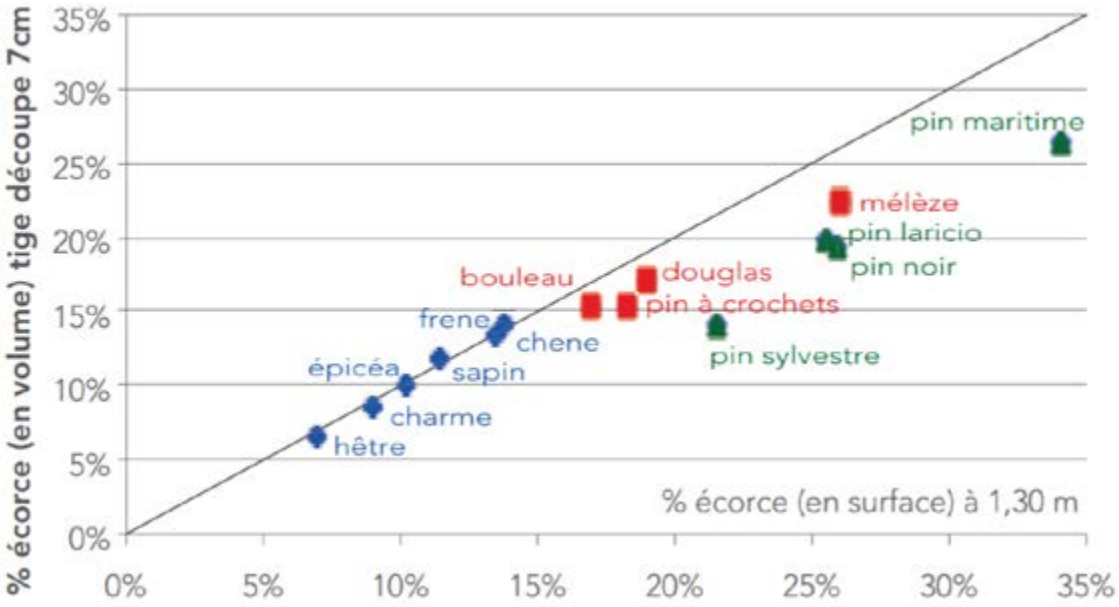
Muestra disponible del IFN francés

Con cerca de 1 millón de hectáreas, el pino marítimo es la principal conífera de Francia en superficie total y en volumen de cortas anuales, aunque en existencias maderables totales es superada por la pícea, el abeto y el pino silvestre.

En el marco del proyecto EMERGE (Élaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Énergie) se han empleado los datos de corteza procedentes de unos cerca de medio millón de árboles, de los cuales unos 30.000 eran pinos marítimos, medidos como árboles tipo en el IFN francés[6].

En ese ambicioso proyecto, la gran base de datos de árboles tipo disponibles ha permitido analizar si el porcentaje de superficie normal de un árbol ocupada por la corteza es representativo de su volumen total de corteza. En principio, hay que aplicar un coeficiente de corrección para relacionar ambos valores, coeficientes que son propios de cada especie, pero también de las dimensiones de cada árbol.

El primer hecho interesante es la variabilidad existente entre las principales especies de Francia en cuanto al espesor medio de su corteza. A la altura de la sección normal, la corteza de los pinos marítimos supone de media el 34% de su superficie, mientras que el **26%** del volumen del fuste de los pinos marítimos es corteza.



Para las especies del **primer grupo** (roble, haya, carpe, fresno, abeto y pícea), el porcentaje de corteza es casi constante a lo largo del fuste, cualquiera sea el tamaño de árbol: se observa un máximo del 2% de diferencia entre el porcentaje de corteza en la sección normal (medida a 1,30 m de altura) y en cualquier sección del fuste, aumentando ligeramente el porcentaje ocupado por la corteza en esas secciones según se asciende en altura. El

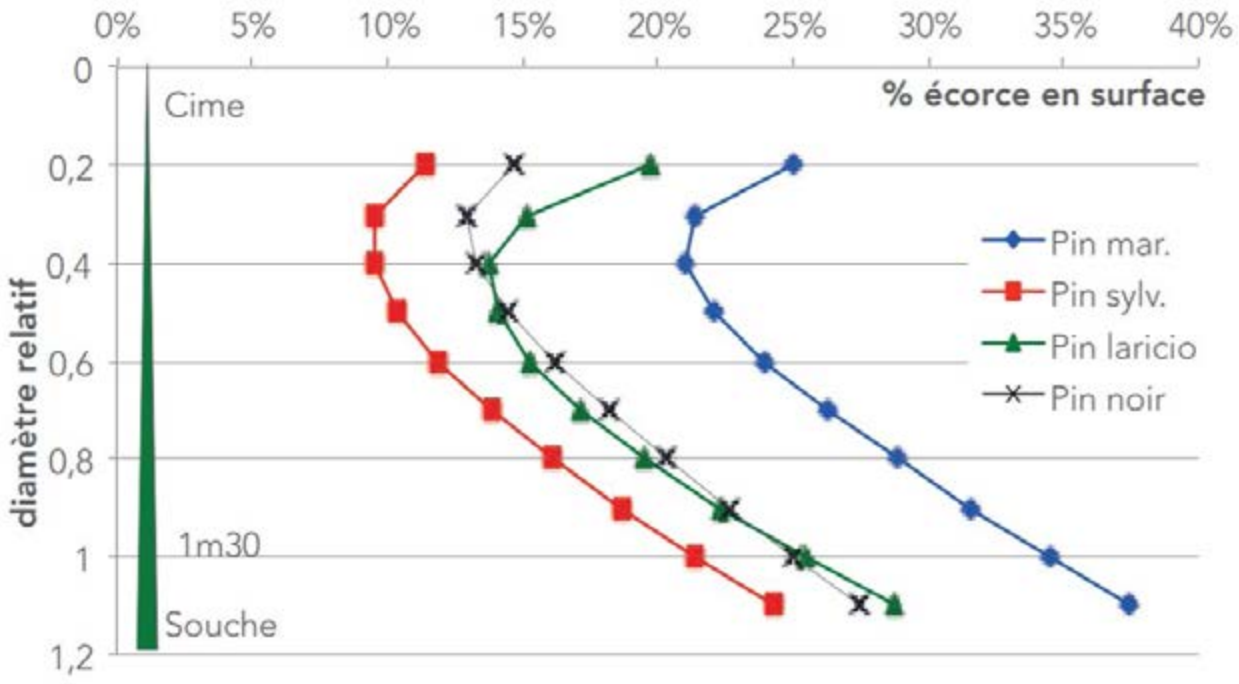
6 Resultados y gráficos entresacados de la publicación de la ONF: *RenDez-Vous techniques de la ONF n° 39-40 - hiver-printemps 2013 y n° 44 - printemps 2014*

porcentaje medio ocupado por la corteza en la sección normal de estas especies varía entre el 7,5 (haya) y el 14% (roble y fresno). Se puede afirmar que en estas especies, el porcentaje de sección ocupado por la corteza a 1,30 m es muy semejante al volumen total ocupado por la corteza en el fuste completo.

Para las especies del **segundo grupo** (abedul, Douglas, alerce y pino uncinata), el porcentaje de corteza disminuye ligeramente cuando se asciende en el fuste: se observa una diferencia de más del 2% entre el porcentaje de corteza en la sección normal y en cualquier sección del fuste, disminuyendo el porcentaje en esas secciones según se asciende en altura. El porcentaje medio ocupado por la corteza en la sección normal de estas especies varía entre el 15 (abedul) y el 25% (alerce). Se puede afirmar que en estas especies, el porcentaje de sección ocupado por la corteza a 1,30 m es ligeramente superior al volumen total ocupado por la corteza en el fuste completo.

Para las especies del **tercer grupo** (pinos), las variaciones el porcentaje de corteza a lo largo del fuste son muy importantes, disminuyendo de manera sensible el porcentaje de corteza en las secciones según se asciende en altura. El porcentaje medio ocupado por la corteza en la sección normal de estas especies varía entre el 21 (pino silvestre) y el 34% (pino marítimo). Se puede afirmar que en estas especies, el porcentaje de sección ocupado por la corteza a 1,30 m es netamente superior al volumen total ocupado por la corteza en el fuste completo.

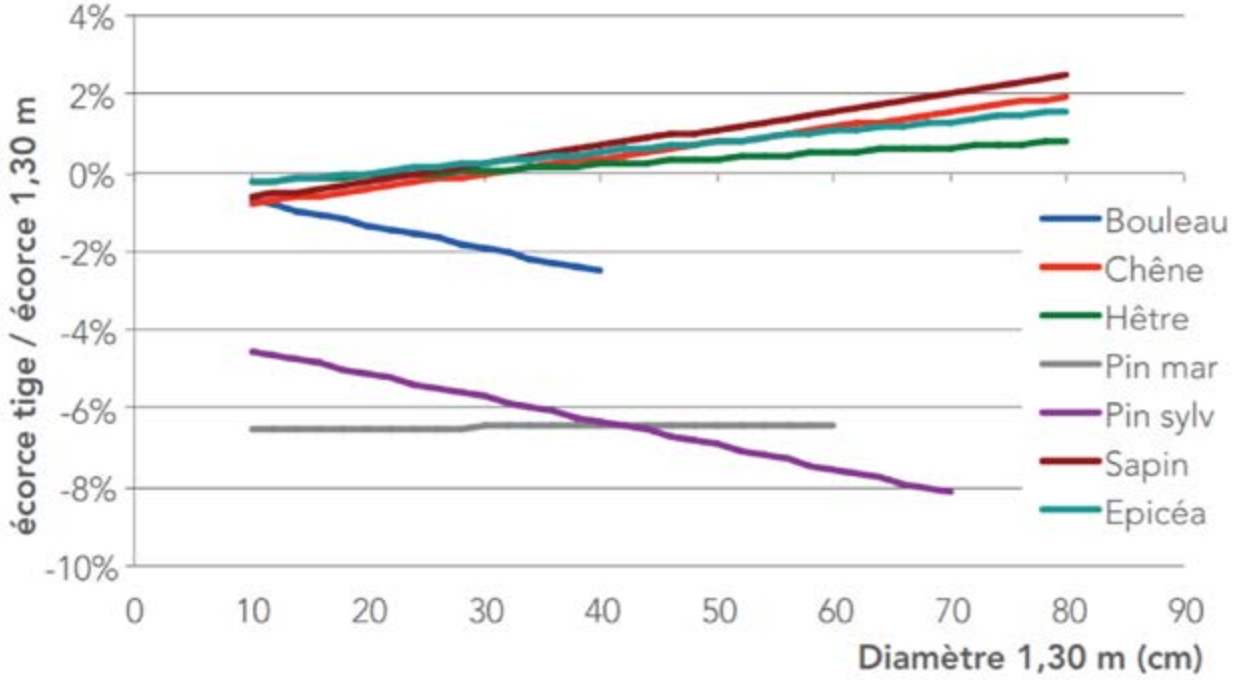
Se constata la gran variabilidad existente entre las diversas especies de pino a lo largo del fuste, con unos mayores espesores medios de corteza en el pino marítimo a cualquier altura del fuste.



En el caso concreto del pino marítimo, se observa que el porcentaje de la sección ocupada por la corteza va disminuyendo desde la base hasta un diámetro equivalente al 40% del diámetro normal, altura a partir de la cual aumenta ligeramente. Ese porcentaje relativo del 40% en el cambio de tendencia en la corteza también ha sido observado en los pinos de la muestra analizada en el proyecto SiGCa-PIMA, donde se ha constatado que cuando la sección o la altura del fuste alcanza el 40% de la sección de la base o de la altura media de esos pinos se produce una disminución relativa del espesor de corteza. Igualmente, en la muestra de 30 trozas de la parcela 99 también se ha constatado ese descenso progresivo en el porcentaje de corteza tanto en sección como en volumen:

Nº Troza	Diámetro relativo medio en la base (%)	Volumen de la corteza (%)	Sección de la corteza en la base (%)
1 (0-4 m)	1,08	19,30	19,54
2 (4-8 m)	0,81	19,34	20,26
3 (8-12 m)	0,74	17,08	18,16
4 (12-16 m)	0,68	12,80	13,53
5 (16-20 m)	0,51	17,70	11,79
Media	**0,85**	**18,22**	**18,16**

Resulta interesante constatar también que el pino marítimo es la especie que muestra una relación más constante entre el porcentaje total ocupado por la corteza en el conjunto de todas las trozas de un árbol y ese mismo porcentaje en la sección normal, relación que apenas varía con las dimensiones del árbol, como sucede en el resto de especies. El porcentaje del volumen ocupada por la corteza en cualquier troza de pino marítimo, hasta un diámetro en punta delgada de 7 cm, es de media inferior en un 6-7% al porcentaje de corteza en su sección normal, cualquiera que sea el tamaño del pino. En el caso del pino silvestre, la diferencia es de alrededor del 5% para pinos pequeños y puede alcanzar el 8% para pinos muy gruesos.



En los pinos marítimos TPB (d<=17,5 cm) el porcentaje de sección ocupado por la corteza a 1,30 m es del 37,7%. En el IFN2 español es del 41,1% y del 41,3% el porcentaje medio en volumen.

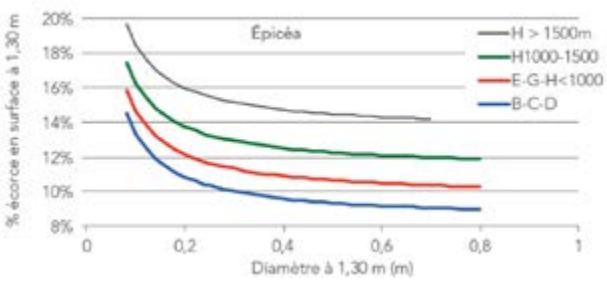
En los pinos marítimos PB (CD 20-25) el porcentaje de sección ocupado por la corteza a 1,30 m es del 37%. En el IFN2 español es del 37,3% y del 31,8% en volumen.

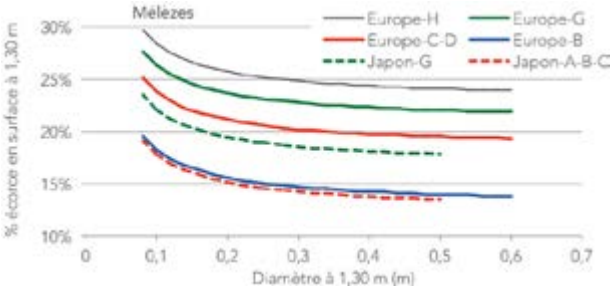
En los pinos marítimos MB (CD 30-45) el porcentaje de sección ocupado por la corteza a 1,30 m es del 33,7%. En el IFN2 español es del 31,5% y del 25,8% el porcentaje medio en volumen.

En los pinos marítimos GB (CD 50-65) el porcentaje de sección ocupado por la corteza a 1,30 m es del 29,1%. En el IFN2 español es del 27,9% y del 23,2% en volumen.

Y en los pinos marítimos TGB (d>67,5 cm) el porcentaje de sección ocupado por la corteza a 1,30 m es del 22,4%. En el IFN2 español es del 24,9% y del 18,9% el porcentaje medio en volumen.

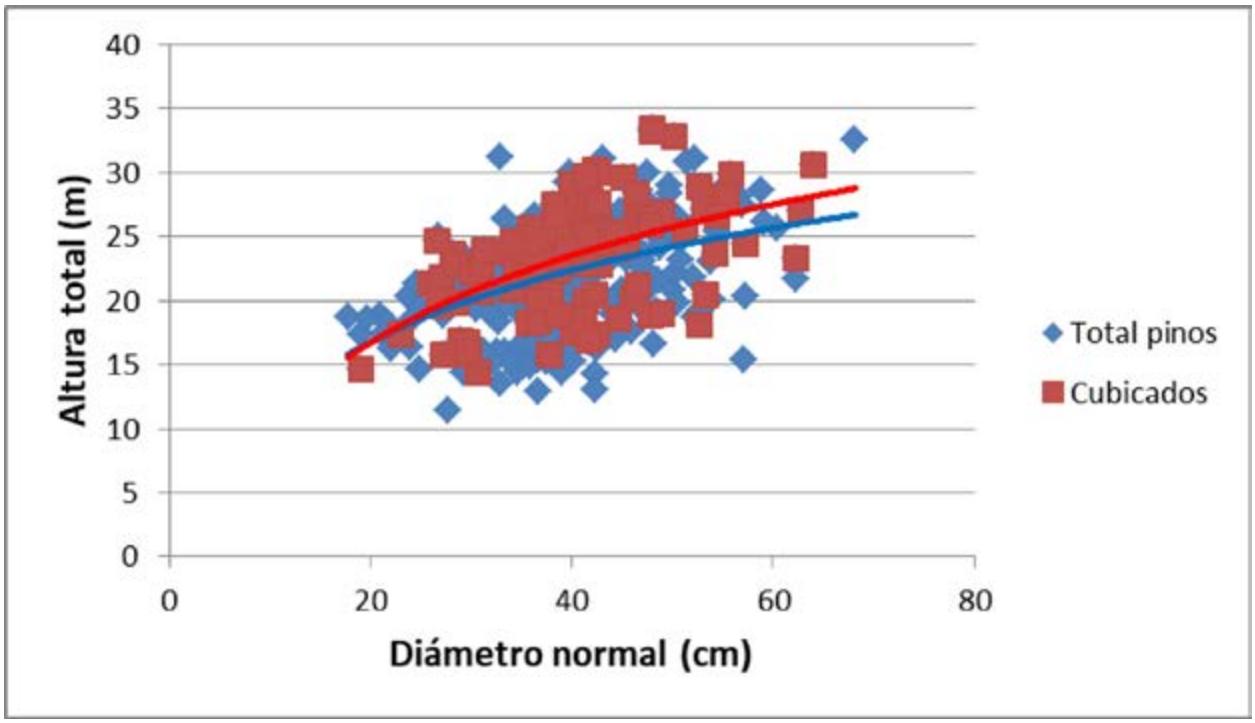
Además, hay que reseñar la variabilidad que, dentro de una misma especie, puede existir en función de su procedencia genética. Tomando como ejemplo de especies de montaña las píceas o los alerces, aparece de forma evidente el efecto de la zona geográfica (con sus diferencias propias de altitud), diferenciando las regiones de llanura con las de media y alta montaña. También es de reseñar las importantes diferencias en porcentaje de corteza en la sección normal entre el alerce europeo y el japonés, principalmente comparando las regiones G (Macizo Central), H (Alpes) y A-B (Oeste y Norte, más oceánicas).





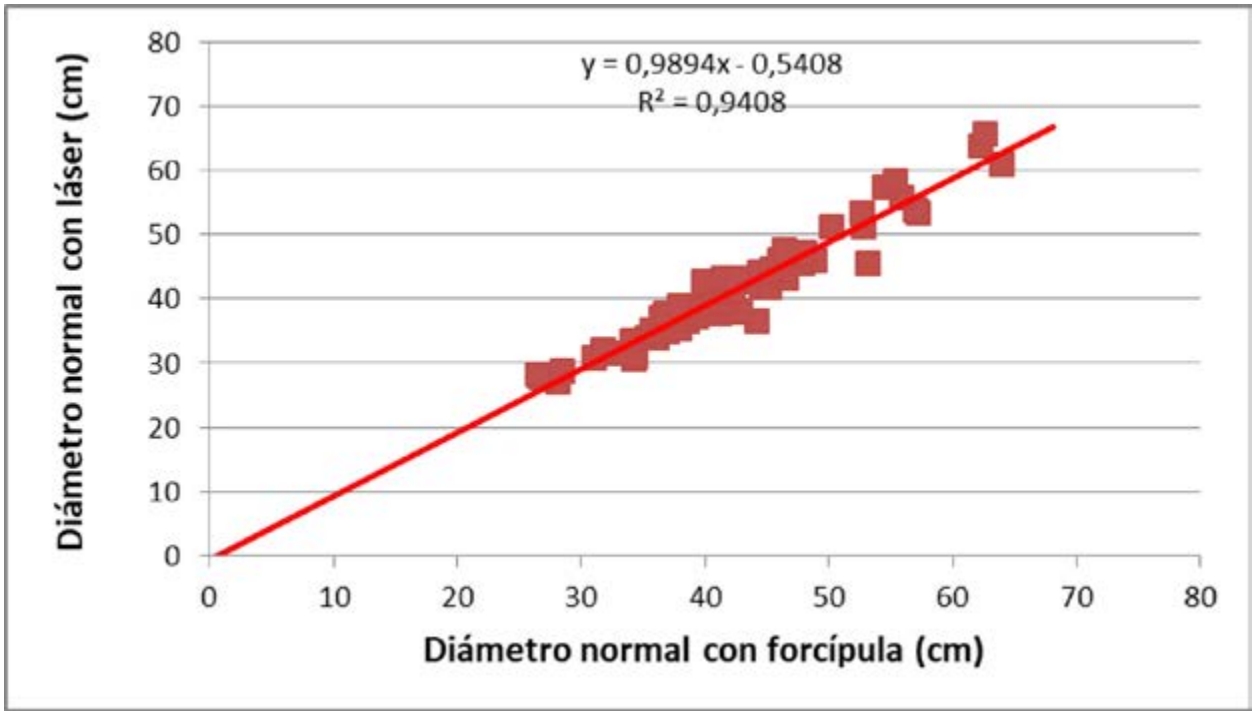
7.- Nuevas ecuaciones de cubicación obtenidas

Uno de los resultados finales de este trabajo es la propuesta de nuevas ecuaciones de cubicación para el pino marítimo del Norte partiendo de la muestra de árboles tipo del proyecto SiGCa-PIMA. Para ello, del total de 350 pinos posibles (35 parcelas * 10 pinos) se ha optado por trabajar con una muestra de 103 pinos cubicados mediante el láser 3D, cubriendo toda la variabilidad de diámetros, alturas y localizaciones del proyecto. Se han elegido 10 parcelas y se han eliminado los pinos cuya altura medida con hipsómetro discrepaba con la altura de los árboles circundantes: finalmente, los pinos cubicados están en las parcelas 1, 4, 5, 6, 8, 12, 13, 18, 19 (Galicia), 23, 24 y 25 (País Vasco).



La muestra elegida presenta unas alturas ligeramente mayores que el resto de pinos, pero más coincidente con la muestra de alturas del IFNN.

La medición del diámetro normal con forcípula y con láser de los 103 pinos elegidos no muestra tampoco sesgo aparente ni diferencias perceptibles. Aparentemente, el error medio por defecto del láser en la medición del diámetro normal ronda los 0,6 cm, aunque dadas la anchura de la corteza, la forma elíptica de la sección normal y la variación en la altura exacta de medición de ese diámetro normal, no parece ser una magnitud apreciable.



Fórmulas biparamétricas

Las ecuaciones de cubicación más frecuentes son del tipo V=f(d,h), con unos exponentes que suelen rondar el 2 para el diámetro normal y el 1 para la altura total, lo que prueba que el diámetro tiene más influencia en el cálculo del volumen que la altura.

La fórmula obtenida ha sido:

log(VTcc) = -10,36170484 + 2,111578884*log(D) + 0,871158922*log(H) *(b1)*

Volumen maderable con corteza VTcc en m³, diámetro D en cm y altura H en m, con logaritmos neperianos.

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,97968987
Coeficiente de determinación R^2	0,95979225
R^2 ajustado	0,95898809
Error típico	0,10844018
Observaciones	103

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libert	*Suma de cuadrados*	*Promedio de los cuadrados*	*F*	*Valor crítico de F*
Regresión	2	28,07035153	14,03517577	1193,54122	1,64245E-70
Residuos	100	1,175927198	0,011759272		
Total	102	29,24627873			

	Coeficientes	*Error típico*	*Estadístico t*	*Probabilidad*	*Inferior 95%*	*Superior 95%*	*nferior 95,0%*	*uperior 95,0%*
Intercepción	-10,361705	0,218070723	-47,51534136	1,9301E-70	-10,79435094	-9,9290587	-10,794351	-9,9290587
Variable X 1	2,11157888	0,061125981	34,54470341	2,1498E-57	1,990306679	2,23285109	1,99030668	2,23285109
Variable X 2	0,87115892	0,064435916	13,51977236	2,6336E-24	0,743319899	0,99899794	0,7433199	0,99899794

Sin embargo, como se ha descrito en el capítulo anterior, el diámetro a 4 m de altura puede ser una alternativa a la medición de la altura total en la determinación del volumen total de un fuste: aunque conlleva un mayor error, puede ser un parámetro más sencillo de medir en campo que la altura total de un pino.

La fórmula obtenida ha sido:

log(VTcc) = -8,1111061 - 0,055669188*log(D) + 2,424172645*log(D4h) *(b2)*

Volumen maderable con corteza VTcc en m³, diámetro D en cm y diámetro a 4 m de altura D4h en cm, con logaritmos neperianos.

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,97345759
Coeficiente de determinación R^2	0,94761968
R^2 ajustado	0,94657208
Error típico	0,12377113
Observaciones	103

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libert	*Suma de cuadrados*	*Promedio de los cuadrados*	*F*	*alor crítico de F*
Regresión	2	27,7143494	13,8571747	904,557048	9,0867E-65
Residuos	100	1,531929327	0,015319293		
Total	102	29,24627873			

	Coeficientes	*Error típico*	*Estadístico t*	*Probabilidad*	*Inferior 95%*	*Superior 95%*	*nferior 95,0%*	*uperior 95,0%*
Intercepción	-8,1111061	0,243075368	-33,3686879	5,2204E-56	-8,5933607	-7,6288515	-8,5933607	-7,6288515
Variable X 1	-0,0556692	0,244993338	-0,227227353	0,82071086	-0,541729	0,43039062	-0,541729	0,43039062
Variable X 2	2,42417265	0,224049211	10,81982229	1,5905E-18	1,97966539	2,8686799	1,97966539	2,8686799

Fórmulas uniparamétricas

Ya se ha comentado el caso de las tarifas de una sola entrada (diámetro o circunferencia) para obtener el volumen total como una importante fuente de error. De hecho, una ecuación de cubicación del tipo V=f(d) conlleva considerables errores.

La fórmula obtenida ha sido:

log(VTcc) = -9,103624625 + 2,511479989*log(D) *(u3)*

Volumen maderable con corteza VTcc en m³, diámetro D en cm, con logaritmos neperianos.

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,94143444
Coeficiente de determinación R^2	0,8862988
R^2 ajustado	0,88517305
Error típico	0,18145007
Observaciones	103

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libert	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	alor crítico de F
Regresión	1	25,92094188	25,92094188	787,293214	1,7398E-49
Residuos	101	3,325336844	0,032924127		
Total	102	29,24627873			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	nferior 95,0%	uperior 95,0%
Intercepción	-9,1036246	0,330002602	-27,58652375	7,9415E-49	-9,758261	-8,4489882	-9,758261	-8,4489882
Variable X 1	2,51147999	0,089507921	28,05874576	1,7398E-49	2,33392035	2,68903963	2,33392035	2,68903963

En este caso, el diámetro a 4 m de altura puede ser un buen indicador del volumen total de un fuste y puede ser más sencillo de medir que la altura total de un pino.

La fórmula obtenida ha sido:

log(VTcc) = -8,144020684 + 2,374868807*log(D4h) *(u4)*

Volumen maderable con corteza VTcc en m³, diámetro a 4 m de altura D4h en cm, con logaritmos neperianos.

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,9734437
Coeficiente de determinación R^2	0,94759264
R^2 ajustado	0,94707375
Error típico	0,12318867
Observaciones	103

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libert	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	alor crítico de F
Regresión	1	27,71355843	27,71355843	1826,21018	1,7357E-66
Residuos	101	1,532720297	0,015175448		
Total	102	29,24627873			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	nferior 95,0%	uperior 95,0%
Intercepción	-8,1440207	0,194281848	-41,91858777	1,0966E-65	-8,5294236	-7,7586178	-8,5294236	-7,7586178
Variable X 1	2,37486881	0,055573051	42,73418041	1,7357E-66	2,26462682	2,48511079	2,26462682	2,48511079

Fórmulas triparamétricas

La introducción de una tercera variable relacionada con la forma de los troncos en las ecuaciones de cubicación suele mejorar su precisión. Por tanto, se comienza probando una fórmula con 3 entradas del tipo V=f(d,h,d4).

La fórmula obtenida ha sido:

log(VTcc) = -9,391383685 + 0,504612084*log(D) + 0,655923243*log(H) + 1,610767371*log(D4h) *(t5)*

Volumen maderable con corteza VTcc en m³, diámetro D en cm, altura H en m y diámetro a 4 m de altura D4h en cm, con logaritmos neperianos.

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,99115068
Coeficiente de determinación R^2	0,98237966
R^2 ajustado	0,98184571
Error típico	0,07214808
Observaciones	103

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libert	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	alor crítico de F
Regresión	3	28,73094948	9,576983161	1839,83607	1,1938E-86
Residuos	99	0,515329246	0,005205346		
Total	102	29,24627873			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	nferior 95,0%	uperior 95,0%
Intercepción	-9,3913837	0,168729183	-55,65951029	1,6182E-76	-9,726179	-9,0565884	-9,726179	-9,0565884
Variable X 1	0,50461208	0,148331227	3,40192753	0,00096658	0,21029075	0,79893342	0,21029075	0,79893342
Variable X 2	0,65592324	0,04693564	13,9749503	3,7051E-25	0,56279275	0,74905374	0,56279275	0,74905374
Variable X 3	1,61076737	0,142984516	11,26532728	1,9468E-19	1,32705507	1,89447967	1,32705507	1,89447967

Otra tercera variable relacionada con la forma de los troncos puede ser la altura maderable, que se suele definir como la altura a la cual el diámetro en punta delgada alcanza los 20 cm. Por tanto, la nueva fórmula con 3 entradas podría ser del tipo V=f(d,h,h20).

La fórmula obtenida ha sido:

log(VTcc) = -8,741669252 + 1,65215485*log(D) + 0,587551095*log(H) + 0,374556242*log(H20) *(t6)*

Volumen maderable con corteza VTcc en m³, diámetro D en cm, altura H en m y altura maderable H20 en m, con logaritmos neperianos.

Fórmula biparamétrica basada en la altura de Pressler

La altura de Pressler es la altura a la que el fuste alcanza un diámetro que es igual a la mitad del diámetro de la base o del diámetro normal. Pressler descubrió que, independientemente de la forma geométrica de un fuste regular, su volumen podía expresarse mediante su sección normal y su altura de Pressler.

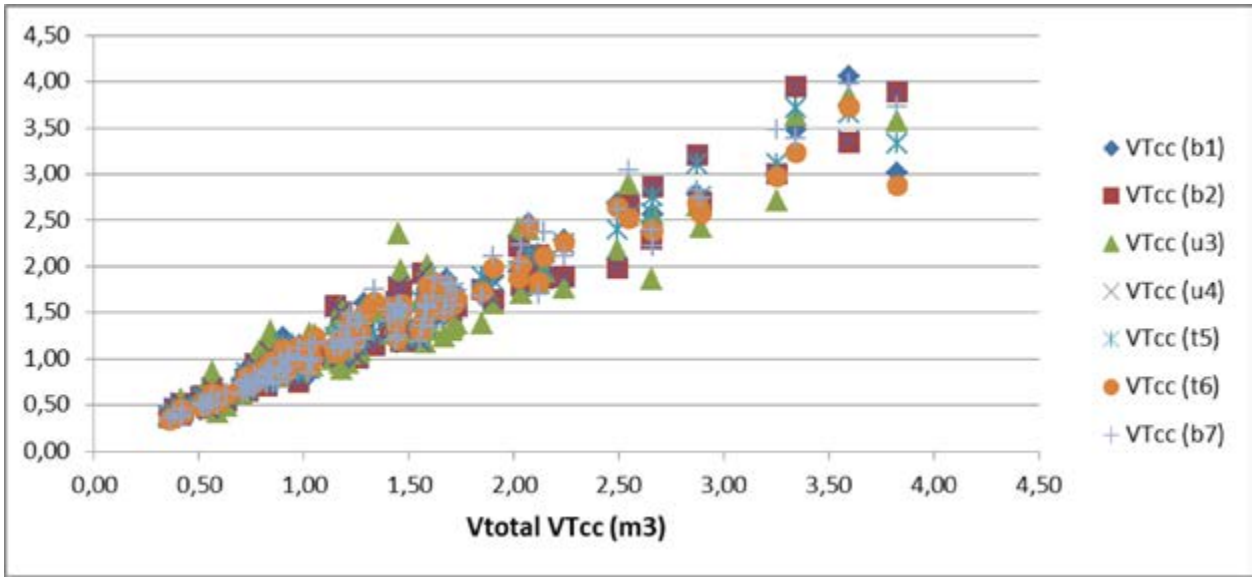
La fórmula propuesta por Pressler es:

VTcc = 2/3 * D^2*π/40000 * Hp *(b7)*

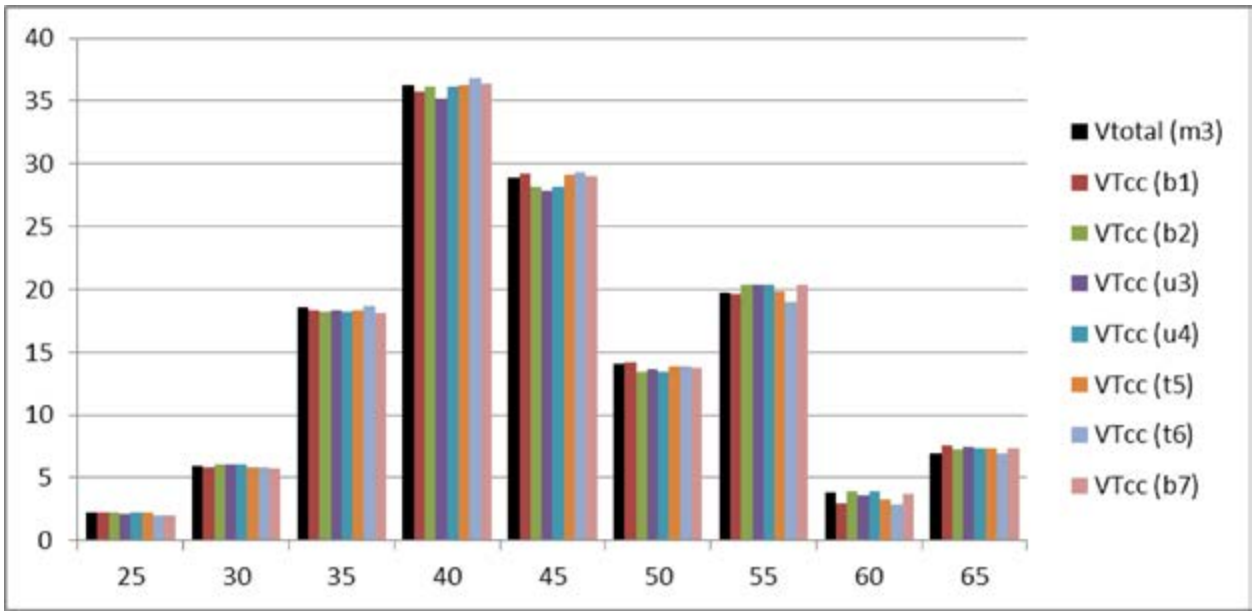
Volumen maderable con corteza VTcc en m³, diámetro D en cm, altura H en m y altura de Pressler Hp en m.

Comparación de resultados

A partir de la muestra empleada para calcular esas 6 ecuaciones, se calcula el volumen de cada uno de esos 103 árboles empleando esas ecuaciones (eje Y) y se compara con el volumen total obtenido troza a troza (eje X):



CD (cm)	Muestra	VTcc (m³)	(b1)	(b2)	(u3)	(u4)	(t5)	(t6)	(b7)
25	5	2,173	2,213	2,225	2,113	2,219	2,266	2,029	1,999
30	11	6,007	5,877	6,030	6,101	6,025	5,881	5,818	5,761
35	21	18,518	18,380	18,235	18,290	18,227	18,298	18,692	18,148
40	30	36,270	35,699	36,196	35,248	36,170	36,245	36,790	36,353
45	18	28,943	29,209	28,190	27,826	28,190	29,086	29,370	28,973
50	7	14,057	14,131	13,391	13,594	13,402	13,880	13,894	13,755
55	8	19,779	19,672	20,358	20,404	20,377	19,880	18,983	20,423
60	1	3,827	3,017	3,894	3,574	3,893	3,330	2,881	3,721
65	2	6,942	7,535	7,290	7,464	7,304	7,368	6,962	7,355
Total	**103**	**136,515**	**135,732**	**135,809**	**134,613**	**135,807**	**136,234**	**135,418**	**136,489**



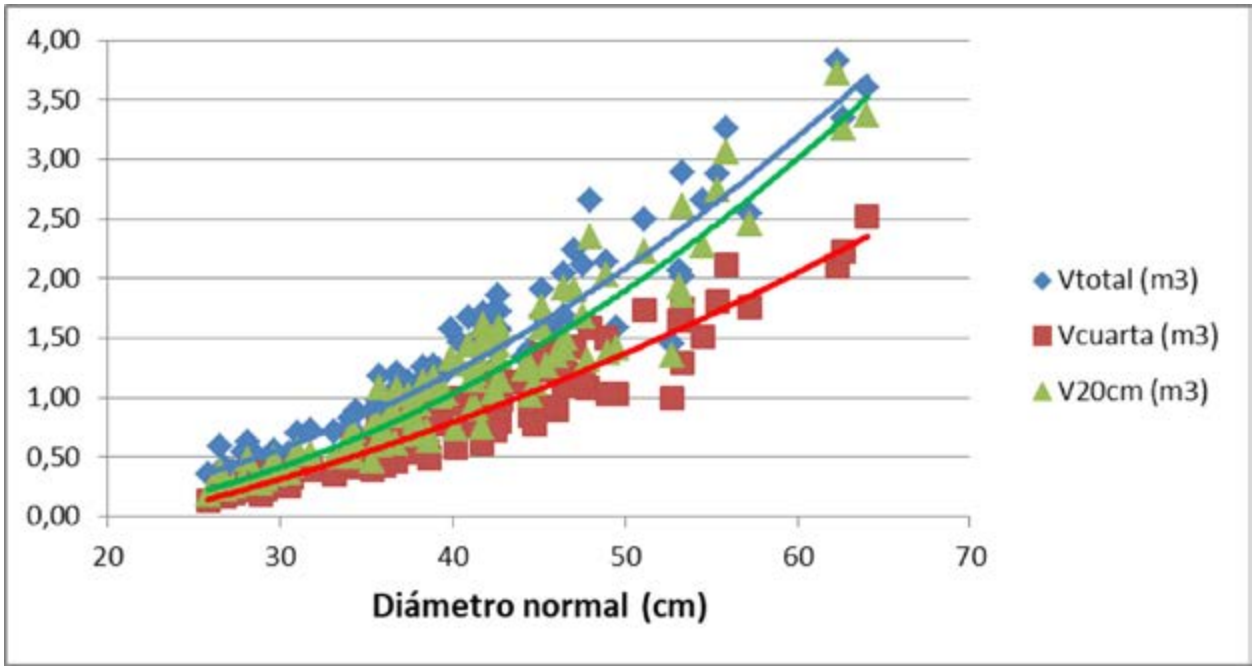
Fórmula biparamétrica basada en la altura a la cuarta

La altura "a la cuarta" es una tradición forestal en el País Vasco, aunque sin gran fundamento técnico. Como se ha explicado en el capítulo 1, la base de la cubicación a la cuarta de un fuste es asimilar su circunferencia en el centro al perímetro de un cuadrado inscrito, de tal modo que el volumen obtenido se aproximara a la madera que se obtendría en el aserrado en forma de tablones. El diámetro en punta delgada se suele asimilar a 20 cm y en punta gruesa sería el diámetro normal. Según la zona geográfica vasca, se le podría aplicar una deducción por la corteza, por la curvatura o por otras razones.

Una posible fórmula para expresar ese volumen a la cuarta puede ser:

VTccCuarta = (D+20)^2*π^2/64 * H20 / 10000

Volumen a la cuarta con corteza VTccCuarta en m³, diámetro D en cm y altura maderable H20 en m, con logaritmos neperianos.



Fórmula biparamétrica basada en las alturas normales de Denzin

En el capítulo 4 se ha reseñado la posibilidad de empleo de unas sencillas fórmulas de cubicación basada en las alturas normales de Denzin propias de cada especie.

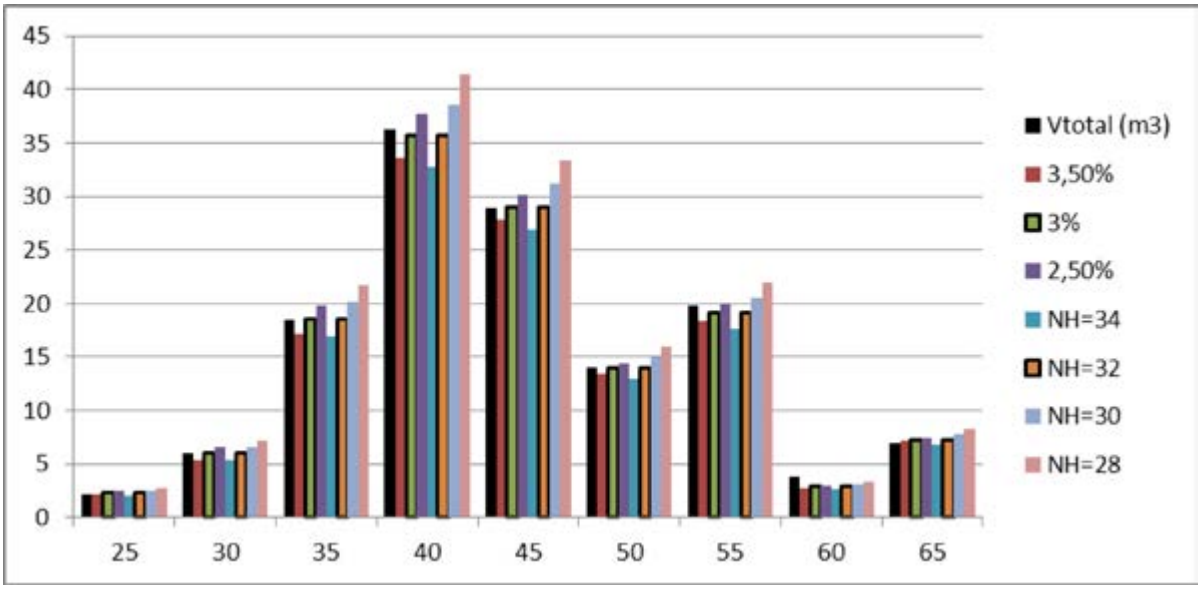
Así, aplicando a la muestra de 103 pinos del proyecto SiGCa-PIMA, la nueva fórmula obtenida para el pino marítimo del Norte es

V = D^2/1000*(1-0,03*(32 - H))

Volumen V en m³, diámetro normal D en cm y altura total H en m.

Estos valores, de altura normal NH de los pinos marítimos de 32 m y de variación media del +3% del volumen por cada m de diferencia con NH, son los que mejor se ajustan al volumen total de la citada muestra del proyecto SiGCa-PIMA. Si se van probando otros valores semejantes, se comprueba que el volumen total de esos pinos se aleja del volumen real cubicado por trozas y que el descenso de los valores de NH y de la variación media se traducen en mayores volúmenes unitarios.

		NH = 32 m			Variación media del +3%			
CD (cm)	VTcc (m3)	+3,5%	+3%	+2,5%	NH=34	NH=32	NH=30	NH=28
25	2,173	2,079	2,289	2,498	2,076	2,289	2,501	2,714
30	6,007	5,377	5,991	6,604	5,410	5,991	6,571	7,151
35	18,518	17,180	18,507	19,834	16,919	18,507	20,095	21,683
40	36,270	33,618	35,668	37,718	32,790	35,668	38,546	41,424
45	28,943	27,876	29,011	30,146	26,862	29,011	31,160	33,309
50	14,057	13,482	13,943	14,404	12,940	13,943	14,946	15,948
55	19,779	18,334	19,104	19,874	17,681	19,104	20,528	21,951
60	3,827	2,693	2,862	3,032	2,630	2,862	3,095	3,328
65	6,942	7,131	7,260	7,389	6,778	7,260	7,742	8,224
Total	**136,515**	**127,769**	**134,634**	**141,499**	**124,085**	**134,634**	**145,184**	**155,733**



8.- Razón de volumen

En el capítulo anterior se ha comentado la existencia en el País Vasco desde 2016 de unas nuevas ecuaciones de cubicación para diversas especies productivas, acompañadas de unas ecuaciones de clasificación de productos maderables siguiendo el método de la razón de volumen, desarrollado por Chauchard y Sbrancia[7]. La ecuación de razón de volumen correspondiente al pino marítimo, basadas en el escaneo de 42 pinos con diámetros normales comprendidos entre 23 y 61 cm y situados en diversas plantaciones de los Territorios de Álava y Bizkaia, era:

R = 1-1,10772*(Dpf^3,04944)/(D^3,13474) R2 = 93,02%

Empleando ahora la muestra de 103 pinos del proyecto SiGCa-PIMA, la nueva fórmula obtenida para el pino marítimo del Norte es:

R = 1-0,409640079*(Dpf^2,391595739)/(D^2,19348766) R2 = 90,11%

7 Chauchard, L.; Sbrancia, R.; 2005. Funciones de razón para la estimación de los volúmenes maderables de Pino radiata en el País Vasco. Invest Agrar: Sist Recur For 14(2), 185-194.

*Para el cálculo de la razón de volumen (R) de un pino de diámetro D en cm, se emplea el volumen con corteza (VTcc en m³) hasta distintos diámetros en punta fina (Dpf en cm); así, para poder estimar el volumen hasta 30 cm, se emplearía: V30=VTcc*R30*

Resumen

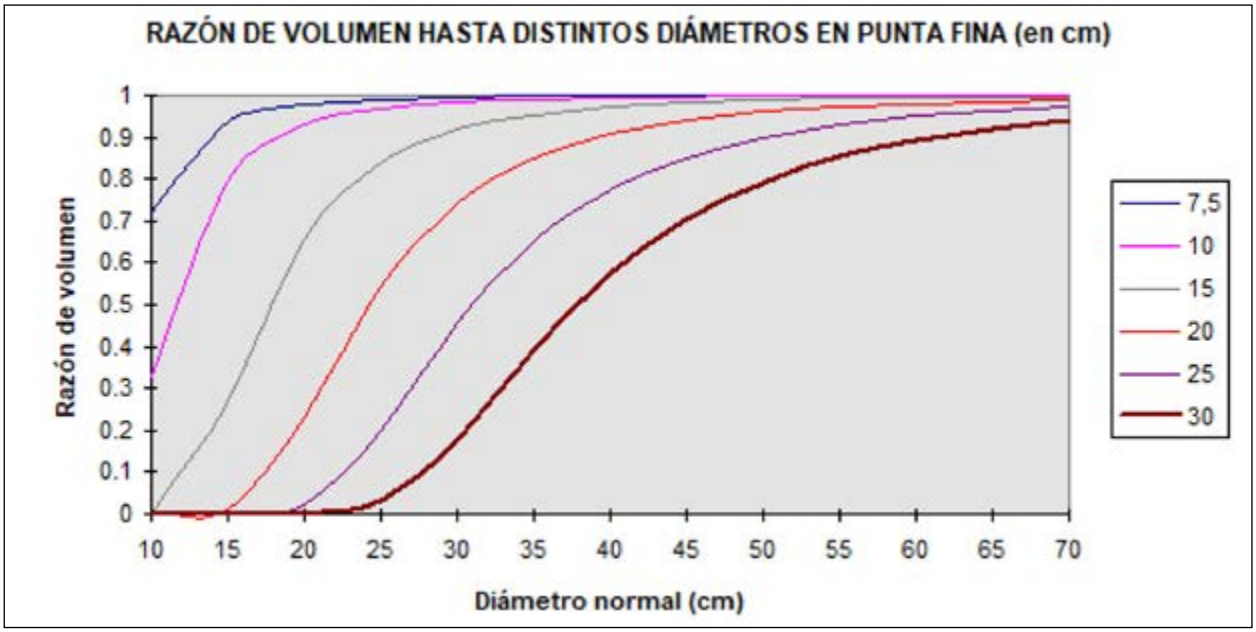
a	0,40964008
b	2,39159574
c	2,19348766

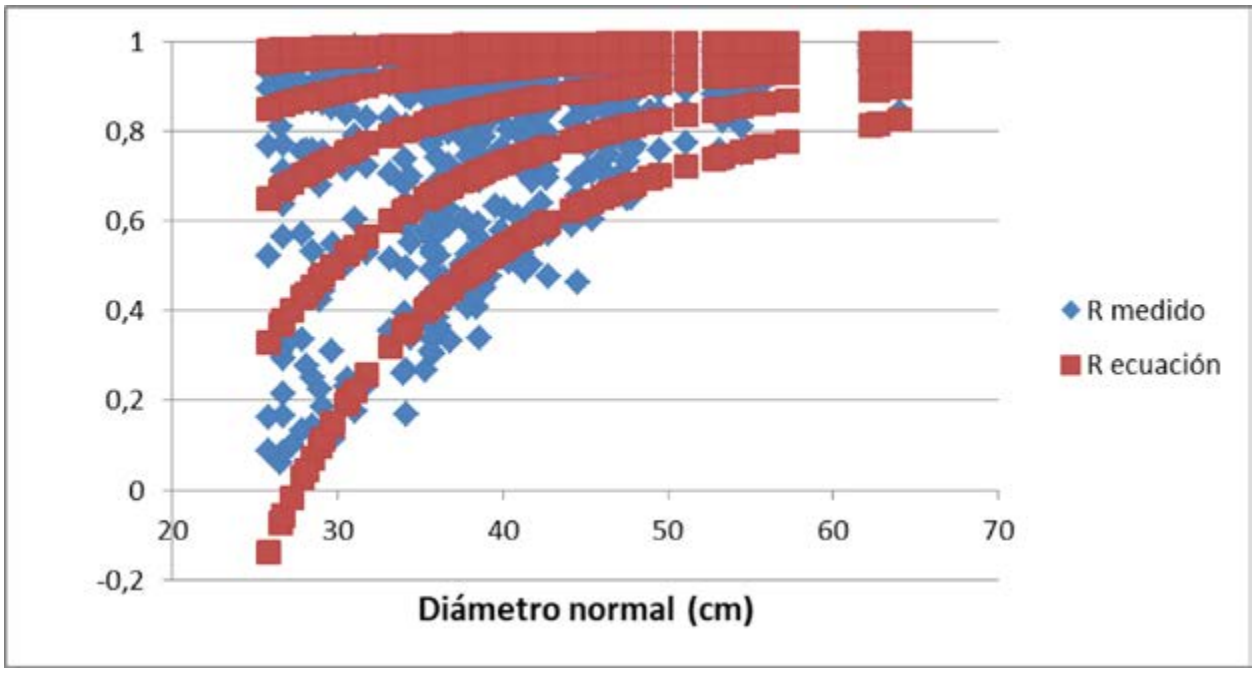
Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,94925219
Coeficiente de determinación R^2	0,90107973
R^2 ajustado	0,90091914
Error típico	0,06453895
Observaciones	618

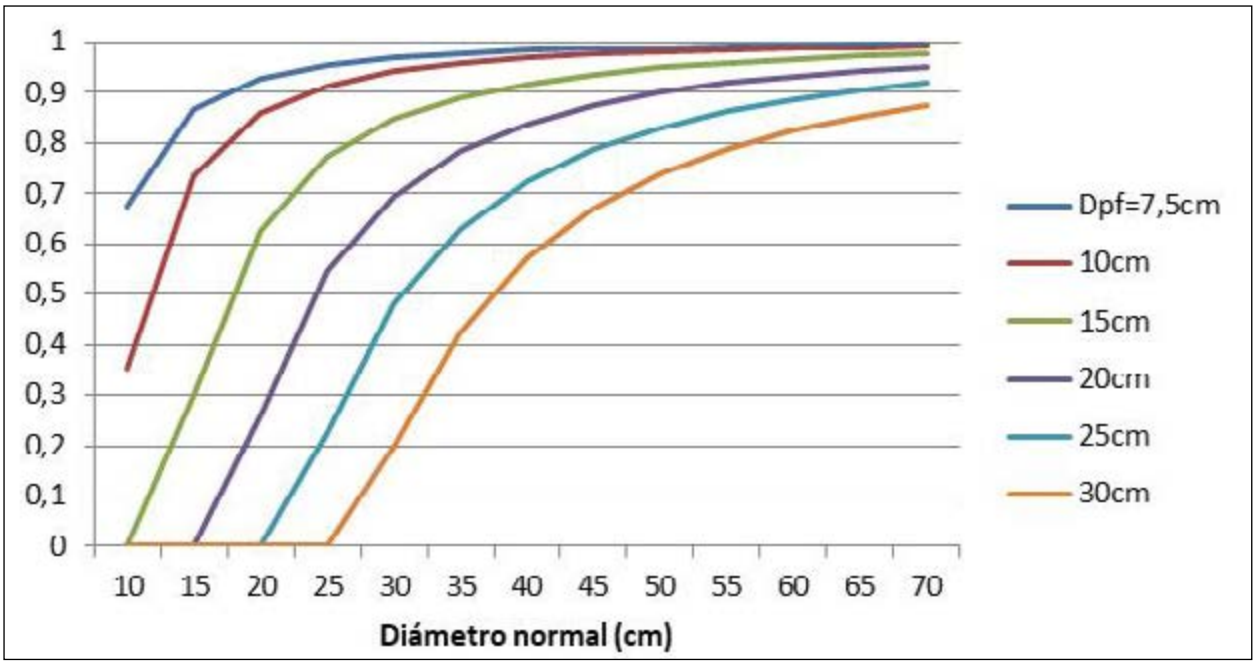
ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libert	*Suma de cuadrados*	*Promedio de los cuadrados*	*F*	*alor crítico de F*
Regresión	1	23,37234924	23,37234924	5611,23716	0
Residuos	616	2,56580977	0,004165276		
Total	617	25,93815901			

	Coeficientes	*Error típico*	*Estadístico t*	*Probabilidad*	*Inferior 95%*	*Superior 95%*	*nferior 95,0%*	*uperior 95,0%*
Intercepción	0,04301884	0,010577947	4,066842003	5,384E-05	0,02224563	0,06379205	0,02224563	0,06379205
Variable X 1	0,93440907	0,012474057	74,90819156	0	0,90991224	0,9589059	0,90991224	0,9589059







	Razón de volumen en función del Diámetro en punta fina (Dpf)					
Diámetro normal (cm)	Dpf=7,5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm
10	0,675	0,354	-	-	-	-
15	0,867	0,734	0,300	-	-	-
20	0,929	0,859	0,627	0,258	-	-
25	0,956	0,913	0,772	0,545	0,225	-
30	0,971	0,942	0,847	0,695	0,480	0,196
35	0,979	0,959	0,891	0,783	0,629	0,427
40	0,984	0,969	0,919	0,838	0,724	0,572
45	0,988	0,976	0,937	0,875	0,786	0,670
50	0,990	0,981	0,950	0,901	0,831	0,738
55	0,992	0,985	0,959	0,919	0,863	0,787
60	0,994	0,987	0,967	0,933	0,886	0,824
65	0,995	0,989	0,972	0,944	0,905	0,853
70	0,995	0,991	0,976	0,952	0,919	0,875

9.- Métodos ópticos

Los resultados anteriores han sido empleados mediante distintos tipos de láser, pero se trata de una herramienta sofisticada y cara, además de susceptible de proporcionar volúmenes muy grandes de datos. Un sustitutivo más económico y fácil de manejar podría ser la fotogrametría obtenida mediante fotografías terrestres. Un método así emplea la herramienta ForeStereo, descrita en el capítulo 4.

Un observador que tome diversas fotografías alrededor del fuste y que emplee alguno de los distintos *softwares* de fotogrametría disponibles podría crear una nube de puntos de ese mismo fuste semejante a la creada por un láser 3D. Esta labor se facilita si previamente se han clavado o pintado diversas figuras geométricas en el fuste, con el fin de emplear sus vértices como puntos de referencia para unir esas fotografías consecutivas.

Desde HAZI, en colaboración con la Escuela Forestal de Murguia (Álava), se está trabajando en esta posibilidad, probando tanto fotografías normales, como de gran angular, panorámicas o tipo "ojo de pez".

Por último, hay que citar la existencia de cámaras 3D o 360º, baratas y capaces de tomar vídeos o fotografías hemisféricas. Esas imágenes permiten visualizar en pantalla toda la escena que rodea a la cámara, pero aún no se dispone de la capacidad de medir distancias sobre esas escenas, como sí permiten los visores asociados a los distintos tipos de láser 3D.

Ejemplos de cámaras 360, de fotos "ojo de pez" y de imágenes del láser de mano, aplicadas a la parcela 27 de Liencres (Cantabria).

10.- Ejemplo: cubicación del pinar de Larrabetzu

Las parcelas 23, 24 y 25 han sido ubicadas en un pinar del monte Txispamendi, en Larrabetzu (Bizkaia) de próxima corta final, correctamente aclarado y con una edad estimada en torno a 51 años. El día 5 de marzo de 2019 este pinar fue tasado por un técnico de la Asociación de Forestalistas de Bizkaia y se obtuvieron estos datos:

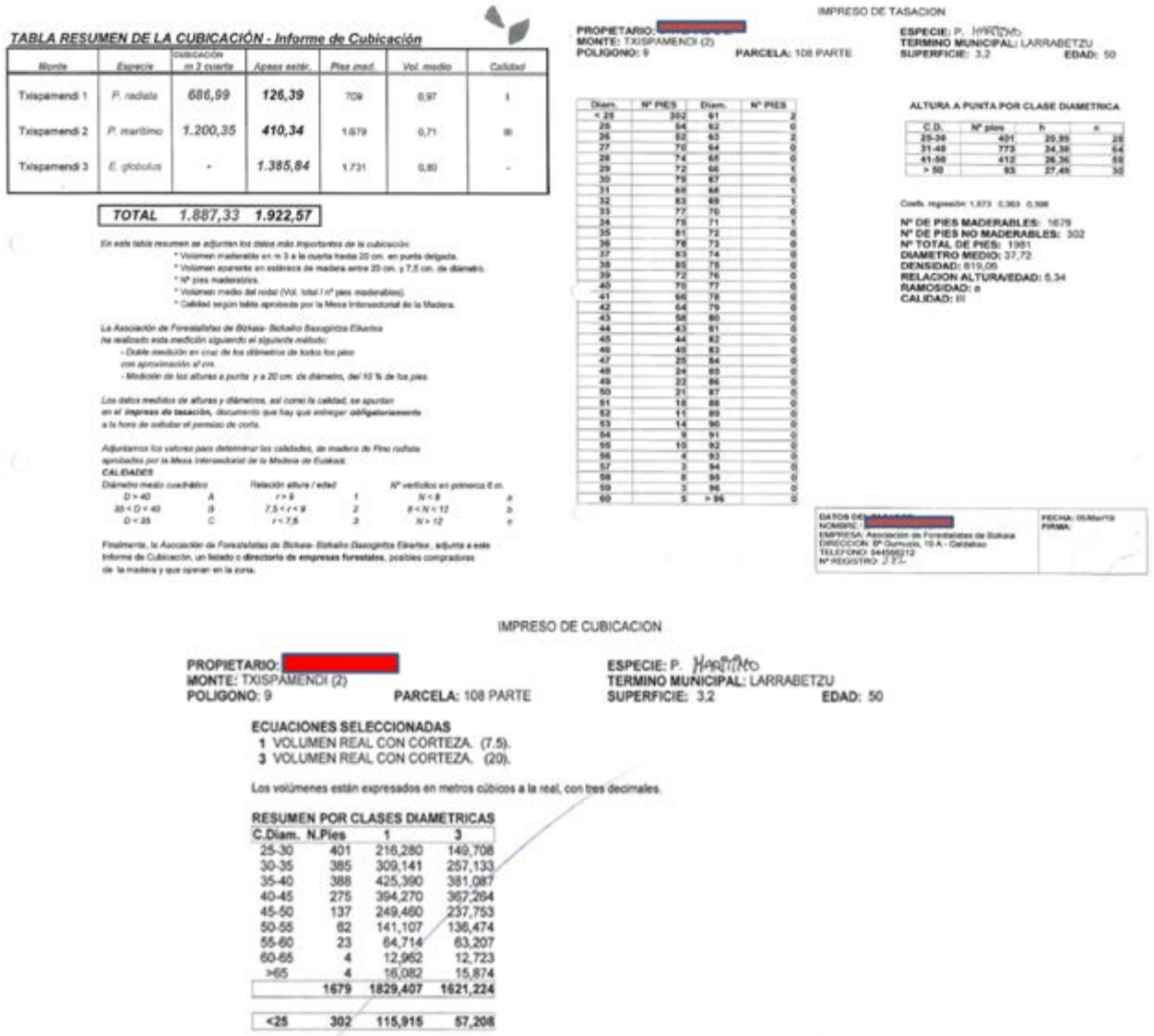


TABLA RESUMEN DE LA CUBICACIÓN - Informe de Cubicación

Monte	Especie	CUBICACIÓN m 3 cuerte	Apeas estér.	Pies mad.	Vol. medio	Calidad
Txispamendi 1	P. radiata	686,99	126,39	709	0,97	I
Txispamendi 2	P. marítimo	1.200,35	410,34	1.679	0,71	III
Txispamendi 3	E. globulus	-	1.385,84	1.731	0,80	-
TOTAL		1.887,33	1.922,57			

IMPRESO DE TASACION

PROPIETARIO: [redacted]
MONTE: TXISPAMENDI (2)
POLIGONO: 9 PARCELA: 108 PARTE
ESPECIE: P. MARITIMO
TERMINO MUNICIPAL: LARRABETZU
SUPERFICIE: 3,2 EDAD: 50

Diam.	Nº PIES	Diam.	Nº PIES
< 25	302	61	2
25	54	62	0
26	52	63	2
27	70	64	0
28	74	65	0
29	72	66	1
30	79	67	0
31	69	68	1
32	83	69	1
33	77	70	0
34	75	71	1
35	81	72	0
36	78	73	0
37	83	74	0
38	95	75	0
39	72	76	0
40	70	77	0
41	66	78	0
42	64	79	0
43	58	80	0
44	43	81	0
45	44	82	0
46	45	83	0
47	25	84	0
48	24	85	0
49	22	86	0
50	21	87	0
51	18	88	0
52	11	89	0
53	14	90	0
54	9	91	0
55	10	92	0
56	4	93	0
57	3	94	0
58	8	95	0
59	3	96	0
60	5	> 96	0

ALTURA A PUNTA POR CLASE DIAMETRICA

C.D.	Nº pies	h	a
25-30	401	20,99	28
31-40	773	24,38	64
41-50	412	26,36	69
> 50	93	27,49	32

Coefs. regresión: 1,873 0,363 0,308

Nº DE PIES MADERABLES: 1679
Nº DE PIES NO MADERABLES: 302
Nº TOTAL DE PIES: 1981
DIAMETRO MEDIO: 37,72
DENSIDAD: 619,06
RELACION ALTURA/EDAD: 5,34
RAMOSIDAD: a
CALIDAD: III

IMPRESO DE CUBICACION

PROPIETARIO: [redacted]
MONTE: TXISPAMENDI (2)
POLIGONO: 9 PARCELA: 108 PARTE
ESPECIE: P. MARITIMO
TERMINO MUNICIPAL: LARRABETZU
SUPERFICIE: 3,2 EDAD: 50

ECUACIONES SELECCIONADAS
1 VOLUMEN REAL CON CORTEZA. (7.5).
3 VOLUMEN REAL CON CORTEZA. (20).

Los volúmenes están expresados en metros cúbicos a la real, con tres decimales.

RESUMEN POR CLASES DIAMETRICAS

C.Diam.	N.Pies	1	3
25-30	401	216,280	149,708
30-35	385	309,141	257,133
35-40	388	425,390	381,087
40-45	275	394,270	367,264
45-50	137	249,460	237,753
50-55	62	141,107	136,474
55-60	23	64,714	63,207
60-65	4	12,962	12,723
>65	4	16,082	15,874
	1679	1829,407	1621,224
<25	302	115,915	57,208

Impreso de tasación y de cubicación generados empleando el programa Cubica.

La forma de cubicar en pie en el País Vasco se basa en medir todos los diámetros normales de los árboles a cortar, en medir en al menos un 10% de los pinos su altura total y en asignar una correcta tabla de diámetros/alturas con el fin de aplicar las fórmulas existentes y actualizadas dispuestas en el programa de tasación y cubicación para uso de tasadores autorizados, programa disponible en sus dos versiones: el tradicional Cubica creado en 1994 o la nueva versión CubicaWeb (https://cubica.hazi.eus/).

La comparación entre la cubicación realizada en 2019 con los resultados de la nueva ecuación biparamétrica b1 y los propuestos por la ecuación de Denzin (con los coeficientes 0,3 y 32) muestra muy buenos resultados. A estos 1.679 pinos habría que añadir 302 pinos "no maderables", con diámetro normal menor de 25 cm y que cubican 115,9 m^3:

Diam. (cm)	Nº de pinos	Altura (m)	VTcc (m^3)	VTcc b1	VTcc Denzin
27	401	20,99	216,280	189,336	195,773
35	773	24,38	734,531	719,278	730,458
45	412	26,36	643,730	697,628	693,136
53	93	27,49	234,865	230,752	225,892
Total	**1.679**	**-**	**1.829,407**	**1.836,994**	**1.845,259**

En cuanto al volumen maderable VTcc hasta 20 cm de esos mismos pinos, se ha calculado mediante dos métodos: la antigua ecuación del pino radiata propuesta en el programa Cubica, la ecuación de razón de volumen publicada para el pino marítimo en CubicaWeb y la nueva ecuación de razón de volumen aplicada a los pinos muestreados en Larrabetzu.

Diam. (cm)	Nº de pinos	VTcc Cubica (m^3)	Razón volumen CubicaWeb (m^3)	Nueva razón volumen (m^3)
27	401	149,708	125,931	128,868
35	773	638,220	612,498	584,495
45	412	605,017	650,522	619,624
53	93	228,278	221,423	212,318
Total	**1.679**	**1.621,224**	**1.610,375**	**1.545,304**

Según el coeficiente de transformación aplicado por el tasador, el volumen a la cuarta de estos pinos marítimos ascendería a 1.200,35 m^3, un 65,6% del volumen total a la real VTcc. Según las alturas maderables medias de cada clase diamétrica se obtendría un valor similar de volumen total a la cuarta:

Diam. (cm)	Nº de pinos	Altura maderable hasta 20 cm (m)	Volumen a la cuarta (m^3)
27	401	10,4	141,911
35	773	13,5	487,881
45	412	17,5	469,075
53	93	20,6	157,757
Total	**1.679**	**-**	**1.256,620**

Según el valor medio calculado geométricamente[8], 1 m^3 cúbico a la real y con corteza equivaldría a 0,785 m^3 a la cuarta o al cuarto sin deducción.

Pinar de Txispamendi, con el detalle de un pino señalado o chaspeado.

8 Revista Euskadi Forestal/Euskadi Basogintza, nº14. 1er trimestre de 1988.

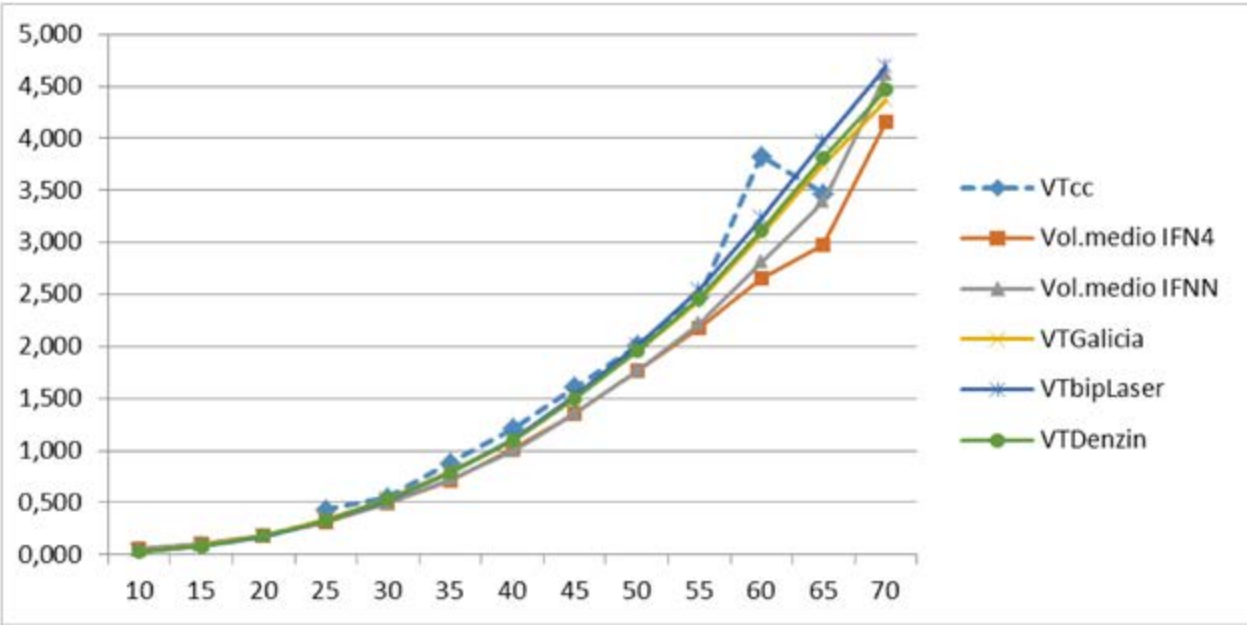
11.- Conclusiones

En las páginas anteriores se han ido comparando diversas formas de cubicar pinos marítimos, dependiendo de la época histórica, de la región y del destino de la madera. No cabe duda de que una correcta tasación o cubicación debería ser un compromiso entre esfuerzo y resultado obtenido. De esfuerzo, porque de nada sirve medir y medir parámetros en campo de difícil cuantificación, bajo errores sistemáticos de medición, en terrenos abruptos y expuestos a condiciones ambientales cambiantes. Y de resultado, porque en muchas ocasiones, el empleo y la medición de unos pocos parámetros sirve para obtener una cubicación correcta, teniendo en cuenta que no existe la cubicación perfecta.

Así, se expone una comparativa final de resultados obtenidos en la cubicación media de la muestra de disponible en el proyecto SiGCa-PIMA. Se comparan estos resultados:

- VTcc: volumen medio (m^3/pino) de los pinos de SiGCa cubicados troza a troza
- Vol.medio IFN4: volumen medio (m^3/pino) de los pinos de IFN4
- Vol.medio IFNN: volumen medio (m^3/pino) de los pinos de IFNN
- VTGalicia: volumen medio (m^3/pino) de un pino empleando la ecuación de Galicia y las alturas medias IFN4 de cada CD
- VTb1Laser: volumen medio (m^3/pino) empleando la ecuación biparamétrica V=f(d,h) desarrollada en este trabajo (b1) y las alturas medias IFN4 de cada CD
- VTDenzin: volumen medio (m^3/pino) empleando la ecuación desarrollada por Denzin, con los valores NH de 32 m y variación media del +3%, así como las alturas medias IFN4 para cada CD

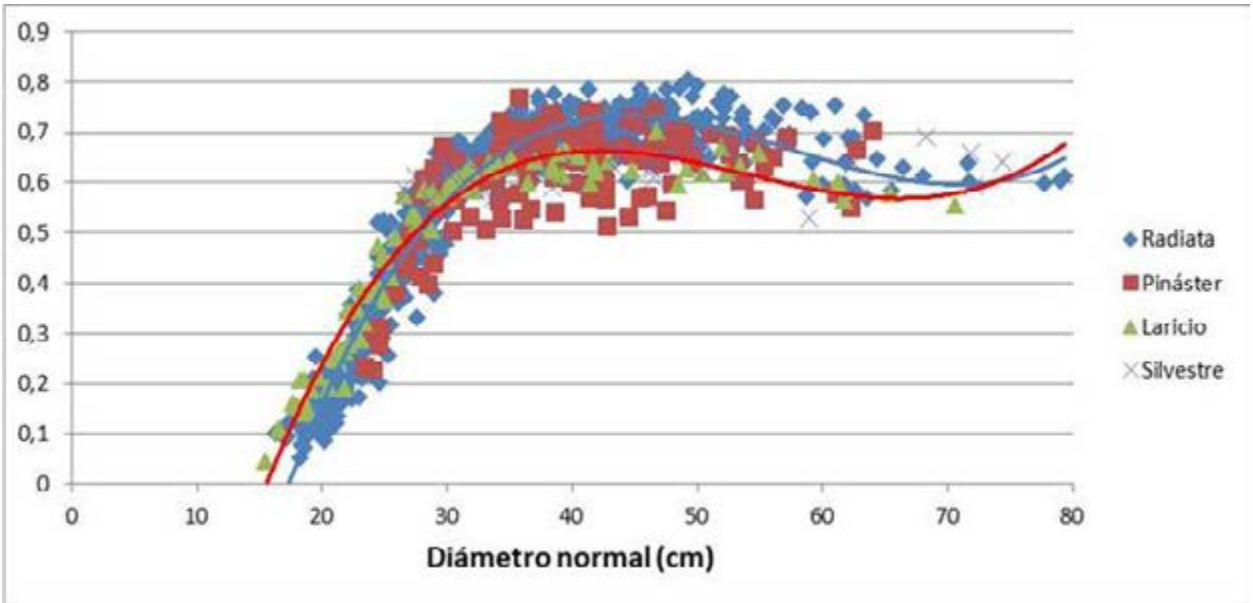
CD (cm)	VTcc	Vol.medio IFN4	Vol.medio IFNN	VTGalicia	VTb1Laser	VTDenzin
10	-	0,060	0,058	0,031	0,027	0,030
15	-	0,108	0,106	0,089	0,081	0,086
20	-	0,189	0,191	0,191	0,177	0,185
25	0,435	0,311	0,321	0,341	0,324	0,332
30	0,546	0,488	0,492	0,539	0,522	0,529
35	0,882	0,716	0,722	0,799	0,787	0,788
40	1,209	1,019	0,995	1,104	1,107	1,097
45	1,608	1,352	1,360	1,504	1,524	1,500
50	2,008	1,764	1,765	1,954	2,005	1,959
55	2,472	2,184	2,212	2,438	2,538	2,461
60	3,827	2,658	2,814	3,080	3,228	3,117
65	3,471	2,972	3,388	3,748	3,968	3,811
70	-	4,155	4,611	4,367	4,692	4,474
Total CD25-65	**16,458**	**13,464**	**14,069**	**15,507**	**16,003**	**15,595**



Sumando la totalidad de los 9.215 pinos remedidos entre IFN4 e IFNN, se obtendría un total de 8.130 m^3 según la fórmula IFNN, 8.544 m^3 según la ecuación biparamétrica V=f(d,h) desarrollada en este trabajo (b1) y 8.454 m^3 según la ecuación desarrollada por Denzin.

Como ya se comentó en el capítulo 4, estos resultados muestran que las ecuaciones basadas en la forma de los árboles, como las de Denzin o la altura de Pressler, pueden ser muy útiles para ir ajustando en el futuro las ecuaciones de cubicación a emplear en sucesivos IFN u ordenaciones forestales. Así se evitaría el empleo de una única ecuación para cubicar árboles cuya altura y forma cambia con el tiempo y con las actividades selvícolas. El ajuste progresivo de unas sencillas variables de forma puede suponer un cálculo más realista de los volúmenes de madera disponibles a lo largo del tiempo, minimizando el coste de obtención de muestras representativas de árboles tipo para cada inventario forestal.

Ello no obsta para que, como se ha ido comprobando en el presente proyecto SiGCa-PIMA, con un presupuesto y dedicación adecuados se puedan conseguir unas fórmulas de cubicación más detalladas y que permitan estimar clasificación de productos maderables para el pino marítimo del Norte.



Variación del cociente "Volumen a la cuarta/Volumen real" en los árboles tipo del País Vasco, comprobando la diferencia entre el pino radiata (azul) y las otros tres especies de pino (rojo).

6.- RESULTADOS DEL PROYECTO SIGCA-PIMA: VELOCIDAD SÓNICA

Esther Merlo Sánchez, Carlos Feijoo Álvarez y Miguel Piñeiro García
Madera Plus

Alejandro Cantero Amiano
HAZI Fundazioa

1.- Introducción

En este capítulo se describen los trabajos realizados por Madera Plus y por HAZI en el marco del presente proyecto SiGCa-PIMA sobre mediciones de la velocidad sónica. Se han centrado en el empleo de la citada velocidad sónica y del módulo dinámico como indicadores de la rigidez de la fibra de la madera de las masas de pino marítimo muestreadas en el Norte de España, probando diversas herramientas para la medición de esa velocidad.

La experiencia de Madera Plus en cuanto a la medición de la velocidad sónica y de la calidad de la madera en el pino marítimo en Galicia está avalada por muchos años de trabajo y por numerosas publicaciones científicas.

En cuanto a HAZI, la principal experiencia en el empleo de estas herramientas se centra en parcelas permanentes sometidas a distintos regímenes selvícolas, instaladas desde 1990, de pino radiata, pino laricio de Córcega y abeto Douglas por el País Vasco. Proyectos europeos como Espacio Atlántico REINFFORCE 2007-2013 y LIFE HEALTHY FOREST 2016-2019 han permitido remedir estas parcelas con el fin de establecer una red de sitios de demostración en los que testar diversas técnicas selvícolas adaptadas al cambio climático y analizar la evolución de enfermedades fúngicas y de la calidad de la madera.

La velocidad de una onda de impacto a través de un medio está directamente relacionada con las propiedades elásticas del medio por el que se desplaza. Así si evaluamos la velocidad de desplazamiento de una onda por el interior de la fibra de la madera a lo largo del fuste obtendremos un estimador del módulo de elasticidad de la madera de ese árbol. La madera está formada por una sucesión de células que se van generando a lo largo del periodo vegetativo. Diferentes parámetros internos y externos van a determinar el número de células de madera temprana o tardía y las características de dichas células en cuanto a longitud, espesor de pared celular, etc, lo que le confiere a dicha madera unas propiedades tecnológicas u otras (Merlo et al., 2014; Watt y Trincado,2017).

Las propiedades tecnológicas internas de la madera dependen de diversos parámetros genéticos, selvícolas y de calidad de estación determinantes en el proceso de formación de las células de madera (*eg.* Zobel y Jett, 1995; Fonti et al., 2010). Todos estos factores van a determinar la densidad básica y el módulo de elasticidad de la madera que se produce en una masa forestal (Lasserre et al., 2005; Waghorn et al., 2007; Zoric, 2009). Estas propiedades internas de la madera no pueden ser evaluadas visualmente por eso la metodología sónica es una herramienta muy potente para predecir la rigidez de la fibra de forma no destructiva sobre un amplio número de árboles y parcelas.

La densidad básica puede estimarse a partir de una barrena o *core* extraído del árbol y posteriormente analizado en laboratorio y el módulo de elasticidad se predice a partir del cálculo del módulo de elasticidad dinámico obtenido en base a la velocidad de desplazamiento de una onda a lo largo de la madera de un árbol, junto con la densidad de la madera, a partir de la expresión:

$$\mathbf{MOEdyn = V^2 * densidad}$$

El conocer dicha velocidad a lo largo de diferentes parcelas y árboles individuales nos ha permitido estudiar la variabilidad y analizar la influencia de diferentes variables de sitio, de árbol y de masa en la calidad tecnológica de la madera. De cara a analizar la variación de estas propiedades en la especie *Pinus pinaste. S*e muestran en el este capítulo las principales relaciones obtenidas.

2.- Resultados en el País Vasco

En este capítulo se describen los trabajos finales realizados por Madera Plus y por HAZI en el marco del presente proyecto SiGCa-PIMA en las parcelas de Larrabetzu (23, 24 y 25) y Galdakao (99).

Calidad de la madera observada: velocidad de transmisión

La velocidad de transmisión del sonido, directamente relacionada con la rigidez de la fibra, se evalúa con la inserción de dos transductores clavados a diferentes alturas en el árbol en el sentido longitudinal de la fibra. Dicha velocidad de transmisión, junto con la densidad, determinan el módulo de elasticidad (MOE) y la calidad estructural de la madera. Por ello, se han desarrollado diversos Métodos No Destructivos (MND) dedicados a medir la citada velocidad de transmisión de una onda sónica a través de la madera.

Con el fin de poder medir la velocidad en pinos en pie, se dispone de dos herramientas: Hitman ST300 (Fibre-gen, N.Z.) y un Microsecond Timer (Fakopp, Hungría), equipos empleados para medir ese parámetro en árboles en pie, sin necesidad de cortarlos. También se dispone de la herramienta Hitman HM200 (Fibre-gen, N.Z.), equipo de resonancia que mide la velocidad en el tronco de pinos derribados, en trozas o en tablas.

Estudios previos nos han permitido relacionar las velocidades tanto entre los diferentes equipos de medición sobre árbol en pie Con ST300 y Microsecond Timer en diferentes especies, así como entre la medición en pie y en troza según se observa en las figuras 1 y 2.

Resultados con el Hitman ST300

Se han elegido para ello 10 pinos por cada una de las parcelas SiGCa-PIMA, lo que da un total de 350 pinos. Los árboles han sido medidos en los meses de julio de 2019 y 2020, en periodo vegetativo. Seguidamente se citan los valores de velocidad registradas en los 40 pinos de las 4 parcelas de Bizkaia.

Figura 1: Calibrado previo y medición con el Hitman ST300 en la parcela 25 de Larrabetzu.

En cada árbol se han llevado a cabo dos mediciones: en la primera, aguas arriba de cada árbol, se han colocado los sensores a unos 100 cm entre sí, tratando de que el diámetro medio quedara a mitad de distancia; la segunda medida se ha repetido pero girando un ángulo recto hacia la derecha. Se ha empleado el valor medio de ambas medidas de velocidad para caracterizar la troza basal de cada árbol.

Los resultados obtenidos muestran que en estas parcelas se repiten las tendencias registradas en general con este tipo de herramientas: mayores velocidades medias conforme disminuye el diámetro y aumenta la relación altura-diámetro.

En general, una mayor densidad de plantación y una intervención selvícola más tardía suele implicar mayor esbeltez y menor tamaño de copa, y esto está asociado a un menor cilindro de madera juvenil, a un menor porcentaje de madera de primavera y a una aceleración del inicio del proceso de duraminización, dando como resultado una mayor rigidez y densidad de la madera (Merlo et al, 2014).

Resultados con el Fakopp Microsecond Timer

Al ser equipos que sirven para la misma finalidad, se ha medido también los mismos pinos con un equipo Fakopp Microsecond, aplicando sus sensores en los mismos puntos que con el equipo Hitman ST300 (distancia 1 m en vertical) y siguiendo la misma sistemática para medir la velocidad media en la troza basal en sentido longitudinal. En este caso, sólo se ha aplicado el Fakopp Microsecond en los 40 árboles de las parcelas 23, 24, 25 y 99 de Larrabetzu y Galdakao (Bizkaia).

Figura 2: Medición con el Microsecond Fakopp en las parcelas de Larrabetzu.

Se comprueba que en estas parcelas se repiten las tendencias registradas con el Hitman ST300: mayores velocidades medias conforme disminuye el diámetro y aumenta la relación altura-diámetro. Sin embargo, se detectan unos mayores valores medios y una mayor variación en los valores de velocidad sónica recogidos con el Fakopp (comprendidos entre 4 y 4,5 km/s), mientras que con el Hitman ST300 se situaban entre 3,5 y 4 km/s.

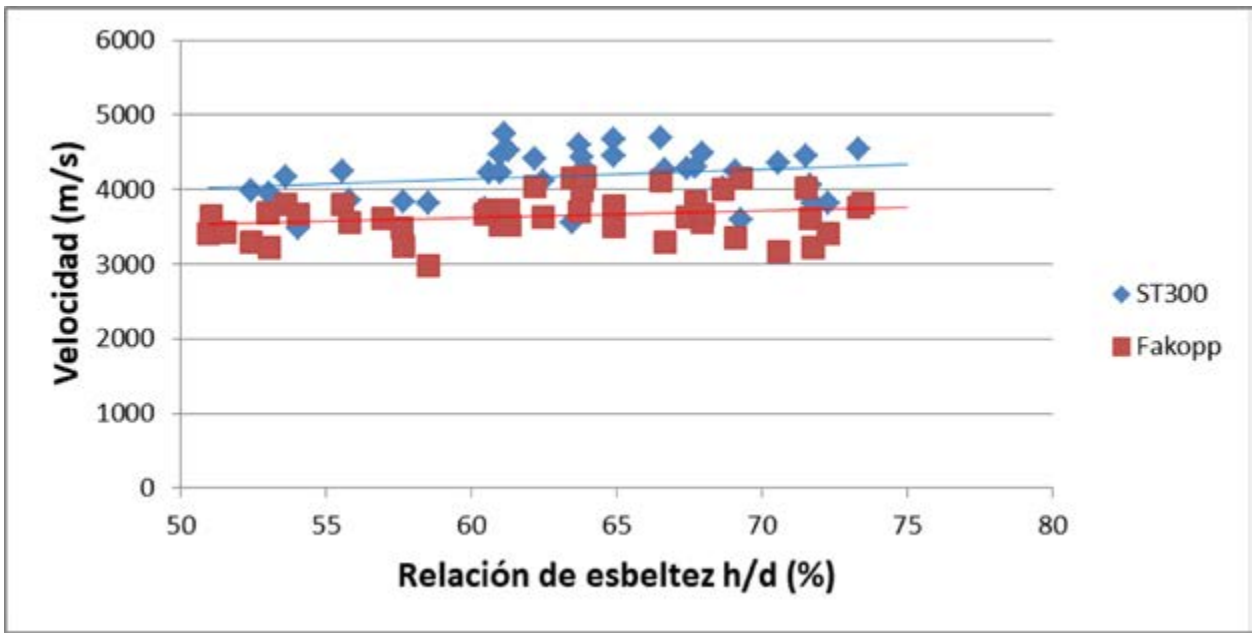


Figura 3: relación entre velocidad sónica en el interior del fuste y la esbeltez del árbol con los dos equipos de medición.

El equipo ST300 carece de cables y tiene un sensor láser para medir distancia entre transductores (independientemente de la profundidad de clavado) y controla la inserción de los transductores a 45º lo que da más precisión y homogeneidad en la toma de datos. Una de las principales ventajas del Fakopp es su mayor sencillez y rapidez en la toma de datos, lo que repercute, unido a su menor precio, en ahorro de costes, aunque previsiblemente pierde precisión.

Resultados con el Hitman HM200

La corta y troceo de los pinos de muchas de estas parcelas ha permitido la toma de datos en los 10 árboles derribados de la parcela 99 de Galdakao. En estos árboles, inmediatamente después de su corta, se ha medido la velocidad de transmisión de la onda sónica mediante el Hitman HM200 desde la base de cada una de las 30 trozas transportadas a EXFOPINO, indicando en el equipo como distancia recorrida la de 4,10 m, siendo los árboles desramados y despuntados hasta 20 cm en punta delgada.

Figura 4. Trozas de 4 m apiladas y ordenadas para su medición.

Figura 5. Medición de diámetros con y sin corteza y de la velocidad sónica con el Hitman HM200 en la parcela 99 de Galdakao

Aparentemente, las relaciones conseguidas en las trozas basales de la parcela 99 no son tan evidentes como en otras herramientas empleadas para medir la citada velocidad de transmisión sónica. Las velocidades sí aparentan ser de media menores conforme disminuye la relación h/d, pero con baja correlación, al igual que la comparación entre los resultados del Fakopp en la troza basal y el Hitman HM200 en la base del fuste.

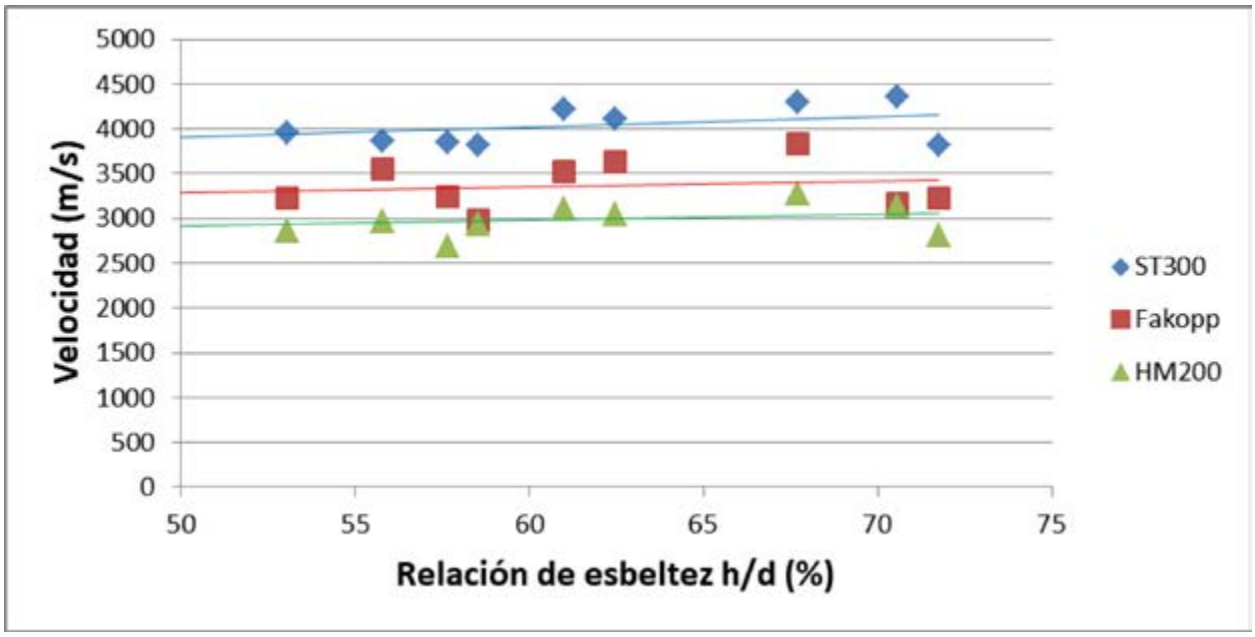


Figura 6. Relación entre esbeltez y velocidad sónica obtenida con los diferentes equipos

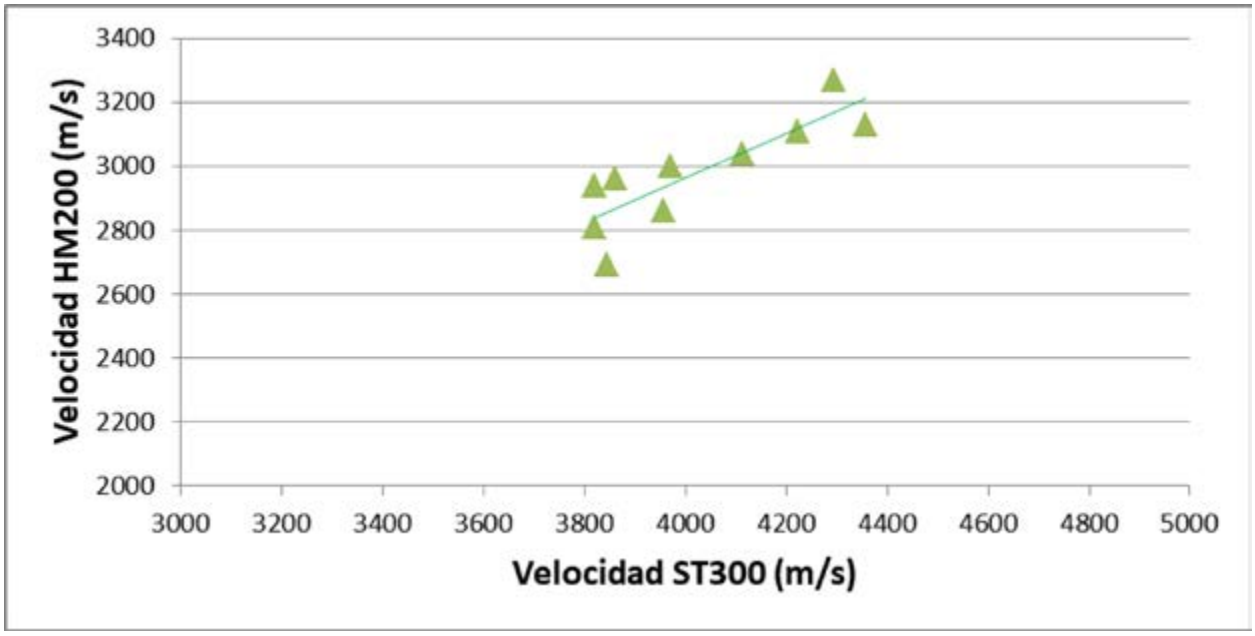


Figura 7. Relación entre velocidad en troza con HM200 y velocidad sónica obtenida con ST300 sobre el árbol en pie.

A lo largo de cada fuste de esta parcela 99, la máxima velocidad de transmisión del sonido con el HM200 se registra en la medición de las segundas trozas, entre 4 y 8 m, correspondiendo al máximo momento de flexión de los fustes.

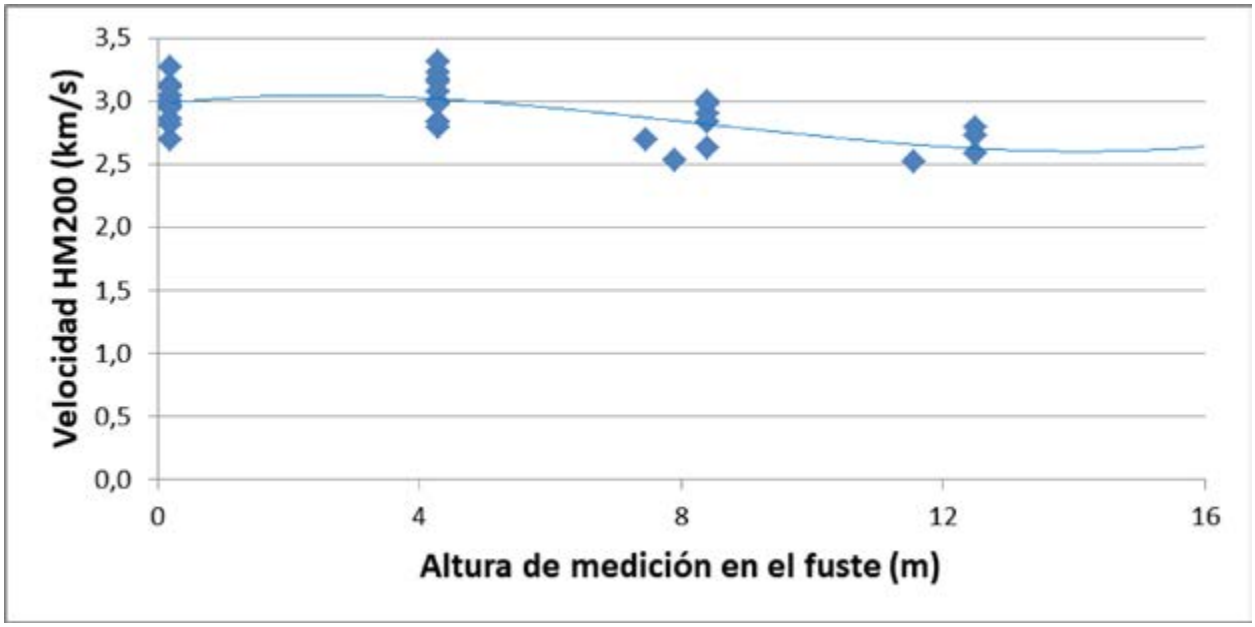


Figura 8. Distribución de valores obtenidos en troza con HM200 a diferentes alturas en el árbol.

Conclusiones

La velocidad de transmisión del sonido está relacionada con diversas variables de crecimiento y forma de los árboles. Estas variables que pueden verse afectadas por la calidad de estación y otras variables de gestión selvícola tales como la densidad de plantación, podas y claras. Los resultados son coherentes con los obtenidos en el global de las parcelas del proyecto y en otras masas de pináster previamente evaluadas.

2.- Resultados generales del proyecto SiGCa-PIMA

En este capítulo se describen los resultados conseguidos realizados por Madera Plus en referencia a la variabilidad en propiedades tecnológicas de calidad de madera y a la influencia de factores de crecimiento y modelos de predicción.

En el marco del proyecto SIGCA-PIMA se han muestreado 33 parcelas distribuidas a lo largo de Galicia y la Cornisa Cantábrica localizadas sobre 11 masas contínuas de *Pinus pinaster*.

Figura 9: Localización de las zonas de muestreo donde se han seleccionado las 33 parcelas

En cada una de las 11 masas contínuas se han seleccionado 3 parcelas con el objetivo de abarcar la variabilidad existente en cada zona. Son parcelas circulares de 14,1 m de radio y georreferenciadas sobre las que se realiza una medición dendrométrica de todos los árboles de la parcela.

Figura 10: zona de muestreo localizada en Lantemil (Ourense) con las tres parcelas de estudio

En cada parcela se seleccionan 16 árboles representativos, se obtiene la velocidad de una onda de impacto con el equipo ST300 y se extrae un *core* de la parte externa de la madera para calcular su densidad (Figuras 11 y 12).

Figura 11. Detalle de medición de onda sónica con ST300 sobre árbol en pie.

Figura 12. Detalle de extracción de core para evaluación de densidad sobre árbol en pie.

Se seleccionan 10 árboles representativos para cortar y llevar al aserradero. Se calculan parámetros dasométricos, fisiográficos, de suelo y climáticos para incorporar en el estudio.

En la tabla 1 se muestran los valores medios, máximos y mínimos de las principales variables forestales y propiedades tecnológicas obtenidas en las parcelas SiGCa-PIMA:

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

Variable	Media	SD	Mínimo	Máximo
Variables de masa (n=33) Inventario forestal				
Edad	41,9	11,9	25	74
N (pies/ha)	462,9	234,4	176,1	1280,9
G (m2/ha)	40,4	11	18,3	62
Dg (cm)	35,1	6,5	20,4	50,4
Do (cm)	45,3	5,9	32,2	59
Hc (m)	17,1	3,7	10,6	25,3
Hm (m)	21,8	4,4	13,7	31,3
Ho (m)	24,3	4,5	16	35,7
Razón de Copa (RC)	22	3,5	15,3	33,4
Índice de Hart	21,5	7	12,6	43,4
Propiedades tecnológicas				
Altitud del terreno (m)	229.1	176.2	24.9	566.6
Pendiente del terreno (%)	22.5	9.9	2.4	45.8
Propiedades tecnológicas				
ST300 (m/s)	4209,8	263,1	3764,4	4877,7
DB (Kg/m^3)	516,4	27,7	452,5	574,3
MOEdyn (MPa)	9221,8	1509,9	6564,1	12725,6
Árbol individual (n=455) Inventario forestal				
d (cm)	38,1	9,7	14,2	79,3
hc (m)	18	3,8	8	31
h (m)	23,1	4,6	12	37
Esbeltez (h/d)	63,2	15,6	19,7	134,8
Razón de copa (rc)	21,8	6,3	8,4	54,4
BAL (m^2/ha)	16,1	10,8	0	44,9
Propiedades tecnológicas				
ST300 (m/s)	4199,8	417,8	3126,7	5246,7
DB (Kg/m^3)	514,6	53,3	337,9	725,9
MOEdyn (MPa)	9216,6	2300,6	4665,3	16649,7

Donde: *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; ST300, velocidad medida con el equipo de ultrasonido "ST300"; *DB*, densidad básica; *MOEdyn*, Módulo dinámico.

Diferencias significativas entre parcelas de propiedades tecnológicas de la madera y otras variables influyentes en la calidad

El análisis de los datos obtenidos muestra diferencias significativas entre las zonas muestreadas en múltiples variables de interés.

En cuanto a las propiedades tecnológicas, se observan diferencias significativas en velocidad de desplazamiento de onda, densidad básica y módulo de elasticidad dinámico para las diferentes zonas de estudio.

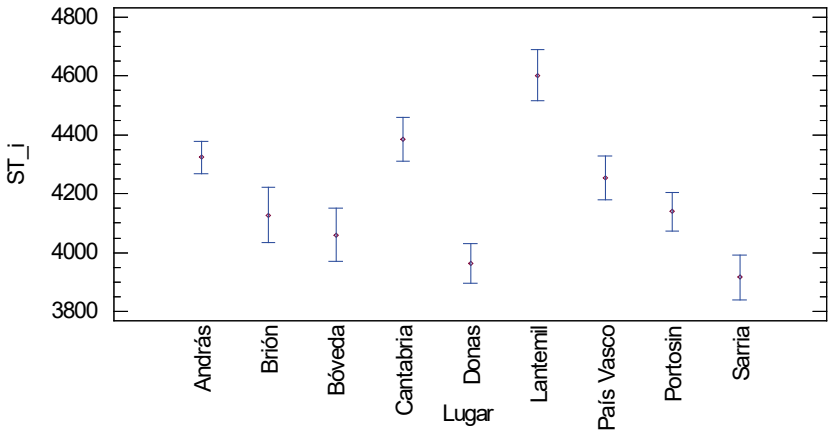


Figura 13: Velocidad media de desplazamiento de onda sónica obtenida sobre árbol en pie en las diferentes zonas de muestreo

Destacan los valores de una zona cercana al río Miño en el interior de Ourense (Lantemil), zona costera de Pontevedra (András) y zona de Cantabria, coincidiendo en estas parcelas una mayor densidad básica. El País Vasco presenta velocidades medias/altas, pero una baja densidad de madera, lo que hace disminuir su módulo dinámico.

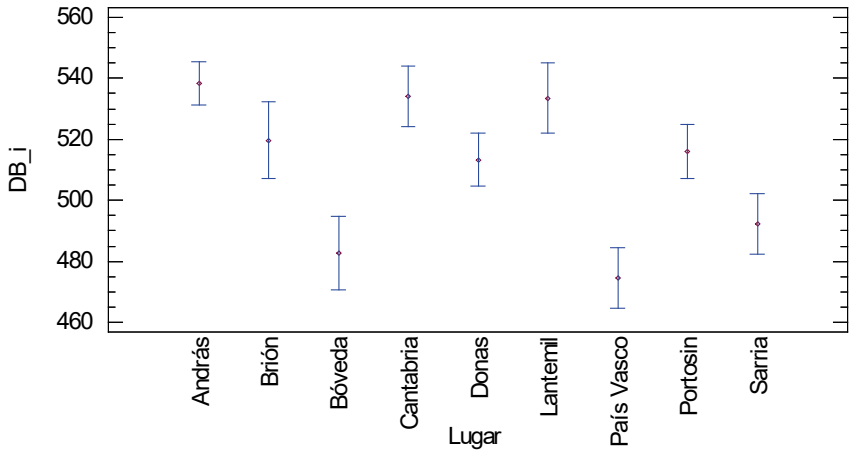


Figura 14: Densidad básica de madera obtenida sobre árbol en pie en las diferentes zonas de muestreo

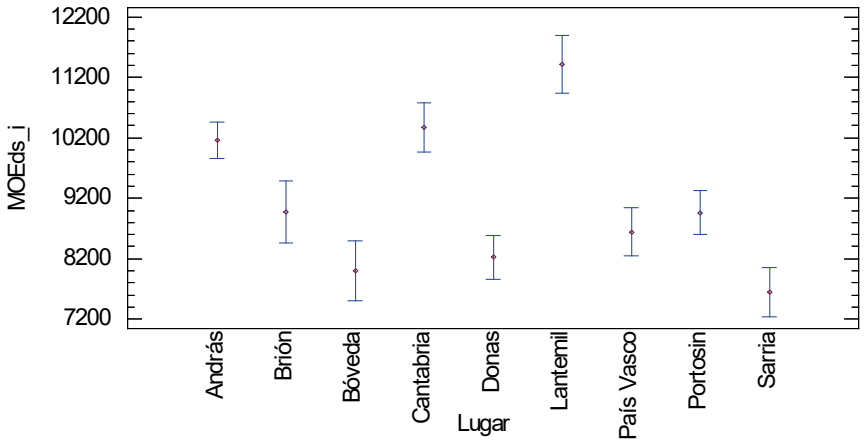


Figura 15: Módulo de elasticidad dinámico sobre árbol en pie en las diferentes zonas de muestreo

Variables de crecimiento y forma

Según se verá más adelante, las variables de crecimiento y forma afectan significativamente a la velocidad de desplazamiento de onda sónica en el fuste, por lo que nos parece interesante mostrar las diferencias significativas encontradas en algunas de éstas variables en las distintas parcelas.

Se observa que el País Vasco es una de las zonas con mayor altura de árboles y mayor esbeltez, junto con tres zonas de Galicia: Lantemil, Bóveda y András. En todas ellas se observan menores valores de razón de copa y valores medios altos de velocidad sónica.

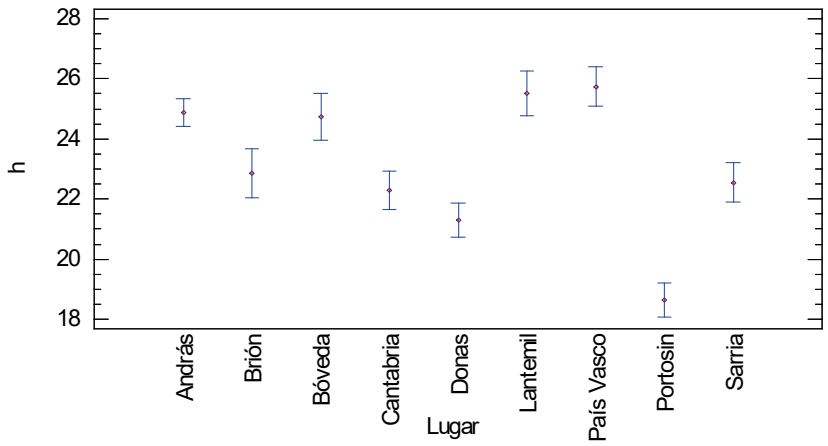


Figura 16: Altura media de los árboles en m en las diferentes zonas de muestreo

Se observan diferencias significativas en la edad de los árboles en las zonas de muestreo.

Las parcelas más adultas coinciden con aquellas con mayor velocidad.

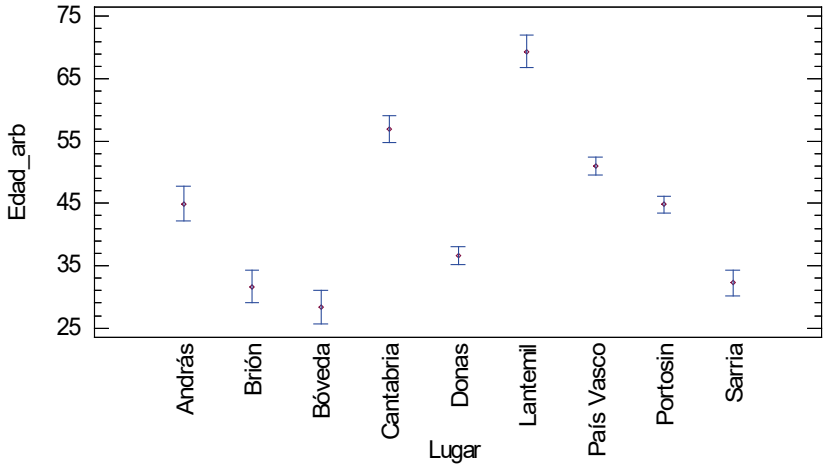


Figura 17: Edad media de los árboles en las diferentes zonas de muestreo

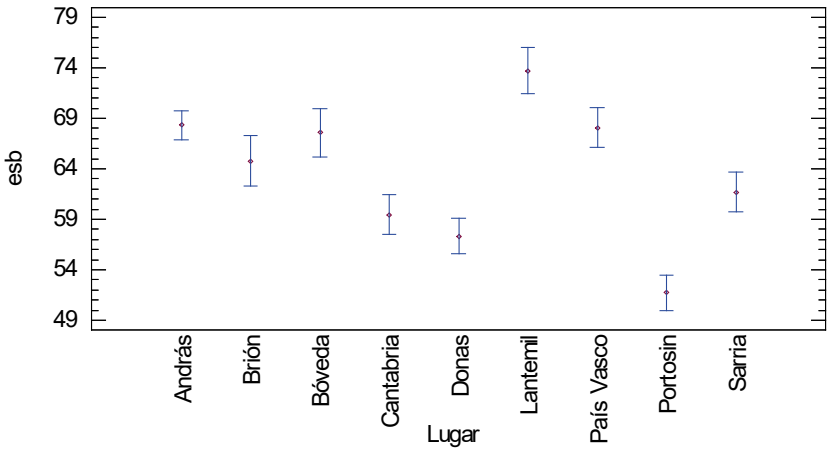


Figura 18: Esbeltez de los árboles observados en las diferentes zonas de muestreo

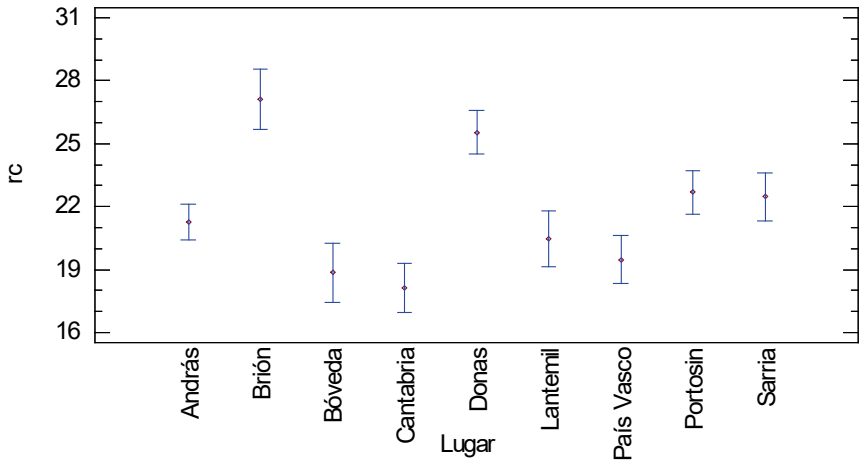


Figura 19: Razón de copa existente en el árbol en pie en las diferentes zonas de muestreo

En dos de estas tres zonas de Galicia, junto con Cantabria y País Vasco, se observan los mayores índices de competencia (BAL).

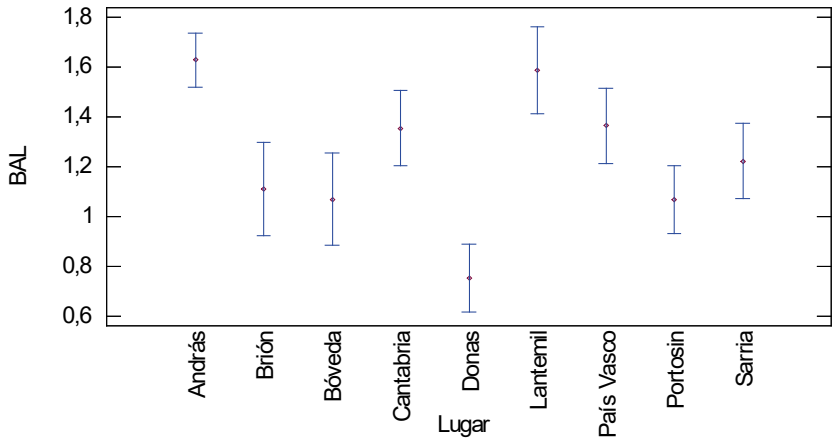


Figura 20: Indice de competencia (BAL) en las diferentes zonas de muestreo

En cuanto a los parámetros de forma, destacan por rectitud las parcelas de País Vasco, diferenciándose ampliamente del resto, seguidas de Cantabria, y con muy baja rectitud en las parcelas de Galicia.

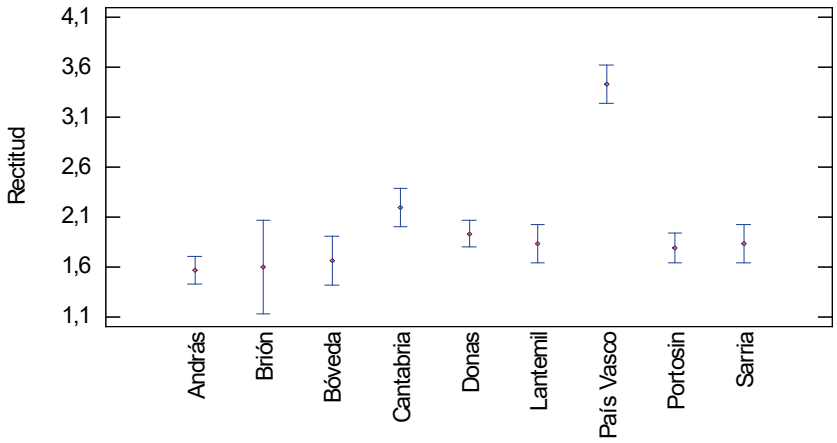


Figura 21: Rectitud de los árboles en las diferentes zonas de muestreo

El diámetro de rama de las parcelas del País Vasco es también significativamente menor que el resto de parcelas, aunque cuenta con un mayor número de verticilos en los primeros seis metros.

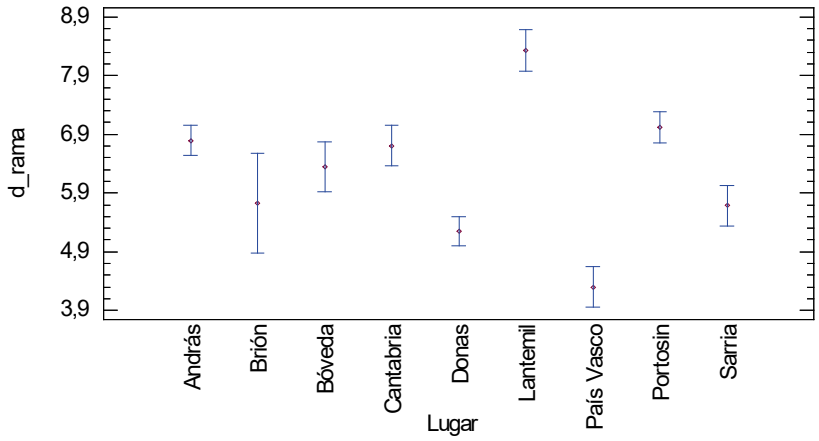


Figura 22: Diámetro medio de rama en las diferentes zonas de muestreo

3.- Correlación entre variables de árbol y masa y el módulo de elasticidad dinámico

En base a los datos previos para esta especie y los datos nuevos recopilados en el proyecto SIGCA se analizan las correlaciones entre diferentes variables fisiográficas y de masa en las propiedades tecnológicas de la madera.

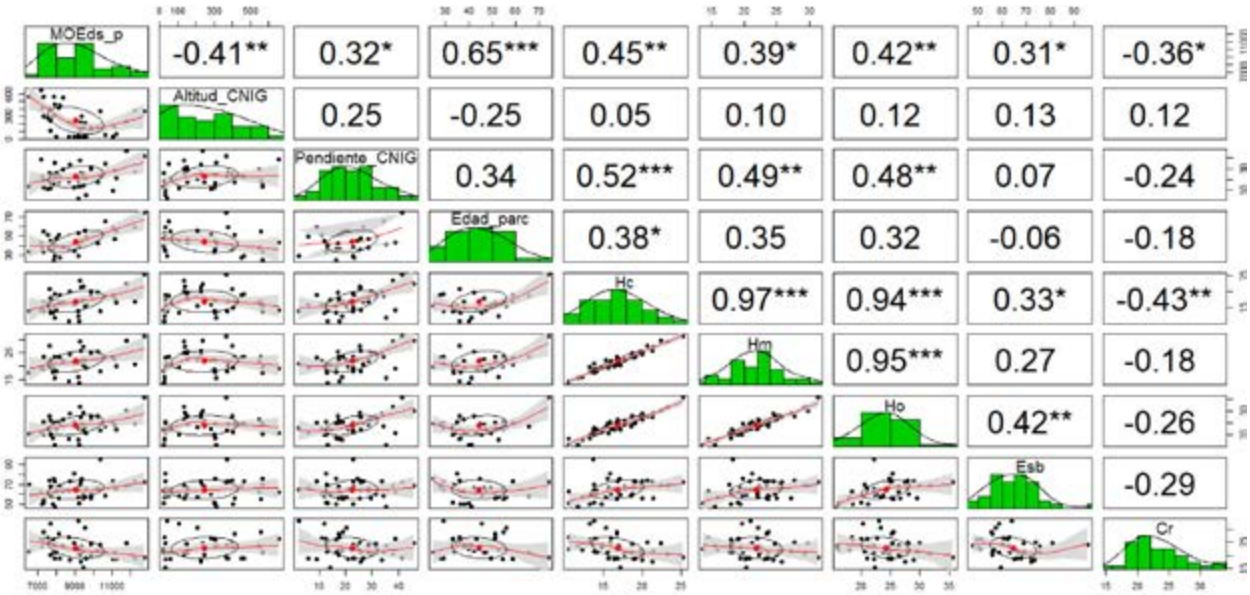
Se comparan las correlaciones obtenidas a nivel parcela y a nivel árbol individual utilizando todos los datos recogidos para la especie *Pinus pinaster* tanto dentro como fuera del proyecto.

Correlaciones a nivel parcela

A nivel parcela, el análisis de los coeficientes correlación de Pearson mostró relaciones estadísticamente significativas (p-valor < 0.05) en diversas variables de masa siendo la más influyente la edad de la parcela (r=0.65), altura de copa (r=0.45), altura media (r=0.39), altura dominante (r=0.42), esbeltez (r=0.31) y razón de copa (r=-0.36).

Las variables fisiográficas también fueron significativas al 95%, dando las siguientes correlaciones de Pearson: altitud del terreno (r=-0.41) y pendiente del terreno (r=0.32).

La edad es la variable más influyente seguida de la altura de copa y altura dominante y con una influencia negativa de la razón de copa. La esbeltez media en la parcela, representa también una influencia significativa moderada en el valor medio en la parcela.



Gráfica 1. Correlaciones de Pearson estadísticamente significativas de MOE dinámico con variables de masa para el total de datos disponibles.

Tabla 2. Variables correlacionadas significativamente con el Módulo dinámico medio por parcela.

Variable	Muestras	Coeficiente de correlación (r)	p-valor
Variables de masa			
Edad	29	0.65	<0.05
Hc (m)	41	0.45	<0.05
Hm (m)	41	0.39	<0.05
Ho (m)	41	0.42	<0.05
Esbeltez (h/d)	41	0.31	<0.05
Razón de Copa (RC)	41	-0.36	<0.05
Fisiografía			
Altitud del terreno (m)	41	-0.41	<0.05
Pendiente del terreno (%)	41	0.32	<0.05

Comparación de correlaciones entre datos previos y proyecto SIGCA a nivel parcela

La esbeltez y la razón de copa media por parcela se comportan igual en ambas bases de datos (el aumento de la esbeltez y la disminución de la razón de copa favorecen el incremento en módulo dinámico) si bien el nivel de significación es sólo del 90% en cada una por separado. Al unir todos los datos sí se alcanza dicho umbral de significación con una correlación de Pearson moderada (r=0.31 y r=-0.36 respectivamente).

Determinadas variables mantienen la tendencia y muestran relaciones estadísticamente significativas en ambos conjuntos de datos si bien algunas de ellas pasan a ser estadísticamente significativas al 95% de probabilidad con los datos SIGCA. Dichas variables son: edad de la parcela, altura de copa, altura media y altura dominante. En el caso de la altitud y la pendiente ocurre algo parecido, aunque en este caso es la base de datos de SIGCA la que da resultados significativos sólo para el 90% de probabilidad, con el mismo sentido de la relación (positivo en la pendiente y negativo en la altitud).

Otras, en cambio muestran comportamientos completamente dispares entre ambas bases de datos como es el caso del área basimétrica, el diámetro dominante o el índice de Hart.

Correlaciones a nivel árbol individual

Respecto a las variables de árbol individual, resultaron significativas: la edad del árbol (r=0.42), el diámetro normal (r=-0.14), la altura de copa (r=0.2), la altura total (r=0.13), la razón de copa (r=-0.18), la esbeltez (r=0.26), BAL (r=0.28) y BALMOD (r=0.24).

Tabla 3. Variables correlacionadas significativamente con el Módulo dinámico del árbol individual.

Variable	Muestras	Coeficiente de correlación (r)	p-valor
Árbol individual			
Edad del árbol	223	0.42	<0.05
d (cm)	519	-0.14	<0.05
hc (m)	519	0.20	<0.05
h (m)	518	0.13	<0.05
Razón de copa (rc)	518	-0.18	<0.05
Esbeltez (h/d)	518	0.26	<0.05
BAL	519	0.28	<0.05
BALMOD	519	0.24	<0.05

Comparación correlaciones entre datos previos y proyecto SIGCA a nivel árbol individual

En lo referente a las variables dendrométricas de árbol individual, las mejores correlaciones estadísticamente significativas son: edad del árbol (r=-0,42); indices de competencia (BAL 0.28 y BALMOD, 0.26); esbeltez (0,26) y

altura de copa (r=0,20). Se observan correlaciones significativas moderadas con character negativo con la razón de copa (-0,18) y con el diámetro del árbol (-0,14).

Determinadas variables sí mantienen la tendencia en ambas series de datos pero la significación de las correlaciones es diferente. Es el caso de la altura de copa, razón de copa y altura total del árbol, que presentan la misma tendencia pero con correlaciones estadísticamente significativas sólo para los árboles medidos en el proyecto SIGCA.

Conclusión:

La edad de la parcela es determinante para obtener mayor modulo dinámico, lo cual es lógico pues se relaciona con un mayor porcentaje de madera adulta dentro del árbol, menor anchura de anillo y mayor porcentaje de madera tardía respecto a madera temprana, al disminuir la tasa de crecimiento. La conformación del árbol en cuanto a esbeltez e indices de competencia o altura de copa favorecen esta propiedad tecnológica lo que indica la posibilidad de optimizar dicha propiedad mediante una selvicultura adecuada. La altura de copa, razón de copa y diámetro del árbol pueden dirigirse mediante actuaciones de podas en altura y claras por lo alto en favor de los árboles codominantes frente a los dominantes en la masa.

4. Modelos de predicción de Módulo dinámico por parcela

Análisis de datos y ajuste de modelos

Se han desarrollado modelos lineales, a nivel parcela para el conjunto de los datos, relacionando el MOE dinámico en pie con los valores del inventario forestal y las variables 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).

La calidad predictiva de estos nuevos modelos se evaluó mediante dos índices estadísticos: el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}), 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:

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

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

Donde: y_i, $\hat{y}_i$ e $\bar{y}$ 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.

A continuación de comprobó que los modelos propuestos cumpliesen los supuestos que debe cumplir la regresión lineal múltiple para este caso:

a) Ausencia de colinealidad múltiple entre las variables independientes, mediante el factor de inflación de la varianza (VIF), el cual se calcula del siguiente modo:

$$\mathrm{VIF} = \frac{1}{1 - \mathrm{R}_\mathrm{i}^2}$$

Donde: R^2_i, 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 inferiores a 10 (Der and Everitt, 2002).

b) Normalidad de los residuos, mediante test de Shapiro Wilk combinado con la representación gráfica en forma de "QQ-plots";

c) Homocedasticidad de los residuos, combinado el test de Breusch Pagan con la representación gráfica de los residuos observados y predichos.

Posteriormente, para analizar la robustez de los modelos propuestos (tanto de árbol como de parcela), se efectuaron validaciones cruzadas dejando uno fuera (*"leave one out"- LOO-*) de éstos, hallando nuevos valores del coeficiente del determinación y de la raíz del error medio cuadrático tras la validación (R^2_{CV} y $RMSE_{CV}$ respectivamente).

Ya por último, se muestran los gráficos de observados-predichos para los modelos que nos dan una idea visual de su capacidad predictiva.

Se determinaron dos modelos a partir de variables dasométricas y fisiográficas. Para ello, dado que no de todas las parcelas se conocía la edad y, siendo éste un parámetro de vital importancia, vistas las correlaciones, sólo se tomaron aquellas parcelas con edad conocida para su elaboración (n=29). Se empleó la metodología "Stepwise" propuesta anteriormente y se obtuvieron los siguientes modelos:

Modelo 1: MOEdyn= a - b × Elev + c × Pte + d × Edad + e × Ho - f × RC

Modelo 2: MOEdyn= a - b × Elev + c × Pte + × d × Ho - e × RC

Siendo: *MOEdyn*, módulo dinámico (MPa); *Elev*, altitud del terreno sobre el nivel del mar (m); *Pte*, pendiente del terreno (%); *Edad*, edad de la parcela; *Ho*, altura dominante de la parcela; *RC*, razón de copa media de la parcela (%).

A continuación, se muestran los estadísticos de bondad de ajuste del modelo así como los resultados de la validación cruzada.

Tabla 4. Comparación de modelos de masa

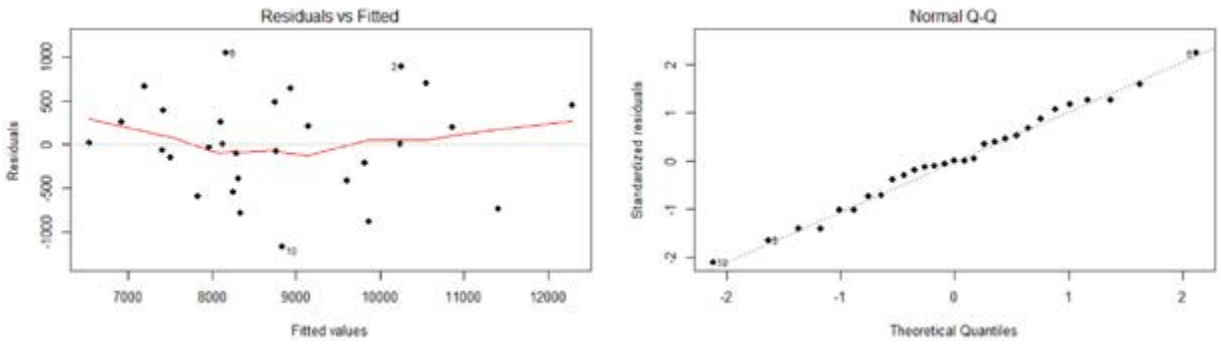
Modelo	R^2	R^2_{aj}	R^2_{CV}	RMSE	$RMSE_{CV}$	n
Modelo 1	0.86	0.83	0.77	607.3	797	29
Modelo 2	0.84	0.81	0.76	645.6	792	29

Donde: R^2, coeficiente de determinación; R^2_{aj}, coeficiente de determinación ajustado; R^2_{CV}, coeficiente de determinación de la validación cruzada; *RMSE*, raíz del error medio cuadrático (MPa); $RMSE_{CV}$, raíz del error medio cuadrático de la validación cruzada; *n*, tamaño de la muestra.

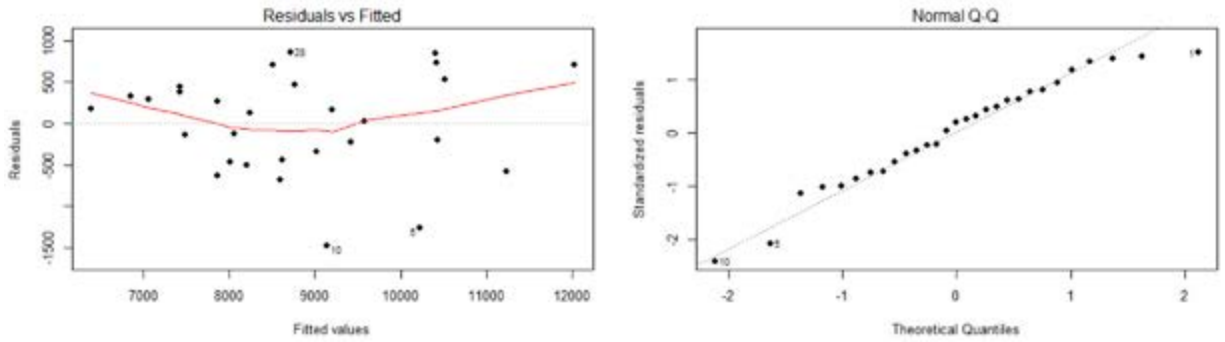
El análisis de la multicolinealidad, mediante VIF, mostró valores inferiores a 10 para ambas variables. Respecto a la normalidad y homocedasticidad de los residuos, los análisis demostraron que se cumplían los supuestos necesarios ya que el p-valor era superior a 0,05 en todos los casos y por tanto se aceptaron las hipótesis nulas de normalidad y homocedasticidad respectivamente. El análisis gráfico tampoco mostró problemas graves de falta de normalidad o heterocedasticidad.

Tabla 5. Comprobación estadística de los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Modelo	Shapiro Wilk	Breusch Pagan
Modelo 1	0.99 (p=0.96)	9.74 (p=0.08)
Modelo 2	0,95 (p=0.24)	5.78 (p=0.22)

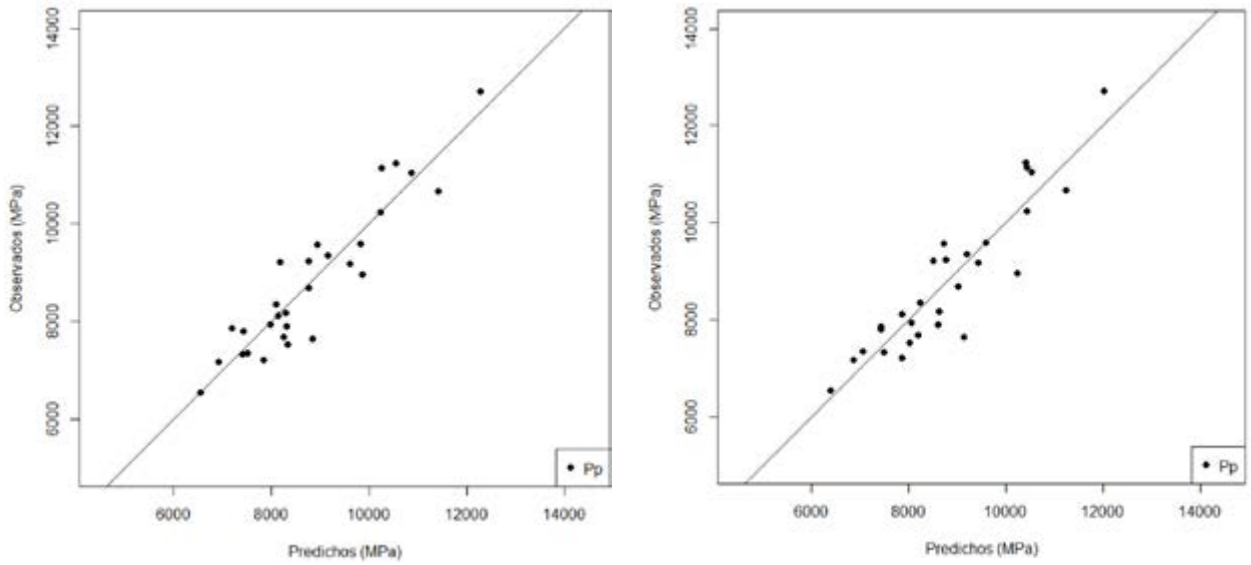


Gráfica 2. Residuos vs predichos (izquierda) y QQ-Plot del modelo 1 de masa.



Gráfica 3. Residuos vs predichos (izquierda) y QQ-Plot del modelo 2 de masa.

Por último se comprueba, con el gráfico de observados contra predichos, la calidad predictiva de los modelos.



Gráfica 4. Observados vs predichos del modelo 1 (izquierda) y del modelo 2 (derecha).

Conclusiones del estudio:

Este estudio está de acuerdo con estudios similares que destacan el papel clave de la edad del árbol, esbeltez del fuste, así como la influencia de la competencia en el módulo dinámico y la calidad estructural de la madera producida en una masa forestal (Caballé et al, 2020, Lasserre et al., 2005; Watt y Zoric, 2010; Merlo et al., 2014; Watt y Trincado, 2017).

Se demuestra que la calidad de la madera estructural del pino marítimo aumenta con la edad del árbol y para cierta edad, la madera de mayor calidad para uso estructural se encontrará en las mejores calidades de estación, en zonas de menor altitud y con poca pendiente y en los árboles más esbeltos.

La correlación positiva encontrada entre esbeltez y módulo dinámico tiene una base teórica sólida basada en la fórmula de pandeo de Euler discutida en otros estudios de *P.pinaster* (Merlo et al, 2014) y en diferentes especies (*Pinus taeda*, Roth et al., 2007), abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*, Johnson y Gartner, 2006), y pino silvestre (*Pinus sylvestris*, Lindström et al., 2009) según la cual la altura crítica que puede alcanzar un fuste antes de que se someta al pandeo elástico depende del módulo de elasticidad, de la densidad básica y del diámetro (Greenhill, 1881).

El módulo dinámico se incrementa por cuatro para el rango de edades, índices de sitios y manejo selvícola estudiados. El determinante más fuerte del módulo dinámico fue la edad del rodal. La correlación observada con la altura de los árboles fue observada en estudios previos (Merlo et al., 2014; Watt et al., 2006). La influencia del índice de competencia se relaciona con la influencia del área basimétrica observada por otros autores (Grabianowski et al., 2006; Wang et al., 2007).

Se obtienen resultados muy interesantes que permitirán ofrecer al usuario final herramientas para caracterizar el módulo de elasticidad dinámico de la madera de una masa y amplía los conocimientos de cara a aplicar una selvicultura orientada a producir madera con mejores propiedades tecnológicas.

Referencias bibliográficas

Gonzalo Caballé, Oscar Santaclara, Juan P. Diez, Federico Letourneau, Esther Merlo, Alejandro Martinez Meier, 2020. Where to find structural grade timber: A case study in ponderosa pine based on stand and tree level factors. Forest Ecology and Management 459 (2020) 117849

Fonti, P., von Arx, G., Garcia-Gonzalez, I., Eilmann, B., Sass-Klaassen, U., Gartner, H., Eckstein, D., 2010. Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. New Phytol. 185, 42–53.

Grabianowski, M., Manley, B., Walker, J.C.F., 2006. Acoustic measurements on standing trees, logs, and green lumber. Wood Sci. Technol. 40, 205–216.

Greenhill, A.G., 1881. Determination of the greatest height consistent with stability that a vertical pole or mast can be made, and of the greatest height to which a tree of given proportions can grow. Proc. Camb. Philos. Soc. 4, 65–73.

Johnson, G.R., Gartner, B.L., 2006. Genetic variation in basic density and modulus of elasticity of coastal Douglas-fir. Tree Genet. Genomes 3 (1), 25–33.

Lasserre, J.P., Mason, E., Watt, M., 2004. The influence of initial stocking on corewood stiffness in a clonal experiment of 11-year-old Pinus radiata D. Don. New Zeal. J. For. 49, 18–23.

Lasserre, J.P., Mason, E., Watt, M., 2005. The effects of genotype and spacing on Pinus radiata (D. Don) corewood stiffness in a 11 year old experiment. For. Ecol. Manage. 205, 375–383.

Lindström, H., Reale, M., Grekin, M., 2009. Using non-destructive testing to assess modulus of elasticity of Pinus sylvestris trees. Scand. J. For. Res. 24, 247–257.

Merlo, E., Alvarez-Gonzalez, J.G., Santaclara, O., Riesco, G., 2014. Modelling modulus of elasticity of Pinus pinaster Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. For. Syst. 23 (1), 153–166.

Roth, B.E., Li, X., Huber, D.A., Peter, G.F., 2007. Effects of management intensity, genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the southeastern USA. For. Ecol. Manage. 246, 155–162.

Waghorn, M.J., Mason, E.G., Watt, M.S., 2007. Influence of initial stand density and genotype on longitudinal variation in modulus of elasticity for 17-year-old Pinus radiata. For. Ecol. Manage. 252, 67–72..

Wang, X., Ross, R.J., Carter, P., 2007. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I. Acoustic wave behavior. Wood Fiber Sci. 39 (1), 28–38.

Watt, M.S., Zoric, B., 2010. Development of a model describing modulus of elasticity across environmental and stand density gradients in plantation-grown Pinus radiata within New Zealand. Can. J. For. Res. 40, 1558–1566.

Watt, M.S., Trincado, G., 2017. Modelling the influence of environment on juvenile modulus of elasticity in Pinus radiata grown in Chile. For. Ecol. Manage. 400,238–245.

Zobel, B., Jett, B.J., 1995. Genetics of Wood Production. Springer-Verlag, BerlinHeidelberg, Germany, pp. 337.

Zoric, B., 2009. Modelling the Influence of Stocking on Longitudinal and Radial Variation in Wood Properties of Pinus radiata on a Warm Northland Site. Masters thesis (M.For. Sci.) undertaken at the School of Forestry. University of Canterbury,Christchurch, N.Z.

7.- UNAS NOCIONES SOBRE DASOMETRÍA

Alejandro Cantero Amiano
HAZI Fundazioa

1.- Introducción

Hay varios libros y páginas *web* dedicadas a la dasometría y es una materia suficientemente compleja para dedicarle un libro aparte. En este capítulo solo se van a dar unas pequeñas nociones de dasometría aplicadas a las masas del pino marítimo y al propio IFN.

Como se suele indicar en los tratados sobre esta materia[1], la dasometría como ciencia forestal se divide en tres ramas esenciales relacionadas entre sí:

- La dendrometría, que trata de la medición de las dimensiones de los árboles y estudia su forma y la determinación de su volumen en madera o biomasa.
- La epidometría, que estudia las técnicas de medición y las leyes que regulan el crecimiento e incremento de los árboles individuales y la producción de las poblaciones forestales.
- Y la dasometría propiamente dicha, que se encarga de los aspectos relacionados con la estimación métrica y cubicación de la masa forestal, la cual debe entenderse como el conjunto de árboles que conviven en un espacio común.

Este capítulo se va a centrar en la dasometría como un conjunto de parámetros de seguimiento de la selvicultura registrada a lo largo de un turno en un rodal y de su productividad en madera.

2.- Tablas de producción disponibles

Las tablas de producción son una colección de modelos matemáticos que tratan de mostrar de forma simplificada la evolución de rodales forestales de distintas calidades o productividades y sometidos a diferentes regímenes selvícolas. Normalmente se emplean tablas de producción de selvicultura media observada o estándar para una especie y región.

Para la estimación de la productividad forestal se han empleado las tablas de producción disponibles en las principales especies forestales procedentes de plantación en el País Vasco:

- Las tablas de Madrigal y Toval para el pino radiata (1975). En estas tablas se emplean tres clases de calidad: 1 (buena), 2 (media) y 3 (baja)

1 Ejemplo disponible de "Dasometría. Clase y Guía de Actividades Prácticas", Yner Juárez Félix, 2014: https://www.academia.edu/35493332/DASOMETR%C3%8DA_Apuntes_de_Clase_y_Gu%C3%ADa_de_Actividades_Pr%C3%A1cticas

- Las tablas gallegas (incluidas en la obra Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Xunta de Galicia, 2009) para pino marítimo (costa gallega), eucalipto globulus y nitens. En estos casos la clase de calidad empleada es una cifra que indica la altura dominante alcanzada a una edad concreta, en torno a 2/3 del turno teórico: 10 años en los eucaliptos y 20 años en el pino marítimo

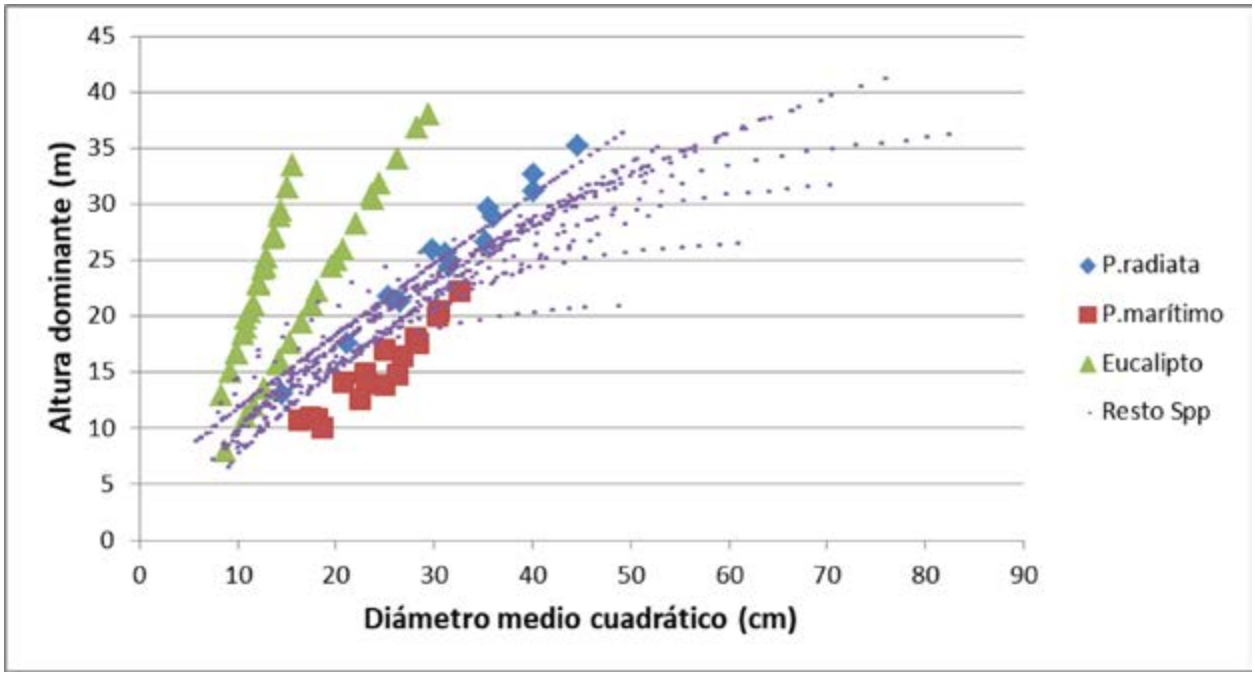
- Las tablas inglesas (Hamilton y Christie, 1981) para las coníferas de crecimiento medio: ciprés de Lawson, pino silvestre, pino laricio, pícea, abeto Douglas y alerce. En estos casos la clase de calidad empleada (YC o Yield Class) es una cifra que indica el crecimiento medio en m3/ha-año a los 50-60 años. Incluyen también al roble americano como ejemplo de frondosa representativa de crecimiento medio (turno entre 60-100 años)

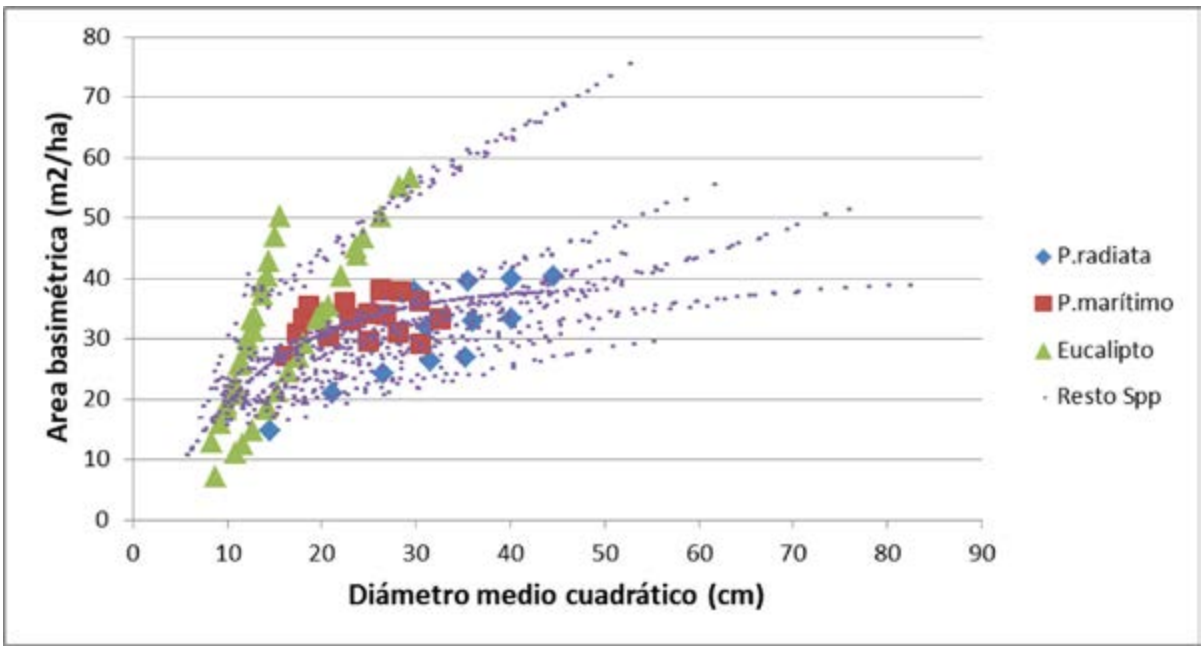
- Las tablas navarras para el haya de Madrigal (Gobierno de Navarra, Pamplona, 1992). En estas tablas se emplean cinco clases de calidad, desde la mejor I hasta la peor V. Se incluye aquí esta especie como frondosa representativa de crecimiento lento (turno superior a 100 años)

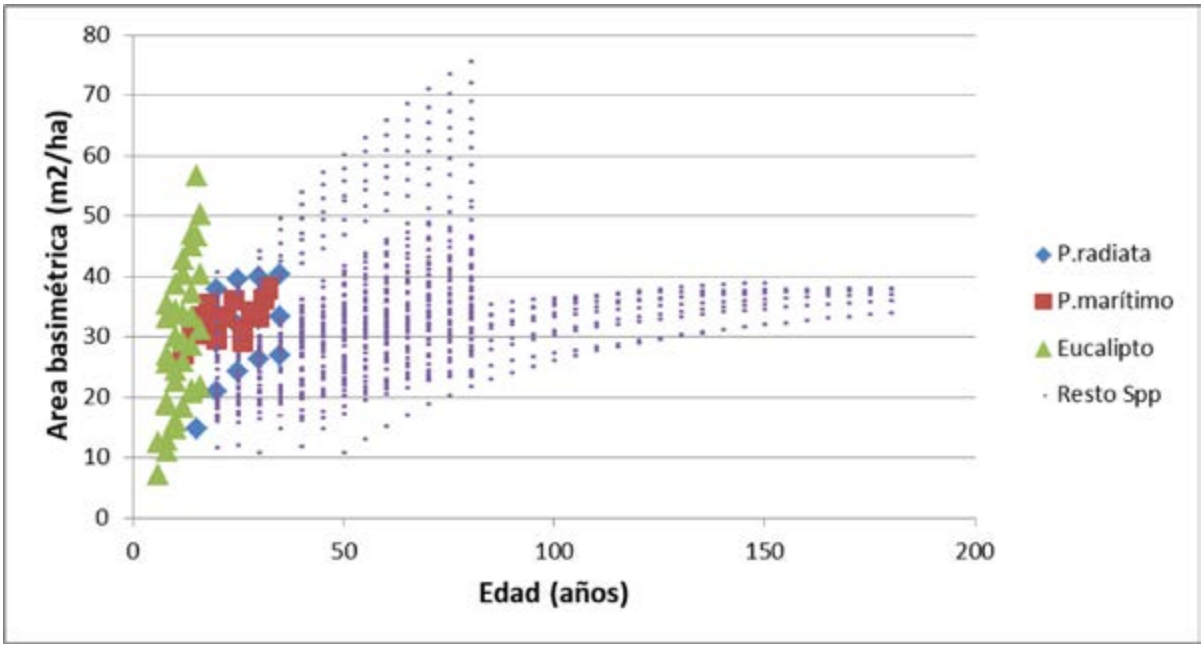
Hay que tener en cuenta que todas estas especies parten de una densidad inicial de plantación que, mediante intervenciones selvícolas, va siendo reducida buscando siempre la espesura normal o completa de cada rodal. La excepción la constituyen los eucaliptos, en los que no se realizan intervenciones salvo la corta final a la edad de unos 15 años.

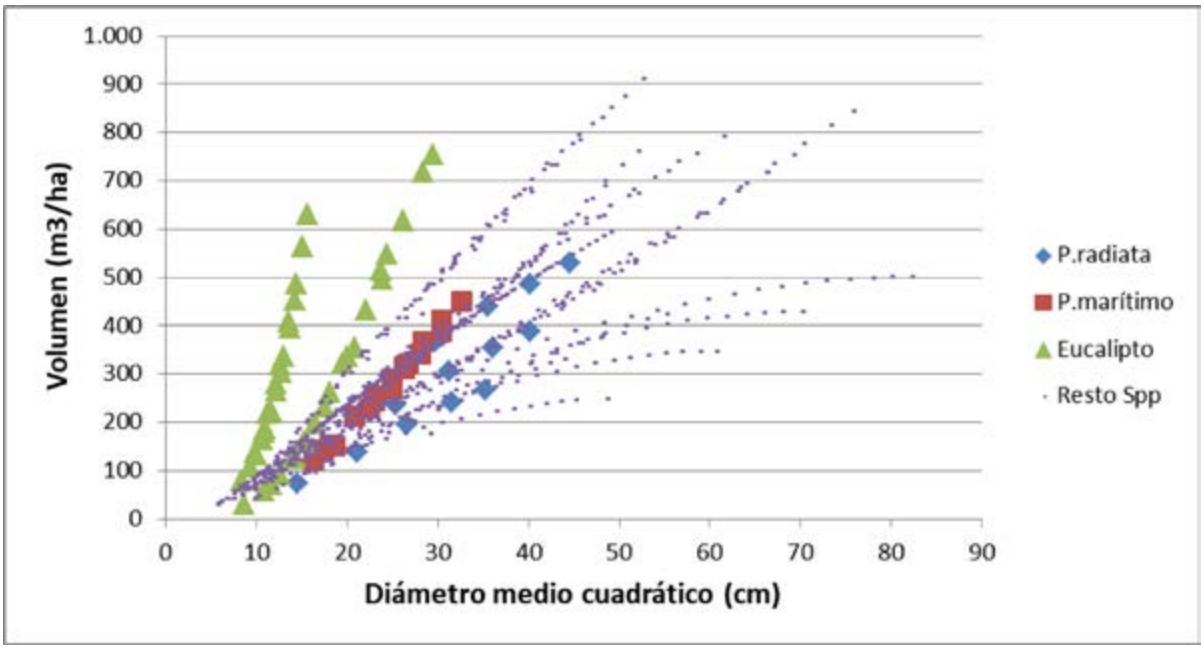
El análisis de los resultados de todas estas tablas disponibles, tanto en escala normal como logarítmica, pone de manifiesto los niveles de espesura medios propuestos para el pino marítimo frente al resto de especies. Por ejemplo, para un rodal con un diámetro medio cuadrático de 20 cm, la densidad aconsejada en tablas para el pino marítimo ronda los 1.000 pies/ha, frente a los 1.500 pies/ha del ciprés de Lawson o los 800 pies/ha del pino silvestre. Estas diferencias corresponden a los distintos niveles de espesura aconsejados en este tipo de tablas para las distintas especies forestales.

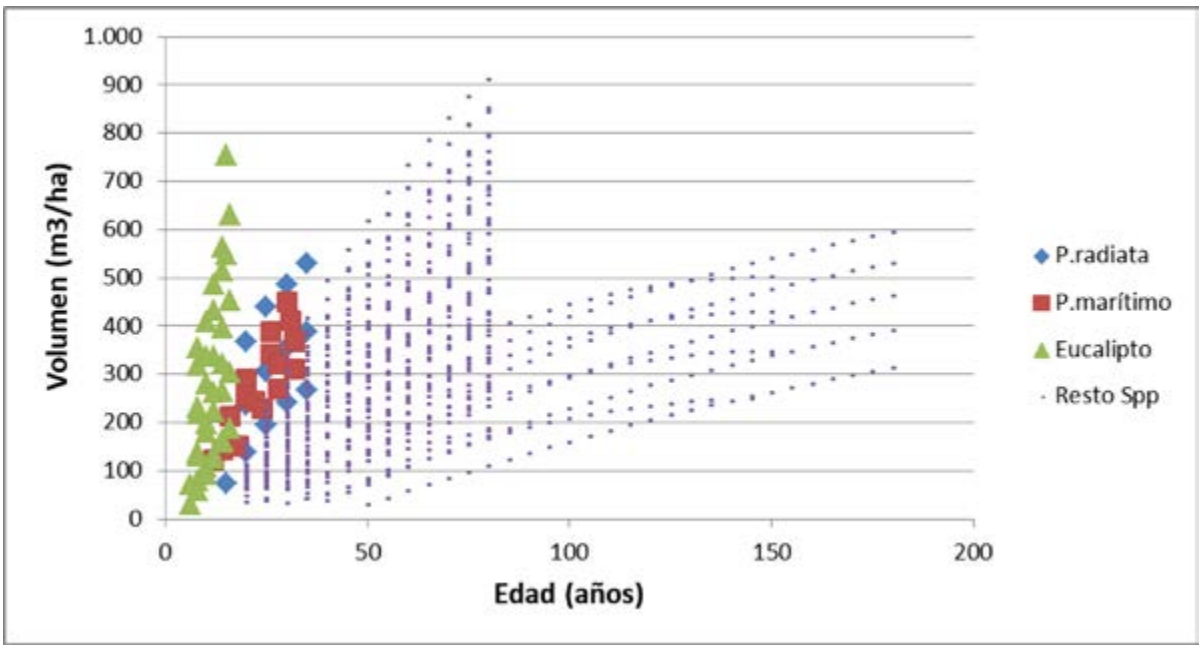
En las siguientes gráficas se comparan los distintos resultados que prevén las tablas empleadas para las distintas especies y calidades disponibles.

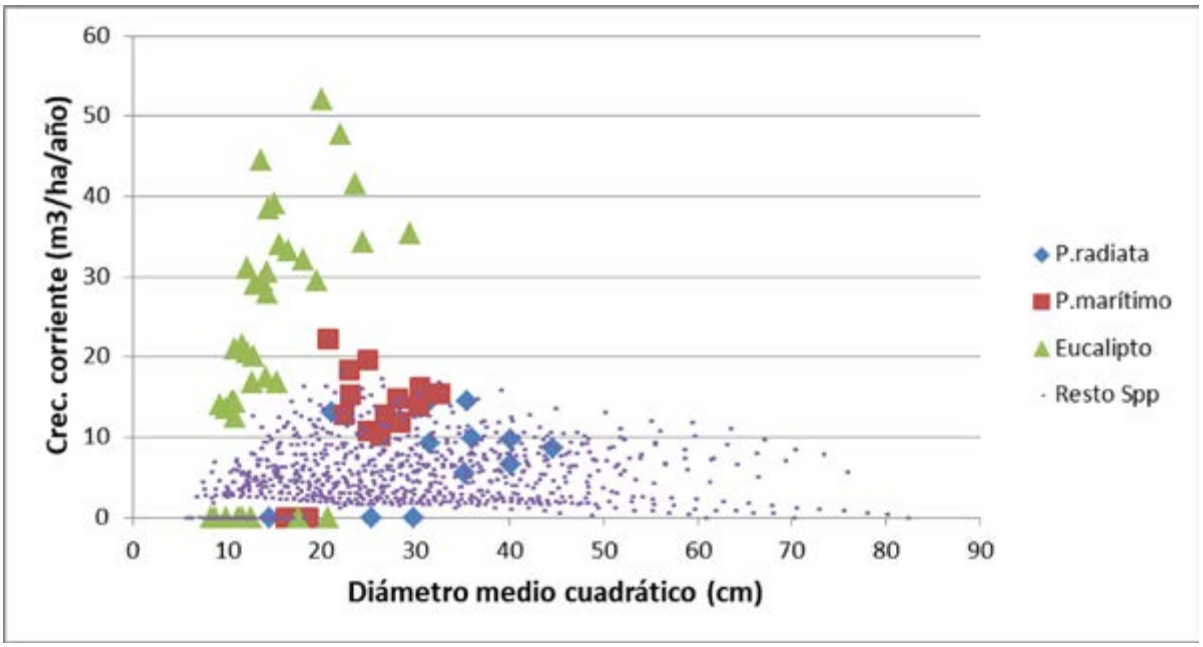


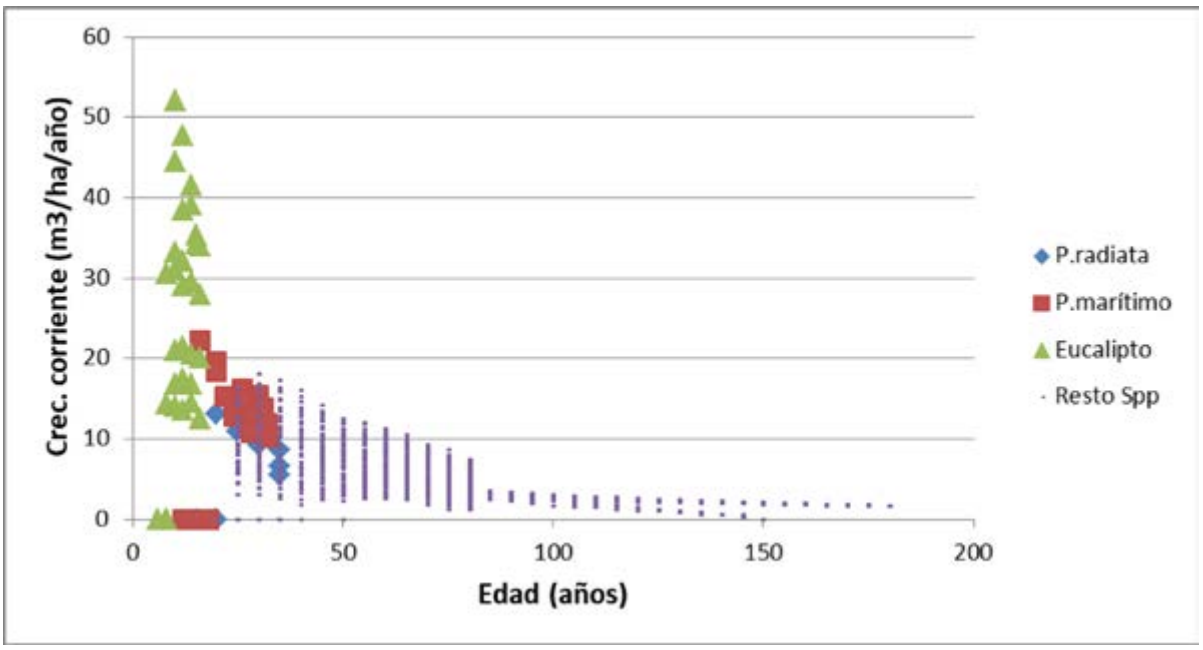

Area basimétrica (m2/ha)
Diámetro medio cuadrático (cm)
P.radiata
P.marítimo
Eucalipto
Resto Spp

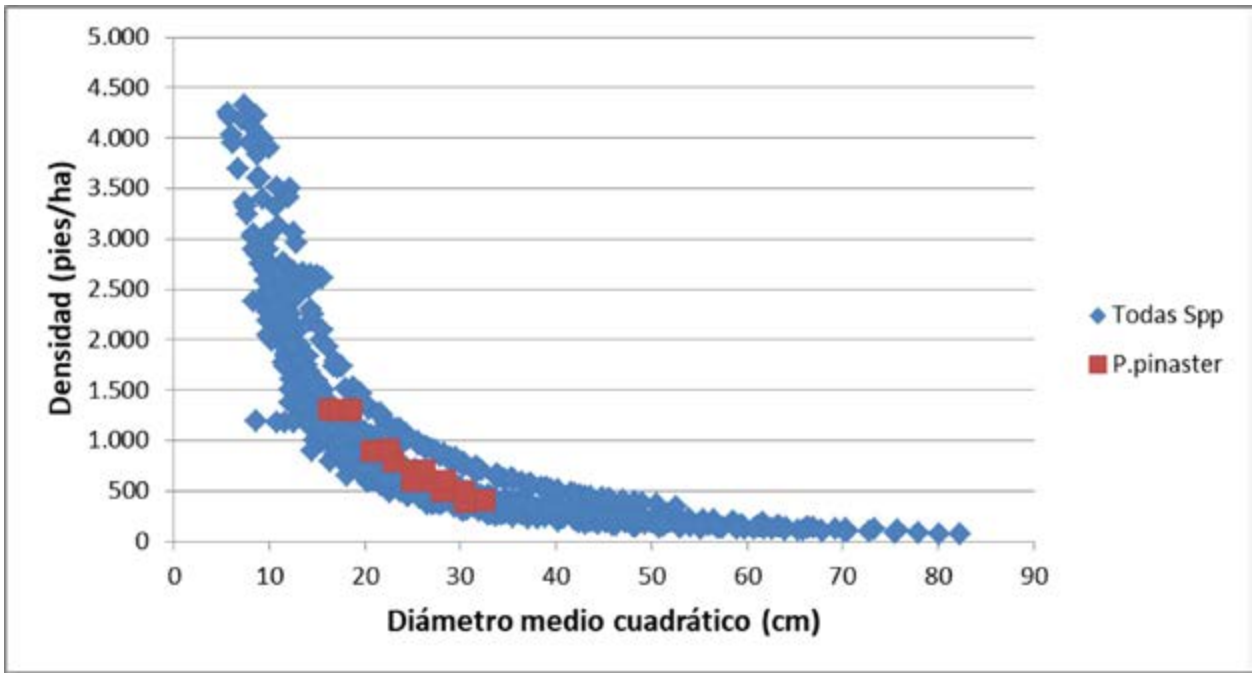

Area basimétrica (m2/ha)
Edad (años)
P.radiata
P.marítimo
Eucalipto
Resto Spp

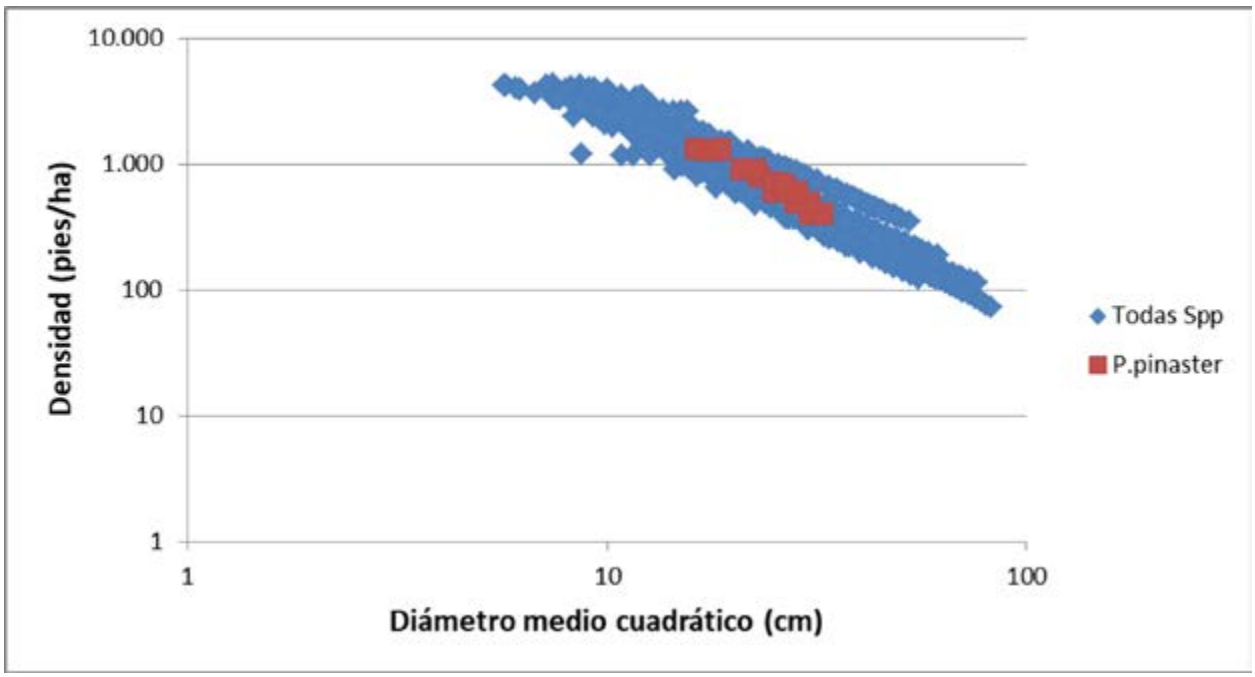

Volumen (m3/ha)
Diámetro medio cuadrático (cm)
P.radiata
P.marítimo
Eucalipto
Resto Spp


Volumen (m3/ha)
1.000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
50
100
150
200
Edad (años)
P.radiata
P.marítimo
Eucalipto
Resto Spp


Crec. corriente (m3/ha/año)
60
50
40
30
20
10
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Diámetro medio cuadrático (cm)
P.radiata
P.marítimo
Eucalipto
Resto Spp


Crec. corriente (m3/ha/año)
60
50
40
30
20
10
0
0
50
100
150
200
Edad (años)
P.radiata
P.marítimo
Eucalipto
Resto Spp





Estimación de la espesura: Índice de Reineke[2]

Con el objetivo de medir la espesura de una masa forestal, Reineke (1933) estableció un índice basado en el número de pies por hectárea y el diámetro normal del árbol de área basimétrica promedio (dg=diámetro medio cuadrático). Este índice de Reineke (IDR=Índice de Densidad de Rodal o SDI=*Stand density index*) suele ser la base para la elaboración de Diagramas de Manejo de Densidad de Masa (*Stand density management diagrams*).

En masas forestales gestionadas a la máxima espesura posible, se puede representar el logaritmo del número de árboles por unidad de superficie respecto el logaritmo del diámetro cuadrático medio (diámetro del árbol de área basal promedio), de forma que se obtiene una línea recta de pendiente negativa, usualmente denominada como línea de autoaclareo o línea de máxima espesura y que viene a expresar la máxima biomasa viva posible.

$$\mathbf{Ln\ (n) = k - r * Ln\ (dg)}$$

2 https://silvicultor.blogspot.com/2008/11/espesura-v-el-ndice-de-reineke.html

Donde: n = número de pies por unidad de superficie en pies/ha, dg = diámetro medio cuadrático en cm, k = constante dependiente de la especie considerada

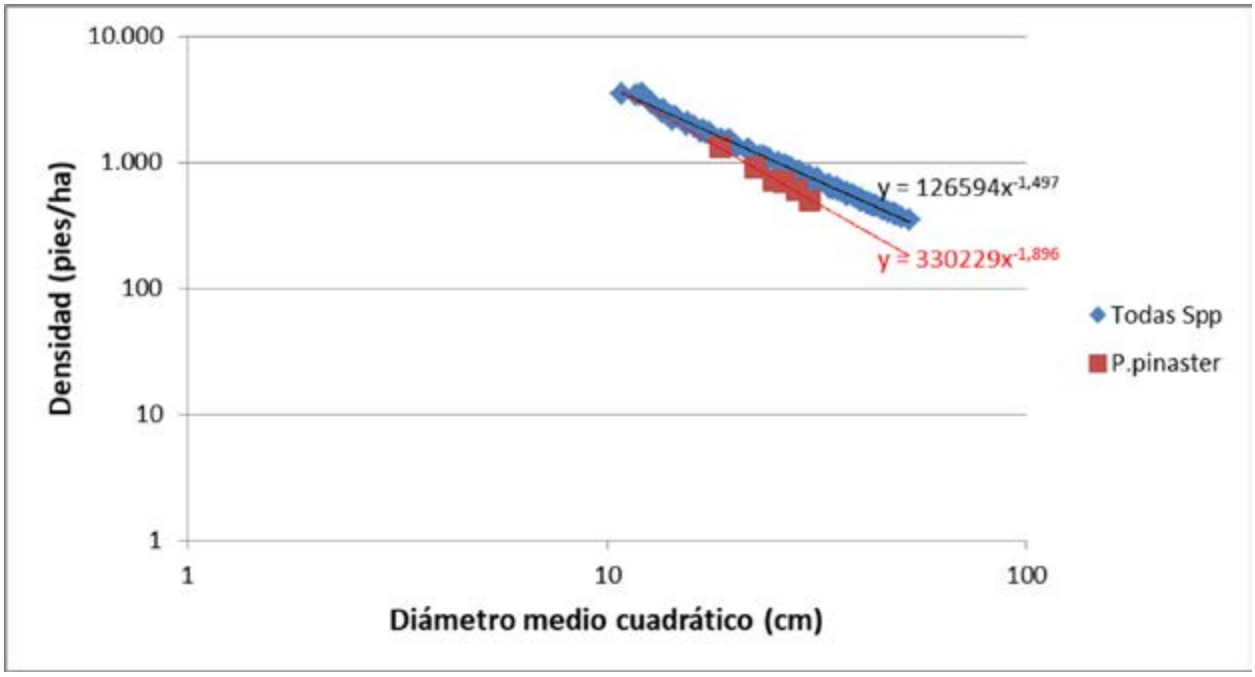
En cuanto al valor r de la pendiente de la recta, Reineke propuso un valor relativamente independiente de la especie y que se situaba en el entorno de -1,605. Como se ha demostrado posteriormente, dicha pendiente puede variar con la especie, aunque se admita el propuesto por Reineke como valor por defecto en ausencia de información más completa.

También se conoce como Índice de Reineke (SDI) el número de árboles de 10 pulgadas (25,4 cm) por hectárea de espesura equivalente.

SDI = n * (dg/25,4)^r

Donde: n = número de pies por unidad de superficie (pies/ha), dg = diámetro medio cuadrático (cm), r = constante dependiente de la especie considerada (o -1,605 por defecto)

El valor de SDI obtenido en un rodal se puede comparar con el máximo de esa especie y clase de productividad para determinar la espesura de ese rodal respecto a la máxima biológicamente posible. Según las tablas empleadas, el valor de r puede variar entre -1,5 para el ciprés de Lawson y -1,9 para el pino marítimo. Si se toman únicamente los valores propios de las coníferas, el valor promedio de r sería de -1,6 -valor propuesto por Reineke-.

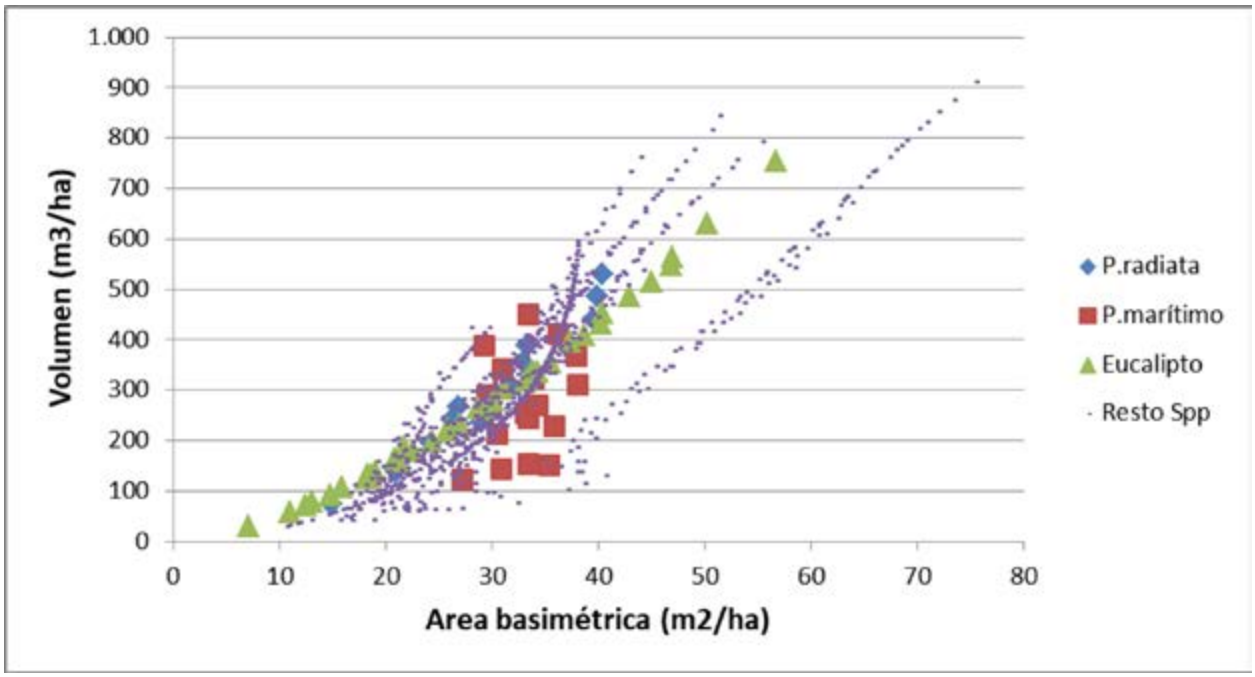


Especie	r	SDI mínimo	SDI medio	SDI máximo
Ciprés de Lawson	-1,497	108	2.031	13.685
Pino silvestre	-1,519	68	3.532	30.719
Pino laricio	-1,727	65	1.990	20.940
Pino marítimo	-1,896	268	1.060	2.651
Pino radiata	-1,566	105	454	2.204
Pícea	-1,526	45	2.435	18.815
Abeto Douglas	-1,456	20	777	13.127
Alerce	-1,630	36	965	9.254
Roble americano	-1,656	11	2.151	31.663
Eucalipto globulus	-1,777	5.688	8.579	14.099
Eucalipto nitens		651	2.265	6.629
Haya	-1,748	70	4.108	46.673

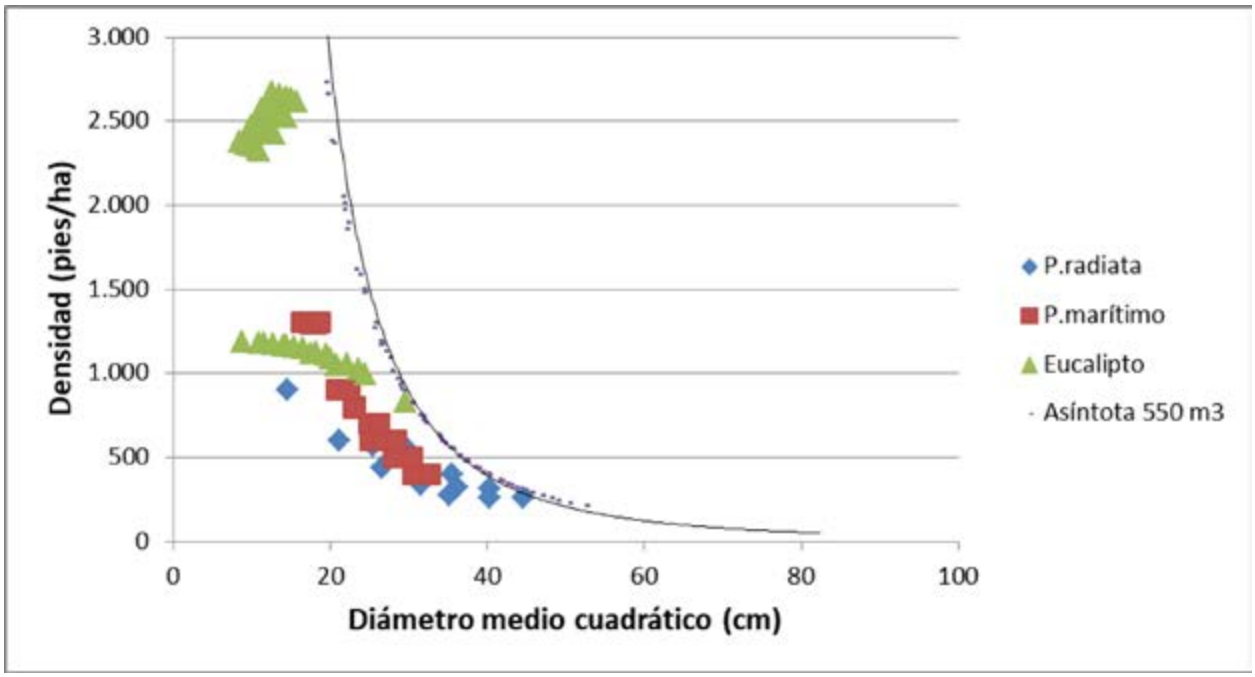
Estimación de la espesura: Existencias maderables

Otra forma de medir la espesura de una masa forestal es, simplemente, calcular su área basimétrica y sus existencias maderables o volumen en pie. Según las tablas analizadas, parece existir unos máximos respectivos de 80 m^2/ha y de 1.000 m^3/ha que no son superados por ninguna especie y ninguna clase de calidad, aunque las masas más productivas (YC24) de ciprés de Lawson y de abeto Douglas se aproximan al final de su turno.

Hay que tener en cuenta que, dependiendo de la ecuación de cubicación empleada o de la ubicación concreta de una parcela de muestreo ubicada en un arbolado especialmente denso, estos límites podrían sobrepasarse de forma puntual en parcelas concretas.



En las tablas de producción correspondientes a las especies propias del IFNN no se superaría teóricamente el nivel de existencias maderables de 550 m^3/ha, debido a que se van realizando claras periódicas en los pinares y a que los eucaliptales se cortan al alcanzar los 15 años. La densidad asíntótica que se alcanzaría con esa espesura máxima o con esas existencias máximas de 550 m^3/ha sería muy semejante a la propuesta en las tablas inglesas para el ciprés de Lawson.



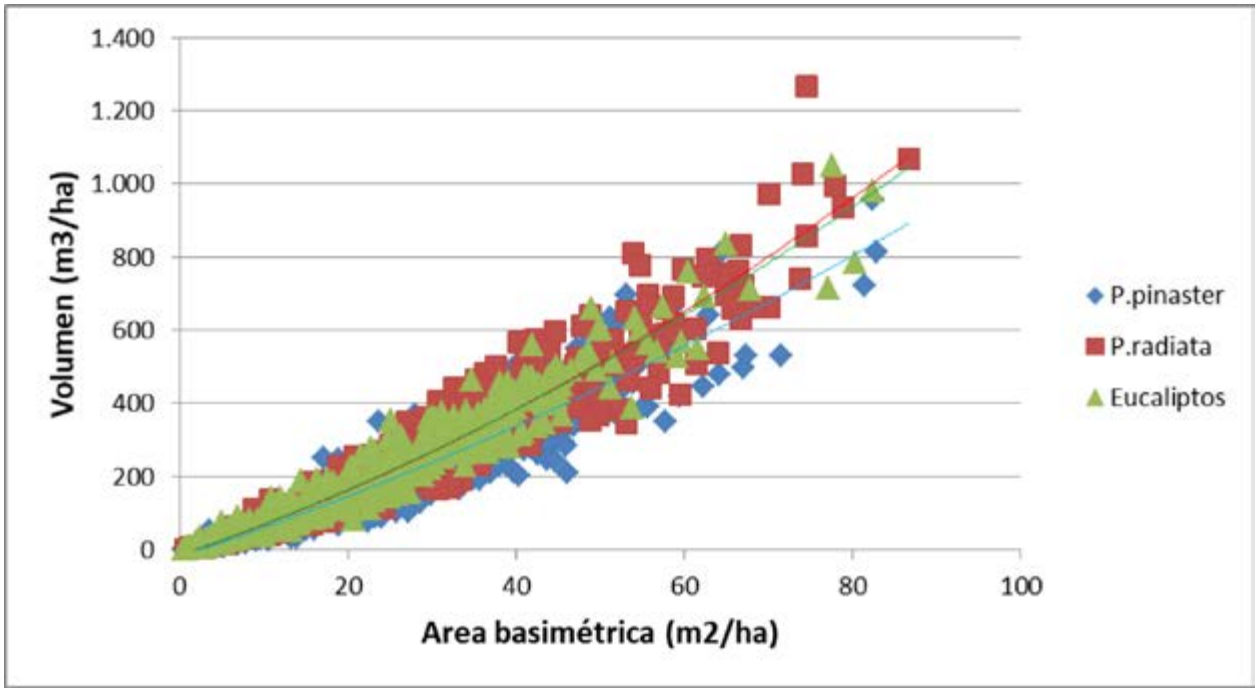
3.- Parcelas de pino marítimo en el IFN

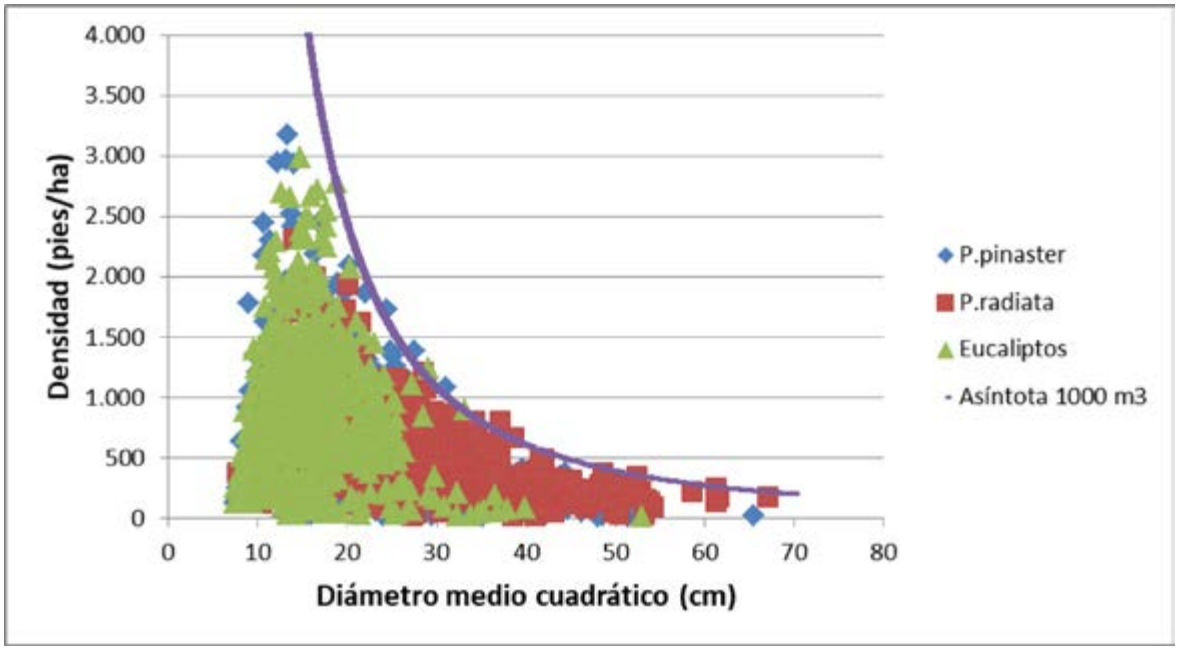
El Inventario Forestal Nacional (IFN) también permite disponer de un gran número de árboles y parcelas remedidos desde hace décadas. En concreto, el reciente IFNN (IFN del Norte) permite cuantificar los efectos de la selvicultura seguida en los últimos años en parcelas dominadas por Pino marítimo, Pino radiata o Eucaliptos.

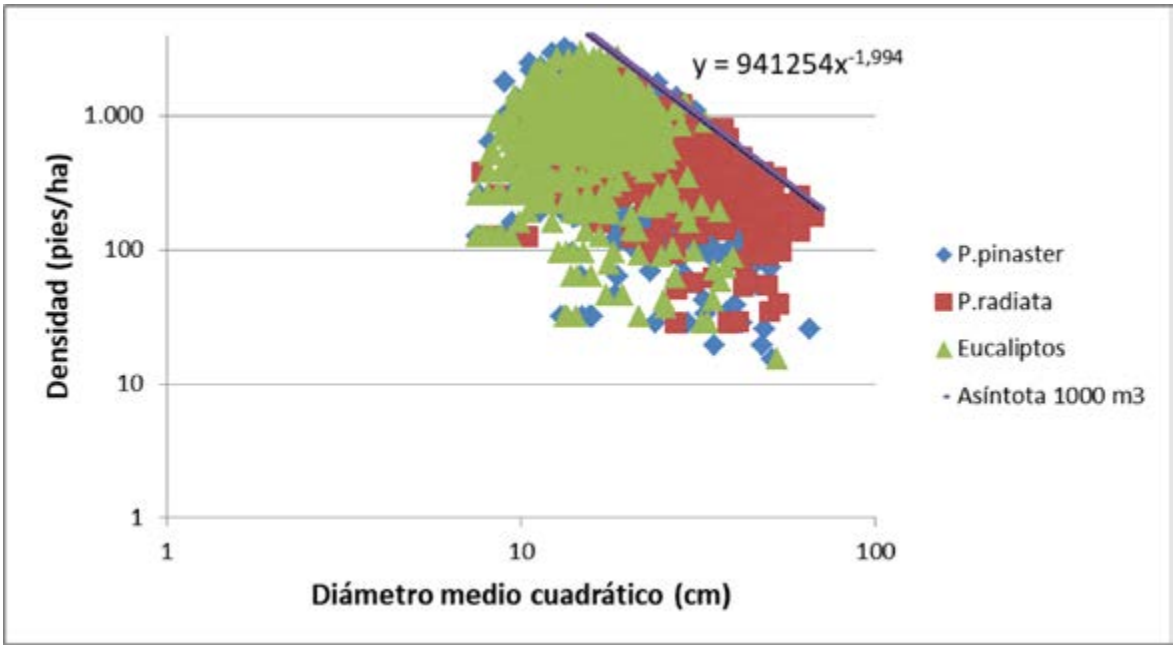
Se dispone de datos procedentes de 827 parcelas de muestreo dominadas por *P. pinaster*, de 463 parcelas de muestreo dominadas por *P. radiata*, de 612 parcelas de eucaliptos y otras de mezclas de especies. En general, los datos medios de estas parcelas IFNN indican importantes diferencias entre los pinares y los eucaliptales.

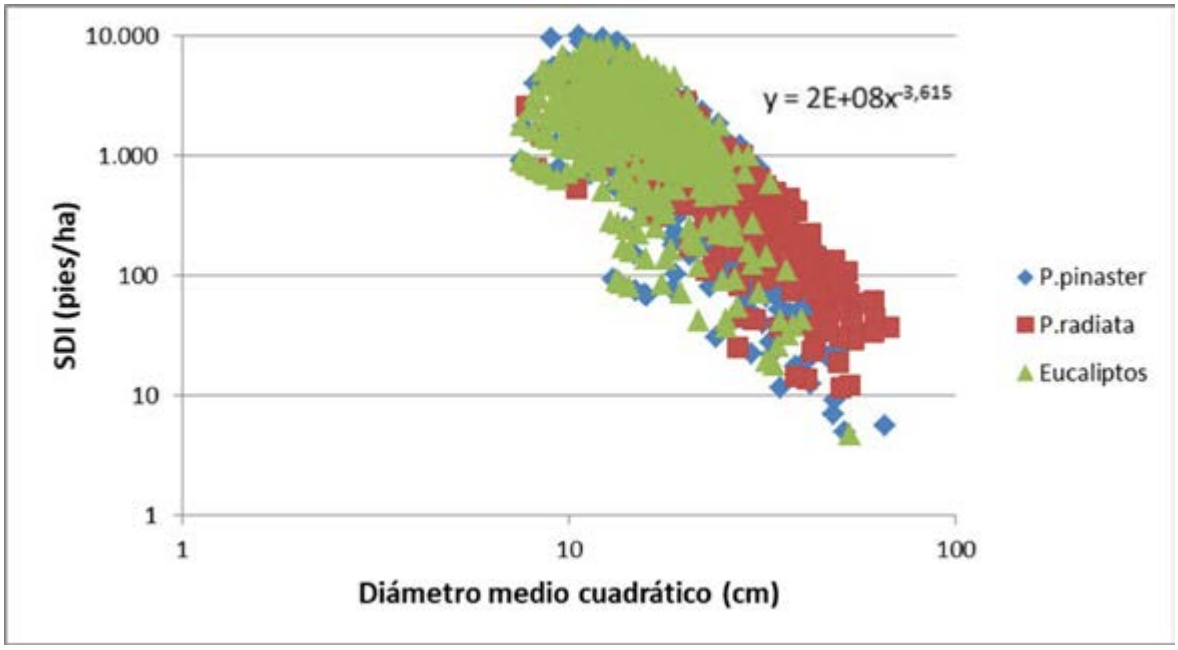
Especie	Diámetro medio cuadrático (cm)	Area basim. media (m^2/ha)	Volumen medio (m^3/ha)	SDI medio (pies/ha)
Pino marítimo	23	24	194	1.215
Pino radiata	29	30	284	716
Eucalipto globulus	17	19	171	2.097
Eucalipto nitens	15	17	140	2.233
Total IFNN	23	24	211	1.370

En el total de 2.017 parcelas inventariables del IFNN, sólo en 6 parcelas se supera el umbral de 80 m^2/ha de área basimétrica (3 parcelas de *P. pinaster*, 2 de eucaliptos y una de *P. radiata* con áreas basimétricas entre 80 y 86 m^2/ha) y en 4 parcelas se supera el umbral de 1.000 m^3/ha de existencias maderables (3 parcelas de *P. radiata* y una de eucalipto con existencias entre 1.000 y 1.260 m^3/ha). Este volumen en pie máximo o asíntota de 1.000 m^3/ha aparenta representar un máximo de espesura para todas estas especies.

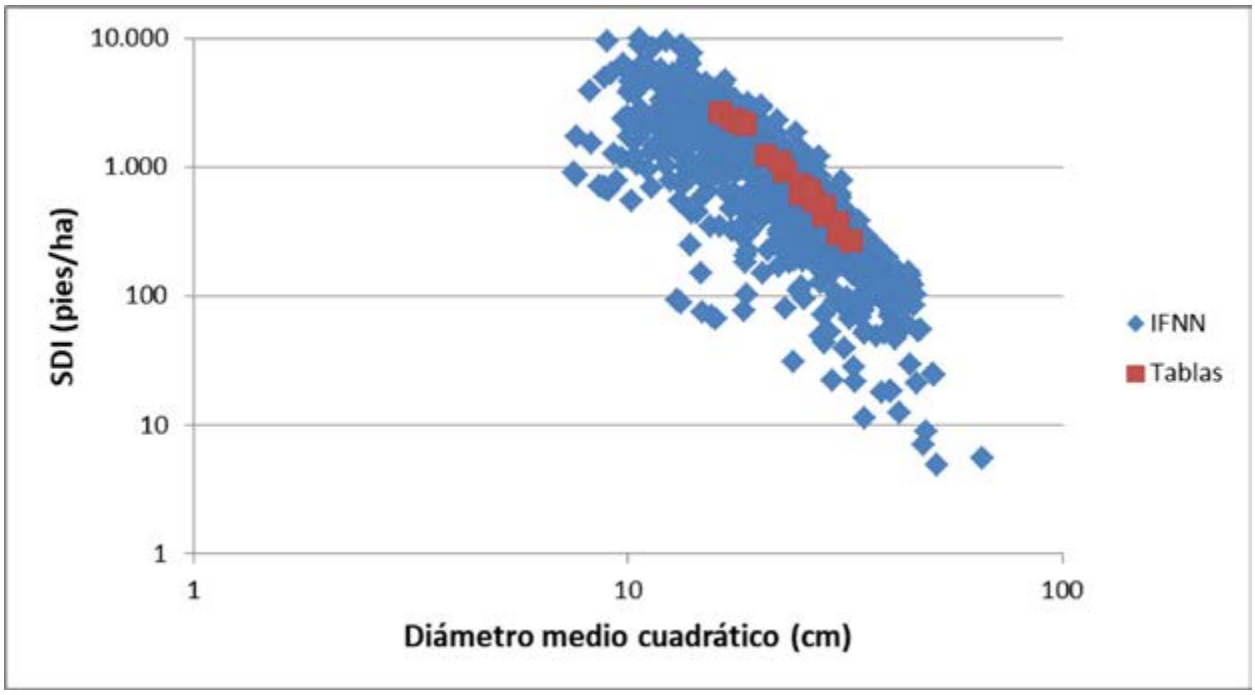



4.000
3.500
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
500
0
Densidad (pies/ha)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Diámetro medio cuadrático (cm)
P.pinaster
P.radiata
Eucaliptos
Asíntota 1000 m3


y = 941254x-1,994
1.000
100
10
1
Densidad (pies/ha)
1
10
100
Diámetro medio cuadrático (cm)
P.pinaster
P.radiata
Eucaliptos
Asíntota 1000 m3


10.000
1.000
100
10
1
SDI (pies/ha)
y = 2E+08x-3,615
1
10
100
Diámetro medio cuadrático (cm)
P.pinaster
P.radiata
Eucaliptos

Tomando solo las parcelas IFNN dominadas por el pino marítimo, se observa que los valores de SDI propuestos en las tablas vendrían a suponer una pequeña muestra central de la variedad encontrada en las parcelas de campo.



4.- Parcelas SiGCa-PIMA

El inventario realizado en el marco del proyecto SiGCa-PIMA también permite disponer de un gran número de árboles y parcelas, muchos de los cuales podrán ser remedidos en los próximos años. En las 35 parcelas levantadas con radio 14,1 m (superficie 625 m^2) se pudieron medir 1.320 pinos, de los cuales cerca de la mitad de ellos ya han sido cortados, debido a que en 19 parcelas se realizaron cortas finales o intermedias tras su medición.

Parcela	Coordenada X ETRS89	Coordenada Y ETRS89	Municipio	Código	Provincia	Pinos extraídos
1	73637	4651673	Lantemil	32	Ourense	Sí
2	73561	4651549	Lantemil	32	Ourense	No
3	73730	4651587	Lantemil	32	Ourense	Sí
4	25812	4728681	Andras	36	Pontevedra	Sí
5	25902	4728663	Andras	36	Pontevedra	Sí
6	25780	4728491	Andras	36	Pontevedra	No
7	25835	4728557	Andras	36	Pontevedra	No
8	25898	4727756	Andras	36	Pontevedra	No
9	25881	4727923	Andras	36	Pontevedra	No
10	13617	4751209	PortoDoSon	15	A Coruña	Sí
11	13609	4751233	PortoDoSon	15	A Coruña	Sí
12	38244	4756602	Brion	15	A Coruña	Sí
13	39062	4757760	Brion	15	A Coruña	Sí
14	13313	4751008	PortoDoSon	15	A Coruña	Sí
15	13353	4751009	PortoDoSon	15	A Coruña	Sí
16	13549	4751156	PortoDoSon	15	A Coruña	Sí
17	23252	4673531	Donas	36	Pontevedra	Sí
18	20596	4674012	Donas	36	Pontevedra	Sí
19	20534	4673958	Donas	36	Pontevedra	Sí
20	23168	4673768	Donas	36	Pontevedra	Sí

Parcela	Coordenada X ETRS89	Coordenada Y ETRS89	Municipio	Código	Provincia	Pinos extraídos
21	20519	4673750	Donas	36	Pontevedra	Sí
22	19519	4673396	Donas	36	Pontevedra	No
23	516936	4788292	Larrabetzu	48	Bizkaia	No
24	516837	4788269	Larrabetzu	48	Bizkaia	No
25	516918	4788219	Larrabetzu	48	Bizkaia	No
26	422880	4811008	Pielagos	39	Cantabria	No
27	423015	4811772	Pielagos	39	Cantabria	No
28	423320	4811370	Pielagos	39	Cantabria	No
29	134877	4743285	Sarria	27	Lugo	No
30	134892	4743371	Sarria	27	Lugo	No
31	134974	4743459	Sarria	27	Lugo	No
32	130437	4727108	Boveda	27	Lugo	Sí
33	130409	4727035	Boveda	27	Lugo	Sí
34	219279	4801264	Tineo	33	Asturias	No
99	516863	4788211	Larrabetzu	48	Bizkaia	Sí

Parcela	n	ab	d	dg	h	ho	t	IS
1	256	40,07	43,69	44,64	30,38	31,30	75	26
2	1.520	45,03	17,92	19,42	18,74	19,30		
3	528	35,14	26,33	29,11	21,63	23,50	59	26
4	464	46,94	34,81	35,89	22,83	24,40	47	17
5	432	51,00	37,36	38,77	24,68	25,70	43	17
6	352	61,19	43,14	47,05	25,88	26,40		
7	304	49,89	43,36	45,71	28,54	29,60		
8	256	40,71	43,74	45,00	24,05	26,60		
9	832	44,20	20,42	26,01	25,44	27,20		
10	736	49,05	26,66	29,13	17,34	17,90	53	13
11	704	52,27	27,87	30,75	19,92	21,20	48	15
12	864	35,20	20,95	22,78	21,54	22,70	37	15
13	976	40,05	19,64	22,86	21,13	21,50	30	17
14	848	38,08	21,20	23,91	15,45	16,20	41	11
15	752	37,06	22,62	25,05	15,56	15,90	37	11
16	1.184	50,94	20,40	23,41	19,27	19,30	50	13
17	304	41,30	39,97	41,59	21,69	21,50	36	15
18	192	21,38	36,35	37,65	18,09	18,40	33	13
19	176	17,89	35,28	35,97	16,57	16,90	36	11
20	256	29,94	37,72	38,59	19,92	19,90	38	13
21	304	21,83	28,52	30,24	15,60	15,90	42	11
22	544	38,80	25,35	30,13	24,43	25,80		
23	544	47,46	32,42	33,33	26,58	27,00	51	19
24	576	55,27	34,33	34,95	23,48	27,34	51	19
25	672	60,24	32,88	33,78	24,61	25,80	51	17
26	608	52,76	32,18	33,24	24,46	25,50	59	26
27	560	51,01	33,26	34,05	22,08	22,60		

Parcela	n	ab	d	dg	h	ho	t	IS
28	976	66,08	28,10	29,36	22,25	23,40	55	17
29	624	39,98	27,18	28,56	20,22	20,00		
30	880	59,19	28,26	29,26	23,93	24,00		
31	544	50,93	31,06	34,53	23,97	24,60		
32	592	41,75	28,51	29,97	22,71	22,50	28	17
33	752	37,93	22,95	25,34	22,43	25,60	29	19
34	576	80,91	41,26	42,29	27,29	28,57	55	26
99	432	43,54	35,30	35,81	20,17	23,54	45	15
Media	603,43	45,00	30,89	32,80	22,08	23,07	45,16	16,76

Parcela	VCCDi	VCC	VSC	%Cort	f	crec
1	523,89	510,56	387,61	24,08	0,420	6,81
2	389,69	347,58	228,54	34,25	0,412	
3	368,70	331,66	240,10	27,61	0,437	5,62
4	462,38	455,12	340,24	25,24	0,425	9,68
5	516,60	524,70	398,19	24,11	0,417	12,20
6	589,22	638,63	496,44	22,26	0,403	
7	579,66	595,33	467,73	21,43	0,418	
8	434,23	417,97	320,70	23,27	0,427	
9	543,79	444,03	338,70	23,72	0,395	
10	345,12	338,87	246,34	27,30	0,398	6,39
11	440,55	416,66	309,24	25,78	0,400	8,68
12	375,53	320,89	231,54	27,85	0,423	8,67
13	389,25	343,55	259,68	24,41	0,406	11,45
14	261,85	232,44	162,63	30,04	0,395	5,67
15	247,68	230,21	162,38	29,46	0,399	6,22
16	411,07	372,07	269,71	27,51	0,379	7,44
17	345,26	358,28	273,87	23,56	0,400	9,95
18	172,95	161,08	119,60	25,75	0,417	4,88
19	136,73	125,47	92,28	26,45	0,423	3,49
20	247,52	242,41	180,53	25,53	0,407	6,38
21	155,16	140,34	103,22	26,45	0,412	3,34
22	443,47	384,39	292,25	23,97	0,406	
23	537,35	517,73	393,59	23,98	0,410	10,15
24	609,06	560,01	418,78	25,22	0,431	10,98
25	612,83	610,61	463,53	24,09	0,412	11,97
26	545,64	536,14	430,72	19,66	0,415	9,09
27	455,72	456,47	365,81	19,86	0,405	
28	605,83	608,97	486,06	20,18	0,414	11,07
29	358,77	306,82	218,87	28,67	0,380	
30	572,77	538,55	388,40	27,88	0,380	
31	545,11	457,46	339,44	25,80	0,375	
32	426,06	370,51	272,86	26,36	0,391	13,23
33	471,58	370,45	282,63	23,71	0,436	12,77
34	831,76	822,02	629,18	23,46	0,372	
99	417,00	357,01	266,70	25,30	0,407	7,93
Media	439,14	412,71	310,80	25,26	0,410	8,50

Donde:

Pinos extraídos = indica si los 10 pinos representativos de la parcela han sido cortados y transportados a EXFOPINO para su procesado

n = Densidad media de la parcela (pies/ha)

ab = Área basimétrica de la parcela (m^2/ha)

d = Diámetro medio aritmético (cm)

dg = Diámetro medio cuadrático (cm)

h = Altura media (m)

ho = Altura dominante (m)

t = Edad (años)

IS = Clase de calidad o Índice de Sitio IS (m)

VCCDi = Volumen con corteza de la parcela (m^3/ha) empleando la ecuación de perfil de Diéguez-Aranda *et al.* 2009 (página 145 del libro de *Herramientas selvícolas*, donde resume las funciones del modelo dinámico de crecimiento para *Pinus pinaster*). Las dos zonas gallegas para *Pinus pinaster* están definidas desde 1993[3]. Todas las parcelas de SIGCA se ubican en la zona costera, salvo las parcelas del interior de Lugo 29, 30, 31, 32 y 33. Dichas fórmulas son:

Zona costera: VCCDi = 5,48*10^(-4) * dg^(1,43-0,07553) * ho^1,22 * n^(0,7681+0,02974)

Zona interior: VCCDi = 5,48*10^(-4) * dg^(1,43) * ho^1,22 * n^(0,7681)

VCC = Volumen con corteza de la parcela (m^3/ha), aplicando la fórmula IFN2 a cada pino

VSC = Volumen sin corteza de la parcela (m^3/ha), aplicando la fórmula IFN2 a cada pino

%Cort = Porcentaje de corteza (%)

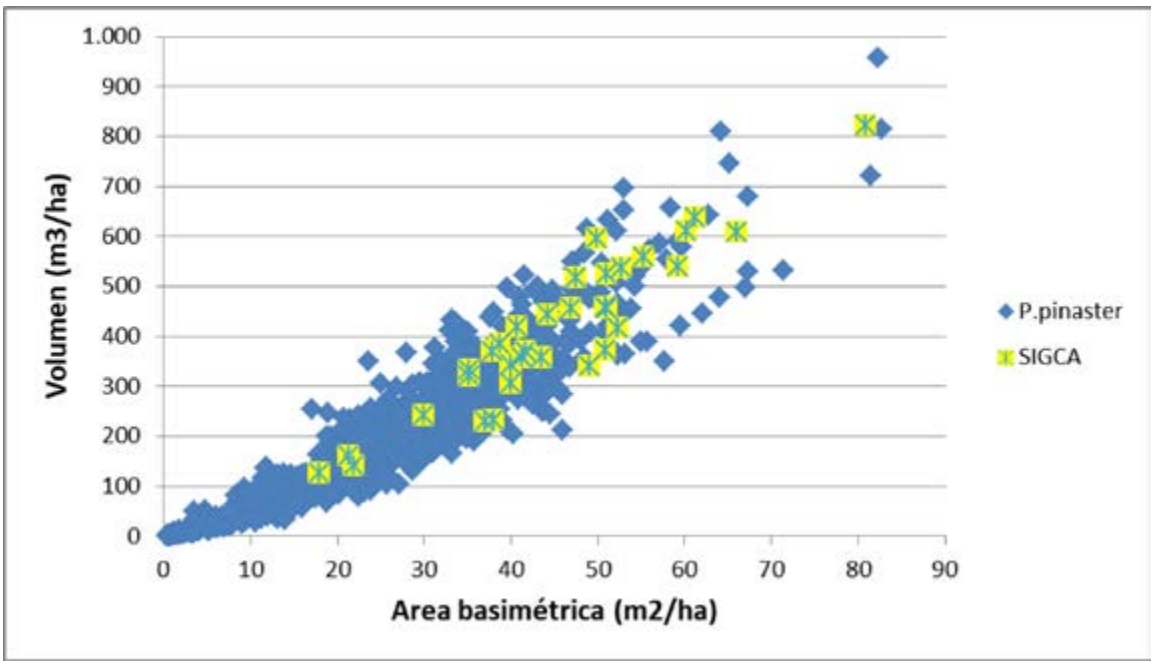
f = Coeficiente mórfico medio de la parcela, f= VCC/(ab*h)

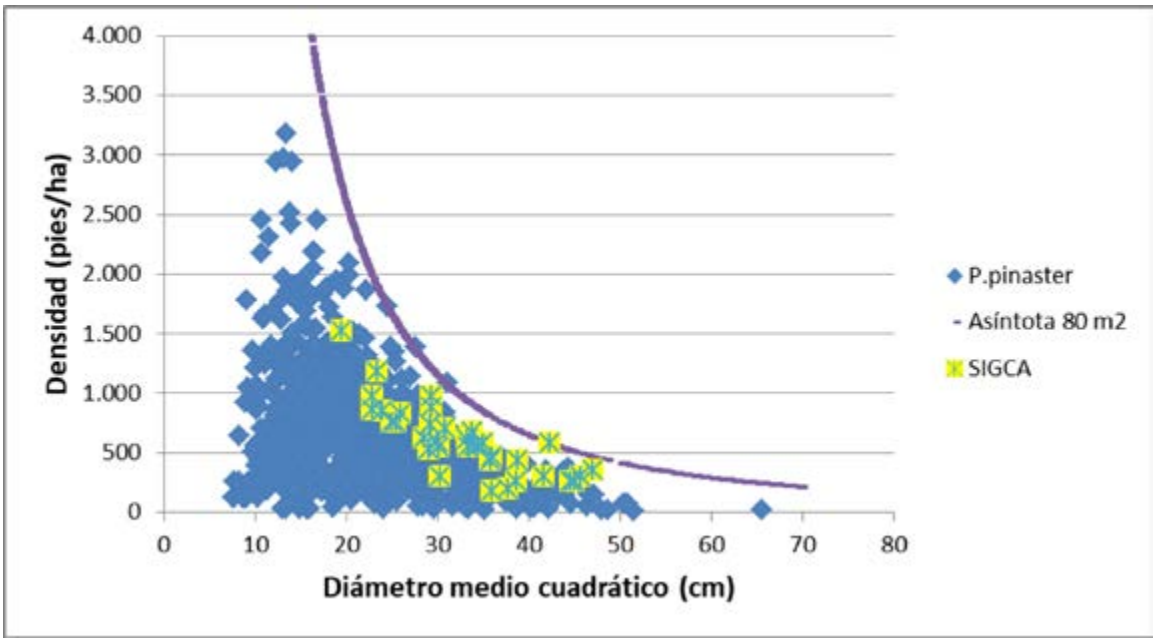
crec = Crecimiento medio anual (m^3/ha/año)

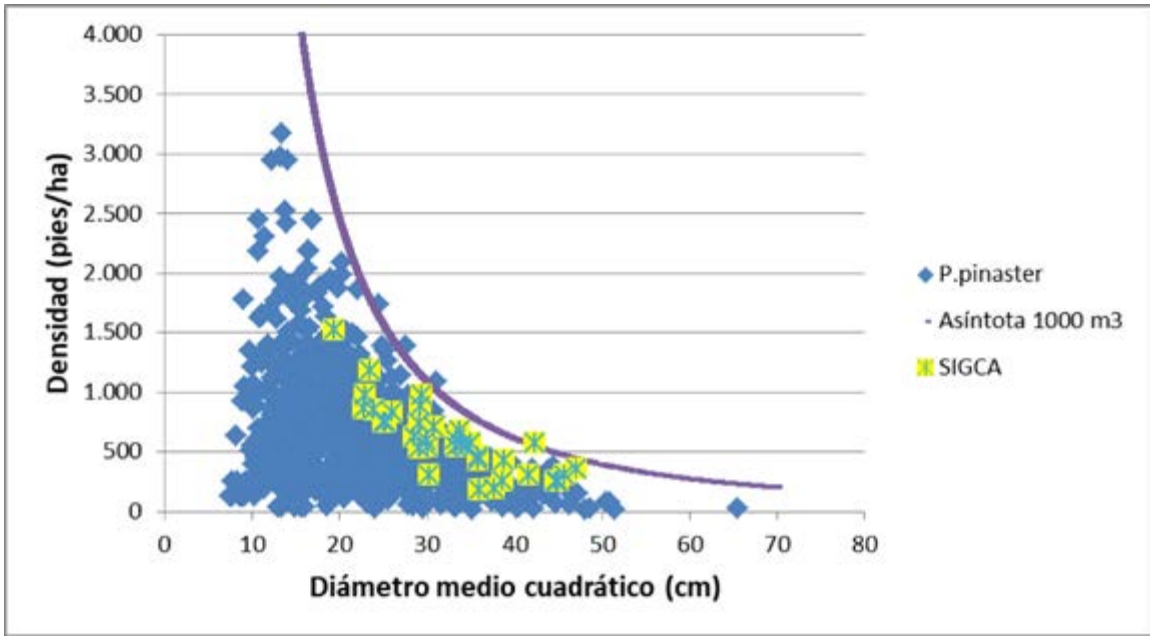
Por tanto, de cara al futuro, se dispone de tres tipologías de parcelas: parcelas taladas que ya han desaparecido, parcelas en las que se han extraído solo los 10 pinos transportados a EXFOPINO y parcelas que han quedado intactas. La medición de diámetro y altura de los pinos que han quedado en pie, además de los escaneados realizados, permitirán en el futuro poder remedir estos pinos y calcular su crecimiento, con y sin intervención selvícola, o tras vendavales u otros tipos de perturbaciones.

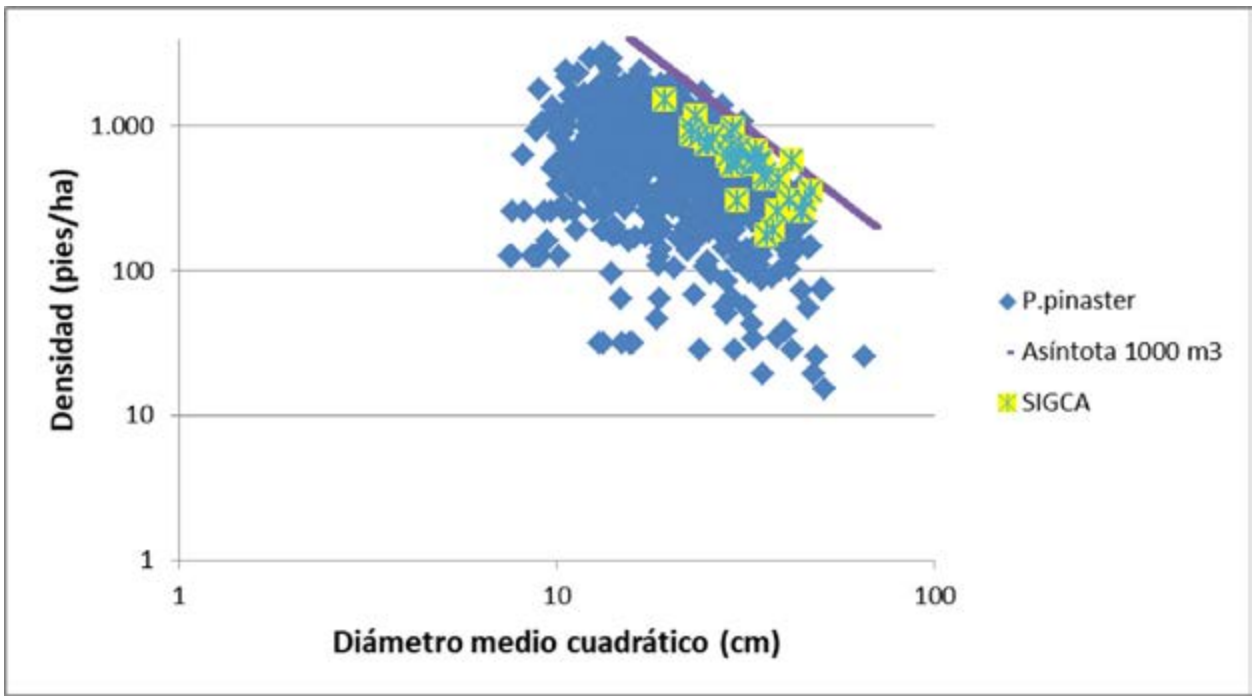
La comparación de los datos dasométricos de las parcelas SiGCa-PIMA con las parcelas levantadas en masas de *P. pinaster* en el IFNN muestra que se siguen manteniendo las asíntotas de 80 m^2/ha en el área basimétrica y de 1.000 m^3/ha en las existencias maderables.

3 Rodríguez Soalleiro, R.J.; Alvarez González, J.G.; Vega Alonso, G.; Toval Hernández, G. y Ruiz Zorrilla, P. Revisión de las curvas de calidad de estación de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Congreso Forestal Español - Lourizán 1.993. Ponencias y comunicaciones. Tomo II.


Volumen (m3/ha)
1.000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Area basimétrica (m2/ha)
P.pinaster
SIGCA


Densidad (pies/ha)
4.000
3.500
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Diámetro medio cuadrático (cm)
P.pinaster
Asíntota 80 m2
SIGCA

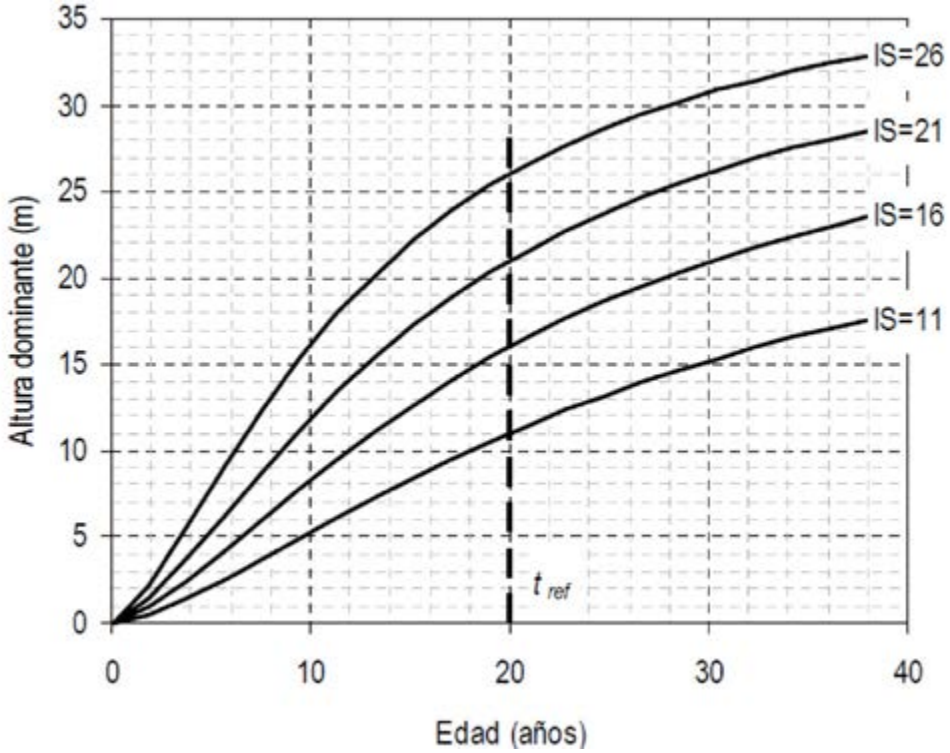

Densidad (pies/ha)
4.000
3.500
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Diámetro medio cuadrático (cm)
P.pinaster
Asíntota 1000 m3
SIGCA



5.- Pautas para la selvicultura a seguir

Ambos inventarios recientes, tanto el realizado en el marco del proyecto SiGCa-PIMA como el IFNN, permiten conocer las clases de calidad y las pautas de gestión que actualmente se están siguiendo en los pinares cantábricos. Una forma sencilla de estimar la calidad de una masa regular es clasificarla según clases de calidad, basadas en la edad y la altura dominante de una parcela o rodal.

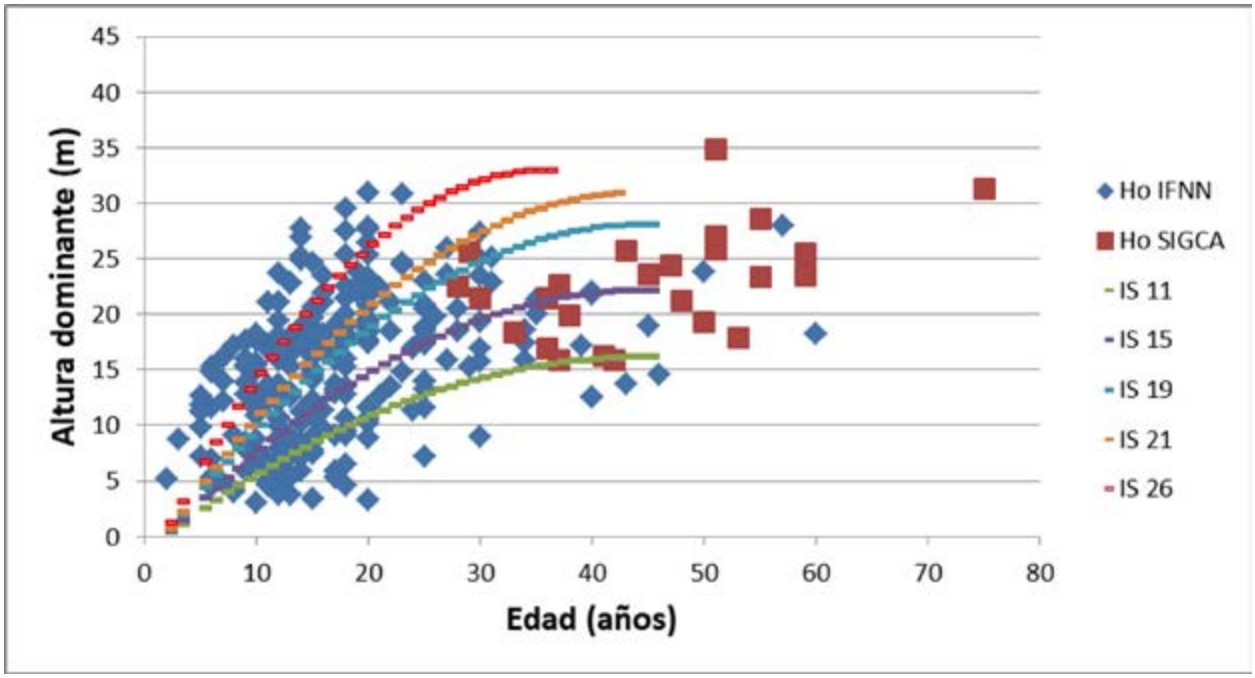
Las citadas tablas gallegas permiten estimar la clase de calidad (IS) de las masas coetáneas de pino marítimo, tanto para la costa gallega como para el interior[4]. Las curvas que se siguen para la zona costera son:



4 Tablas y curvas de calidad definidas desde 1993 e incluidas en la obra *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible* en Galicia. Xunta de Galicia, 2009

La clase de calidad se basa en el IS o Índice de Sitio, que estima la altura dominante en m alcanzada a una edad concreta, normalmente en torno a 2/3 del turno teórico: 20 años en el caso del pino marítimo.

En una tercera parte del conjunto de parcelas del proyecto SiGCa-PIMA y del IFNN se cuenta con el dato de edad de esas parcelas, obtenido mediante conteo de anillos o recogiendo observaciones de propietarios y gestores. Según esos datos, las edades y clases de calidad más frecuentes son las extremas: la peor (11) y la máxima estimada (26). Las parcelas ubicadas en pinares más jóvenes tienen tendencia a concentrarse en las mejores calidades y las masas más viejas en las peores calidades, aunque puede haber errores en la estimación de esas edades.



Número de parcelas según Clase de calidad (IS) y edad (años)							
Clase de calidad	**1-10**	**11-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**51-60**	**Total parcelas**
11	3	43	8	4	2		60
13	4	9	6	2	1		22
15	1	8	8	4		1	22
17	3	9	8	1	1		22
19	1	21	4	1			27
21	7	34	5				46
26	29	43	1			1	74
Total parcelas	**48**	**167**	**40**	**12**	**4**	**2**	**273**

Área basimétrica media (m^2/ha) según Clase de calidad (IS) y edad (años)							
Clase de calidad	**1-10**	**11-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**51-60**	**Media**
11	20,42	6,69	15,60	38,18	11,82		12,03
13	6,34	13,28	23,86				14,98
15		21,71	30,04	42,17			27,42
17	10,43	22,78	27,63				23,38
19		24,95	34,60				25,56
21	10,83	23,36	31,54				22,30
26	12,88	27,74					22,36
Media (m^2/ha)	**12,68**	**19,54**	**26,08**	**35,84**	**19,21**	**32,75**	**19,92**

Diam. medio cuadrático (cm) según Clase de calidad (IS) y edad (años)							
Clase de calidad	**1-10**	**11-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**51-60**	**Media**
11	17,37	13,03	21,17	23,45	34,05		16,05
13	10,88	16,83	21,31				18,79
15	10,39	16,99	24,19	22,79			22,03
17	13,58	20,33	30,29				23,86
19		21,69	28,00				22,41
21	13,01	22,78	29,56				22,00
26	15,96	23,05					20,51
Media (cm)	**15,09**	**19,38**	**25,39**	**25,27**	**33,93**	**41,04**	**20,04**

Altura dominante media (m) según Clase de calidad (IS) y edad (años)							
Clase de calidad	**1-10**	**11-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**51-60**	**Media**
11	3,72	6,90	11,97	14,51	14,17		8,17
13	6,17	9,77	14,90				11,68
15	4,42	12,39	18,14	21,29			16,01
17	8,35	15,23	20,46				16,93
19		16,84	23,20				17,66
21	10,77	18,14	24,97				17,76
26	13,93	22,00					19,04
Media (m)	**11,46**	**15,19**	**18,56**	**18,94**	**17,77**	**23,12**	**15,29**

Volumen medio (m3/ha) según Clase de calidad (IS) y edad (años)							
Clase de calidad	**1-10**	**11-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**51-60**	**Media**
11	2,38	24,50	69,09	225,17	69,68		44,22
13	19,44	59,62	148,57				101,63
15	5,52	111,52	224,08	369,74			194,66
17	37,78	148,30	240,07				178,66
19		186,13	334,31				219,51
21	51,98	183,90	313,66				177,93
26	87,79	258,34					197,71
Media (m3/ha)	**64,89**	**150,22**	**212,27**	**324,95**	**147,77**	**330,30**	**153,27**

Crec. medio anual (m^3/ha) según Clase de calidad (IS) y edad (años)							
Clase de calidad	**1-10**	**11-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**51-60**	**Media**
11	0,29	1,63	2,67	6,01	1,56		1,99
13	2,01	4,03	5,78				4,51
15	0,92	7,04	8,73	9,82			7,65
17	4,15	8,37	9,07				7,96
19		10,37	12,73				10,77
21	5,36	11,38	12,90				10,63
26	10,40	16,43					14,02
Media (m3/ha/año)	**7,47**	**9,23**	**8,31**	**9,23**	**3,14**	**5,75**	**8,68**

Diagramas de Manejo de Densidad e Índice de Hart-Becking[5]

Como se ha comentado antes, el índice de Reineke (SDI=*Stand density index*) es una de las bases para la elaboración de Diagramas de Manejo de Densidad de Masa (*Stand density management diagrams*). Estos DMD constituyen una interesante herramienta para la planificación de tratamientos selvícolas que garanticen una ocupación óptima del espacio o la máxima espesura, en función de los objetivos de producción propuestos.

La utilidad de los DMD radica en la manifestación gráfica, de forma rápida y sencilla de la evolución de la masa forestal y, con ello, la comparación entre las diferentes alternativas selvícolas, según el fin principal que se asigne a ese rodal, lo que lo convierte en un método efectivo para representar gráficamente la densidad de las masas forestales.

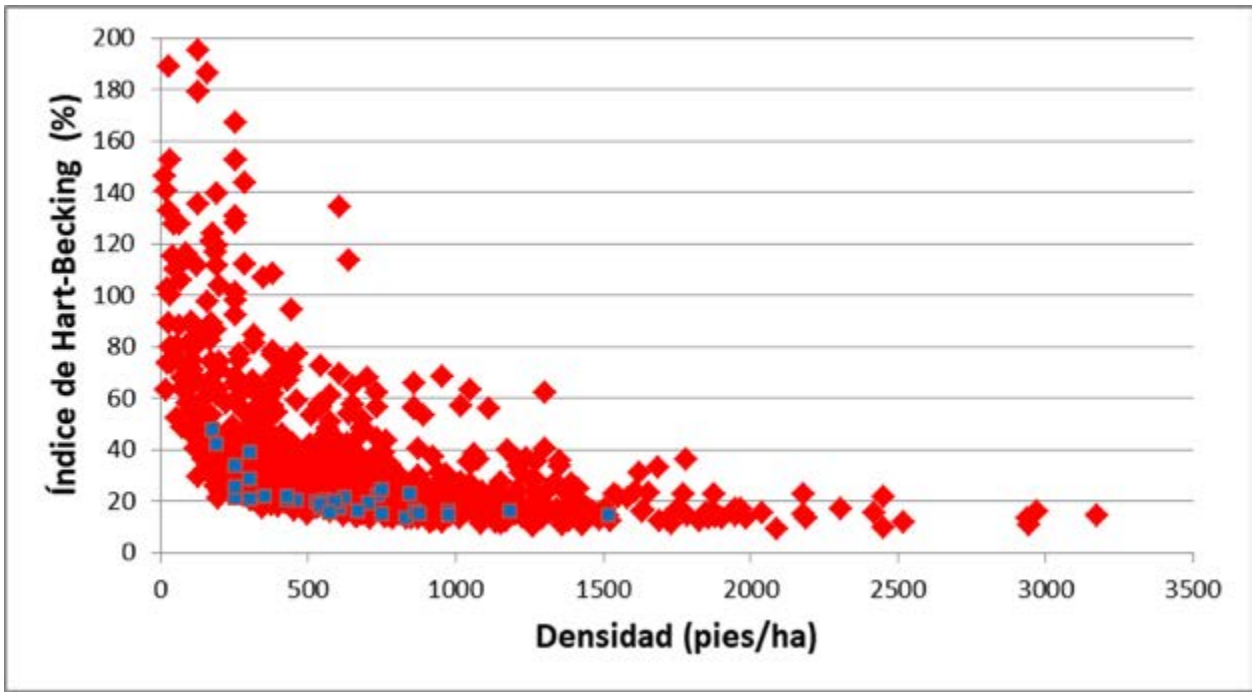
Estructuralmente, un DMD se representa en una gráfica bidimensional con relaciones cuantitativas superpuestas: la altura dominante en el eje de las abscisas (x) y la densidad en el eje de ordenadas (y). Un sistema de dos ecuaciones permiten incluir curvas del diámetro medio cuadrático (dg) y del volumen (V), además de un índice de espesura que puede ser el Índice de Reineke (SDI) o el Índice de Hart-Becking (IH). Ambos índices suelen ser utilizados para caracterizar la densidad de un rodal, porque son independientes de la calidad de sitio y de la edad y porque incluyen la altura dominante para definir las dimensiones del arbolado y los esquemas de intervención selvícola desde un punto de vista biológico.

Este índice de Hart-Becking fue propuesto por Hart (1928) para plantaciones, más tarde por Becking (1954) como índice de espaciamiento y finalmente Beekhuis (1966) lo nombró índice de espaciamiento relativo. El IH es por tanto el parámetro principal de los DMD y se define como la relación entre el espaciamiento medio del arbolado y su altura dominante (ho), expresado en porcentaje; la distancia media entre árboles depende de la distribución teórica de estos en el terreno según la fórmula:

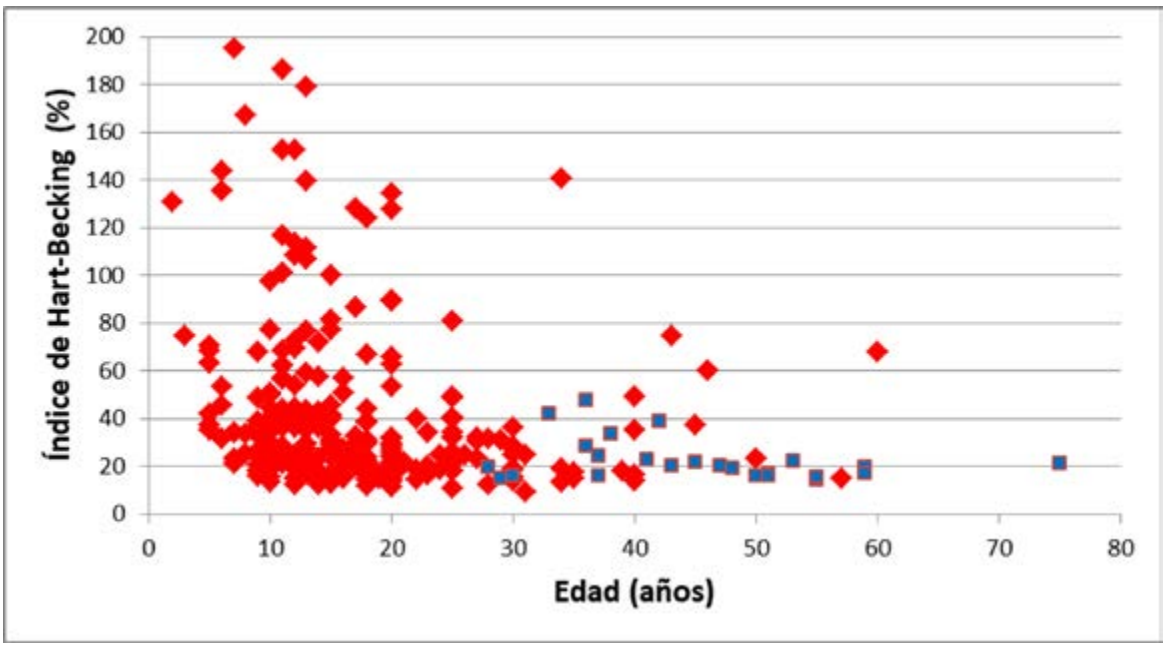
$$IH = K * 10000/\sqrt{n} / ho * 100$$

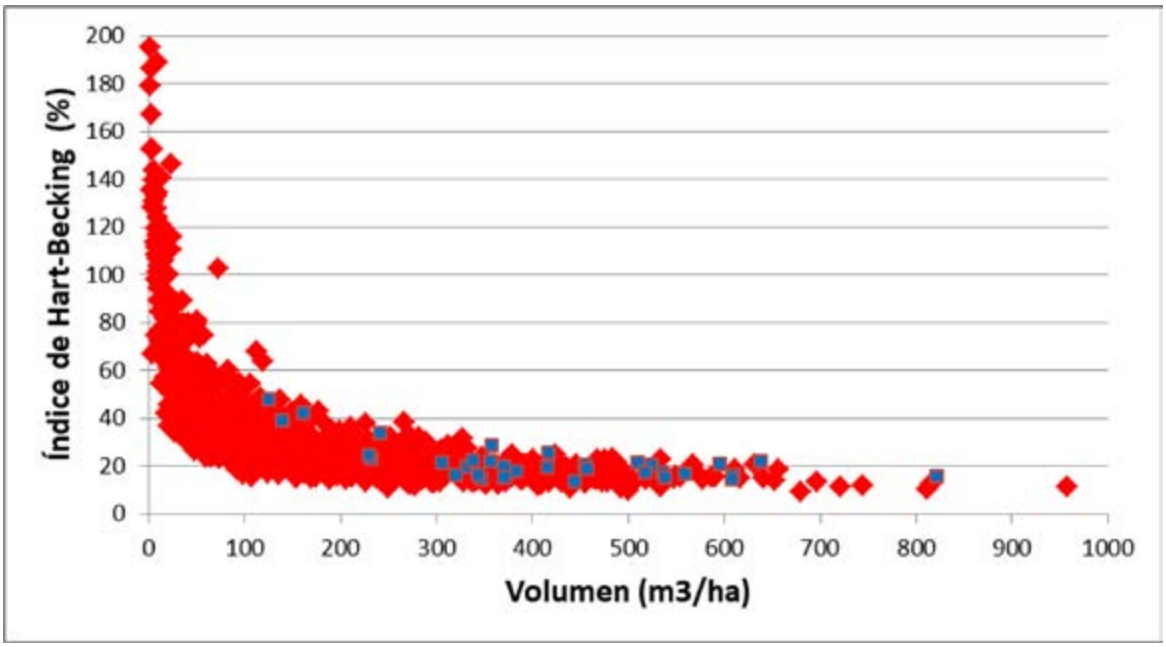
Donde: IH = Índice de Hart-Becking expresado en tanto por ciento (%), K = constante (4/3)^0,25 si se trata de una distribución natural o al tresbolillo de los pies; si la distribución de los árboles sigue una malla cuadrada (plantaciones forestales densas) entonces esa constante sería 1, n = densidad de árboles por hectárea (pies/ha), ho = altura dominante de la parcela o rodal (m)

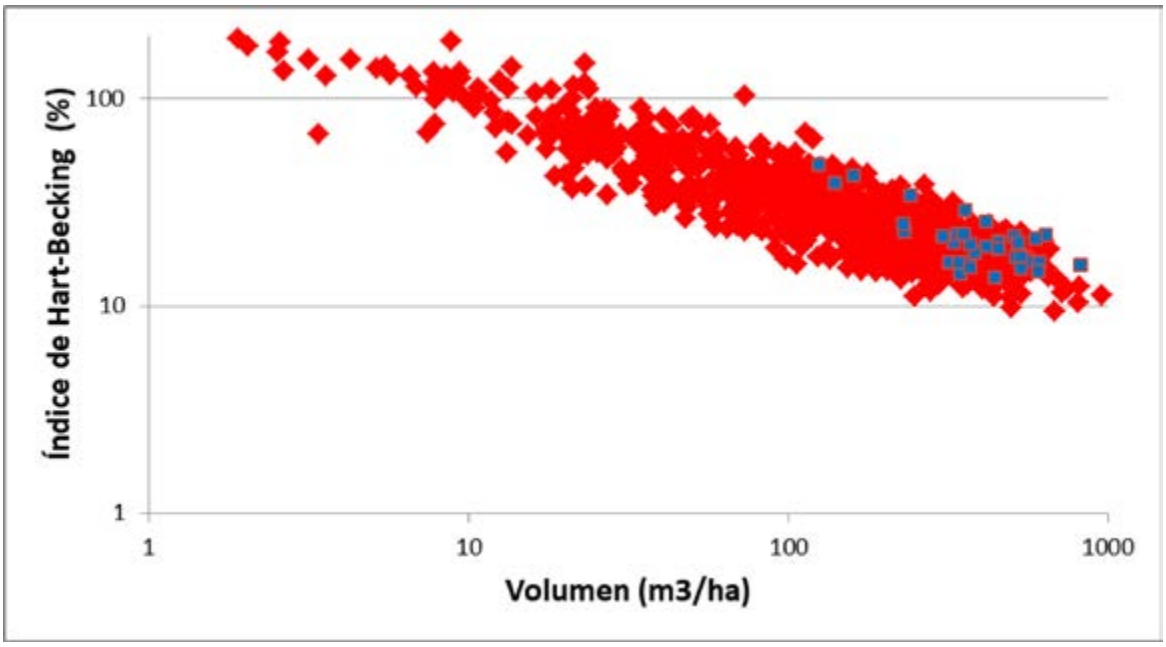
Las parcelas IFNN (**color rojo**) y del proyecto SiGCa-PIMA (**color azul**) presentan la siguiente relación gráfica entre ambos índices de espesura que dependen de la densidad: el índice de Reineke (SDI=*Stand density index*) depende también del diámetro medio y el índice de Hart-Becking depende también de la altura dominante. Ambos índices van descendiendo con la edad en plantaciones coetáneas, conforme un arbolado disminuye en densidad, aumenta sus dimensiones medias y, además, las intervenciones selvícolas aceleran esos procesos.



5 https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/download/262/944/

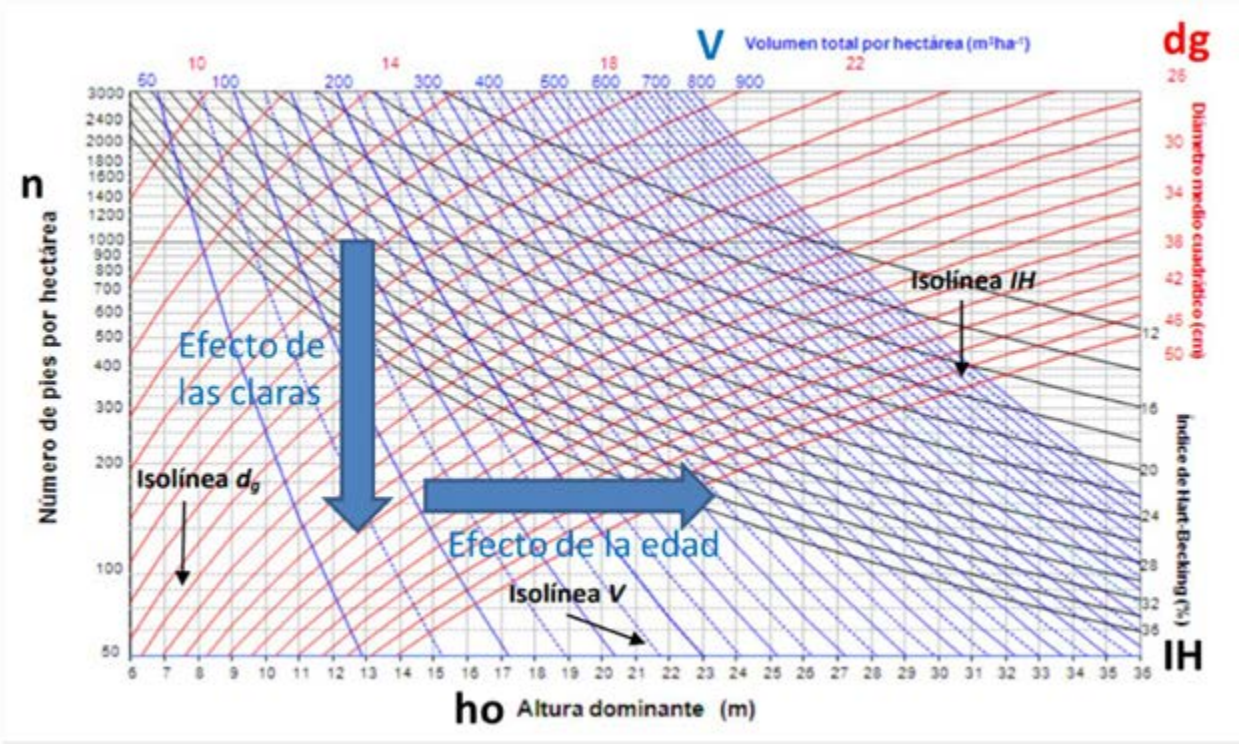

Índice de Hart-Becking (%)
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Edad (años)


Índice de Hart-Becking (%)
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Volumen (m3/ha)


Índice de Hart-Becking (%)
100
10
1
1
10
100
1000
Volumen (m3/ha)

En los DMD se representan, por tanto, la altura dominante de una parcela o rodal en el eje x y su densidad en el eje y. Se suelen incluir además las isolíneas del volumen por hectárea, del diámetro medio cuadrático y del índice de Hart-Becking.

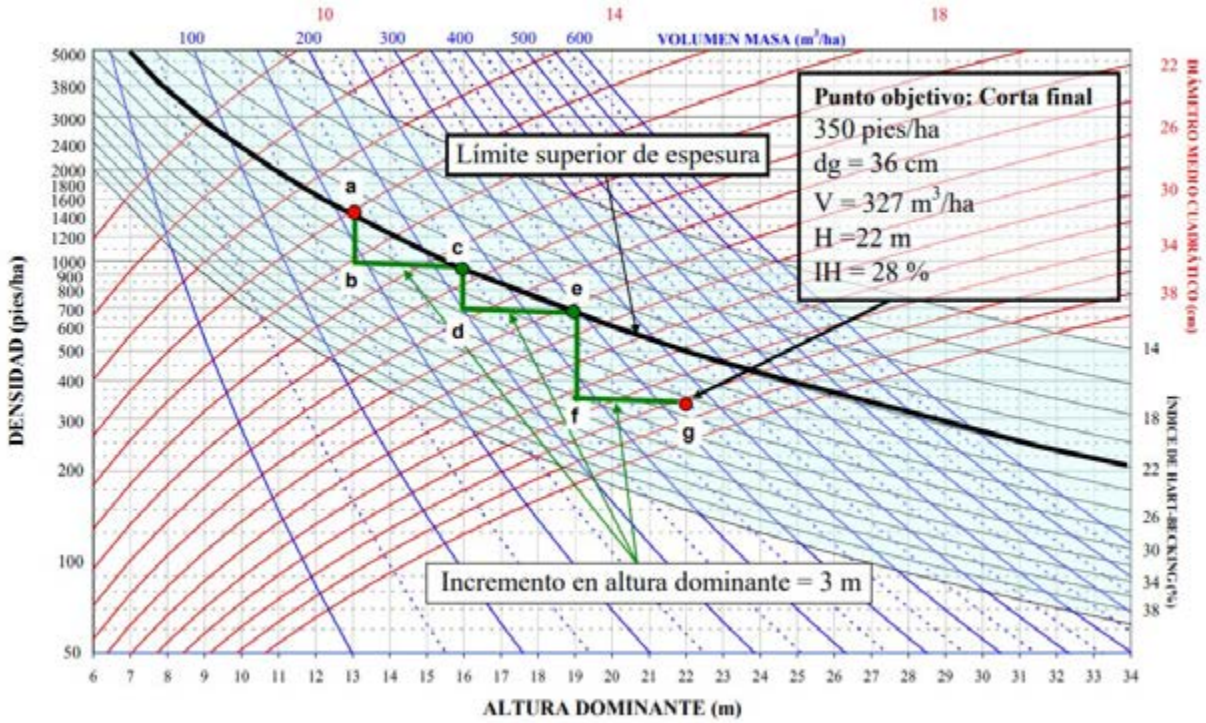
Intervenciones selvícolas como las claras hacen descender puntualmente la densidad de un rodal y parámetros como el volumen, mientras que con la edad van aumentando progresivamente la altura dominante o el diámetro medio cuadrático. Hay casos particulares: en una clara por lo alto la altura dominante puede variar y el diámetro medio cuadrático, por el contrario, no varía en caso de ser claras sistemáticas. En claras periódicas por lo bajo, la situación selvícola de un rodal va avanzando en diagonal en forma de escalones, hacia abajo y hacia la derecha, escalones que dependen de la frecuencia e intensidad de esas claras y que van reflejando los cambios en los índices de Reineke (SDI) o de Hart-Becking (IH). Cada especie suele contar con unos valores de referencia de esos índices para aconsejar dicha frecuencia e intensidad de las claras.



Ejemplo de itinerario selvícola[6] empleando el Diagrama de Manejo de la Densidad para *Pinus pinaster* en la zona costera de Galicia propuesto por Barrio *et al*. (2004)[7], con el objetivo de maximizar el aprovechamiento maderero de los recursos de un rodal. Sobre dicho diagrama se representa una secuencia de claras para un régimen de manejo hipotético para producir madera de sierra:

6 Barrio-Anta M. y Alvarez González J.G. (2005). Diagramas de manejo de la densidad: una herramienta para la evaluación de regímenes selvícolas. IV Congreso Forestal Español. Zaragoza (España), 26-30/09/2005

7 Barrio-Anta M., Ruiz A.D. y Alvarez González J.G. (2004). *Ecoregional-based stand density management diagrams for Pinus pinaster in Galicia: their use in developing thinning schedules*. IUFRO International Meeting "The Economics and Management of high productivity plantations".Lugo, 27-30 September 2004



En el trabajo "Repoblaciones y gestión de masas artificiales", de Álvaro Hernández Jiménez[8] se resumen diversos valores de SDI y de IH aplicables a *Pinus pinaster*:

SDI (o IDR): la densidad biológica máxima (SDImax) corresponderá a la recta que teniendo como pendiente -1,605 pase por el punto (N,Dg) de mayor espesura. En las masas de coníferas la espesura óptima se sitúa entre el 35% y el 60% de SDImax. La bibliografía menciona valores de SDImax entre 1.500 y 1.900 para *Pinus pinaster* (Castilla y León) y entre 900 y 1.300 para *Pinus pinaster* (zona mediterránea).

Si Espesura (SDI) >60% SDImax: fuerte competencia, mortalidad
Si Espesura <35% SDImax: desaprovechamiento de recursos-liberación de espacio vegetativo

IH (o S%): índice proporcional al espaciamiento, e inversamente proporcional a la espesura: a mayor IH menor espesura.

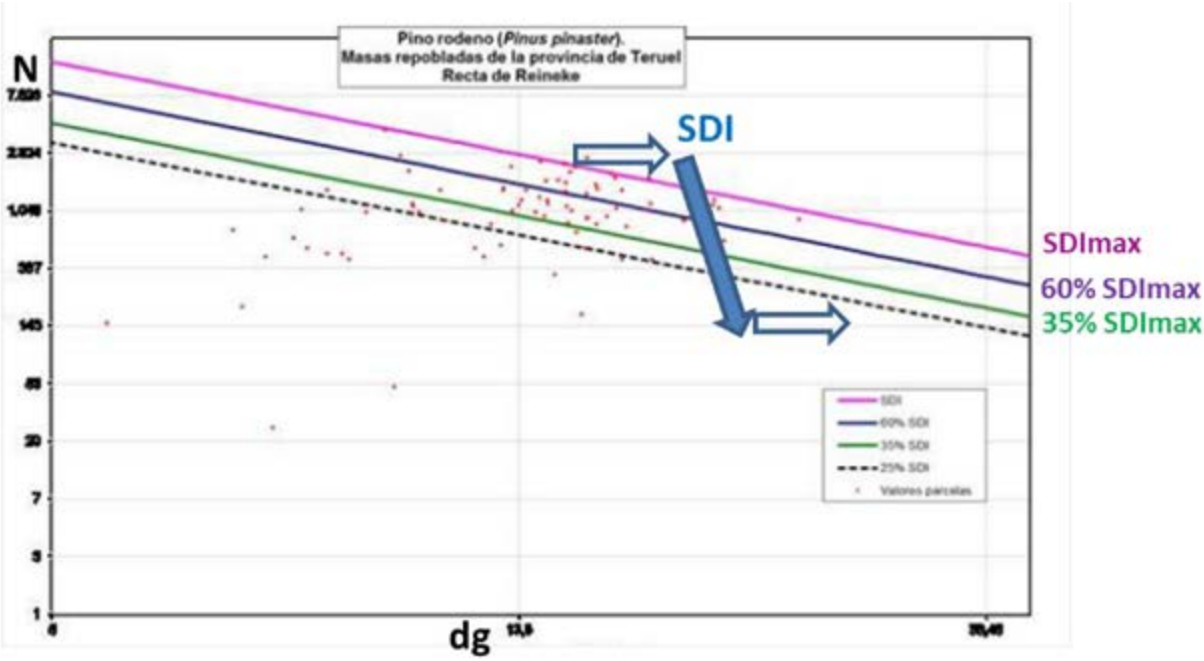
Se aconsejan valores de IH entre 20 y 25% para *Pinus pinaster* (Norte) y entre 25 y 35% para *Pinus pinaster* (continental), siendo:

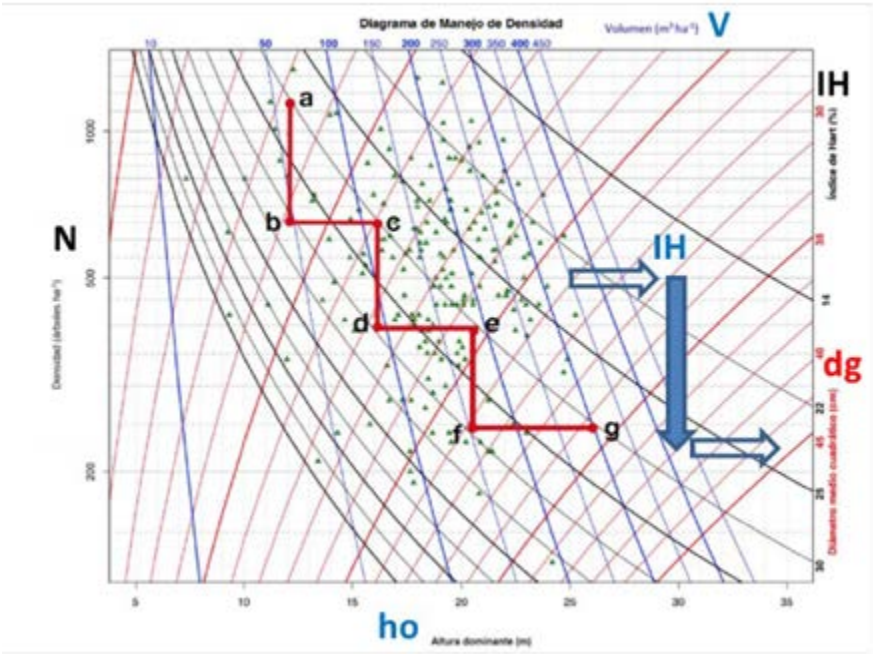
IH < 15%: Espesura trabada con alto grado de inestabilidad individual de los pies
15% < IH < 20%: Espesuras completas a trabadas (masas sin tratamientos de mejora)
20 < IH < 25%: Espesura completa que permiten la ejecución de claras
25% < IH: Espesura incompleta

Por tanto, las intervenciones selvícolas (o las perturbaciones en general) en un arbolado disminuyen su índice de Reineke (SDI) y aumentan su índice de Hart-Becking (IH).

8 https://eps.unizar.es/sites/eps.unizar.es/files/users/ccano/presentaciones/gestion-forestal/repoblaciones_y_gestion_de_masas_artificiales_eps_2016.pdf

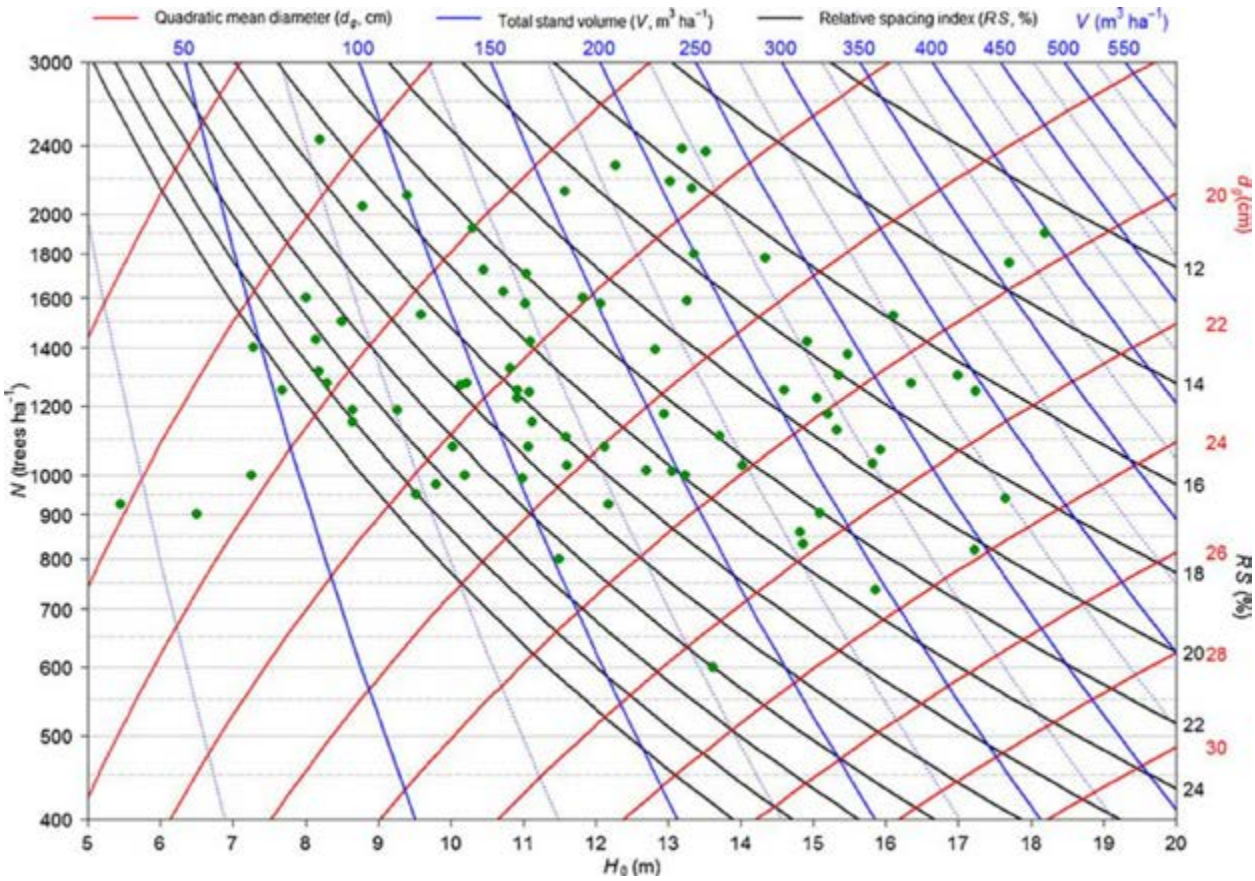
Plantaciones de Pinus pinaster de espesura trabada (izda.) y con clara reciente (dcha.).





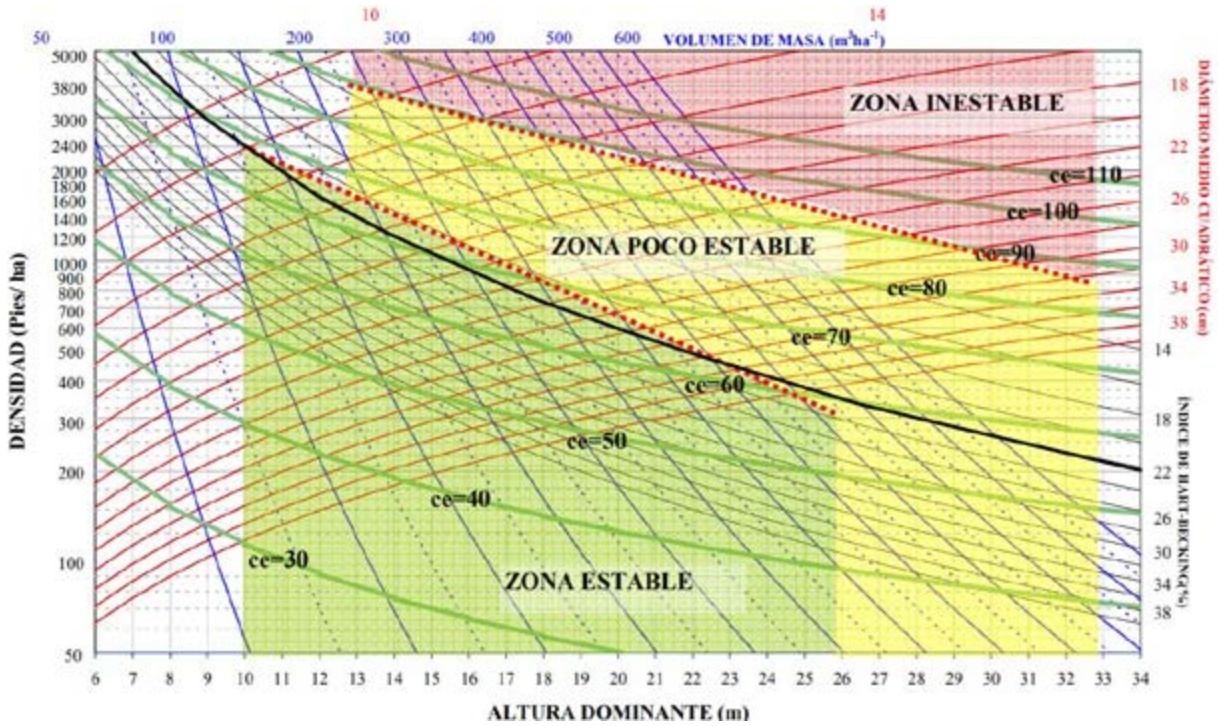
Una clara, como ejemplo de intervención selvícola, hace disminuir el índice de Reineke (SDI) y aumentar el índice de Hart-Becking (IH) de un arbolado.

Ejemplo de DMD para rodales de pino marítimo en el noroeste de España con isolíneas para diámetro medio cuadrático (dg), volumen total (V) e índice de espacio relativo (RS), el cual, lo mismo que el IH, es el cociente de la distancia media entre árboles y la altura dominante. Los puntos en verde identifican las parcelas muestreadas empleadas para el desarrollo del modelo9:



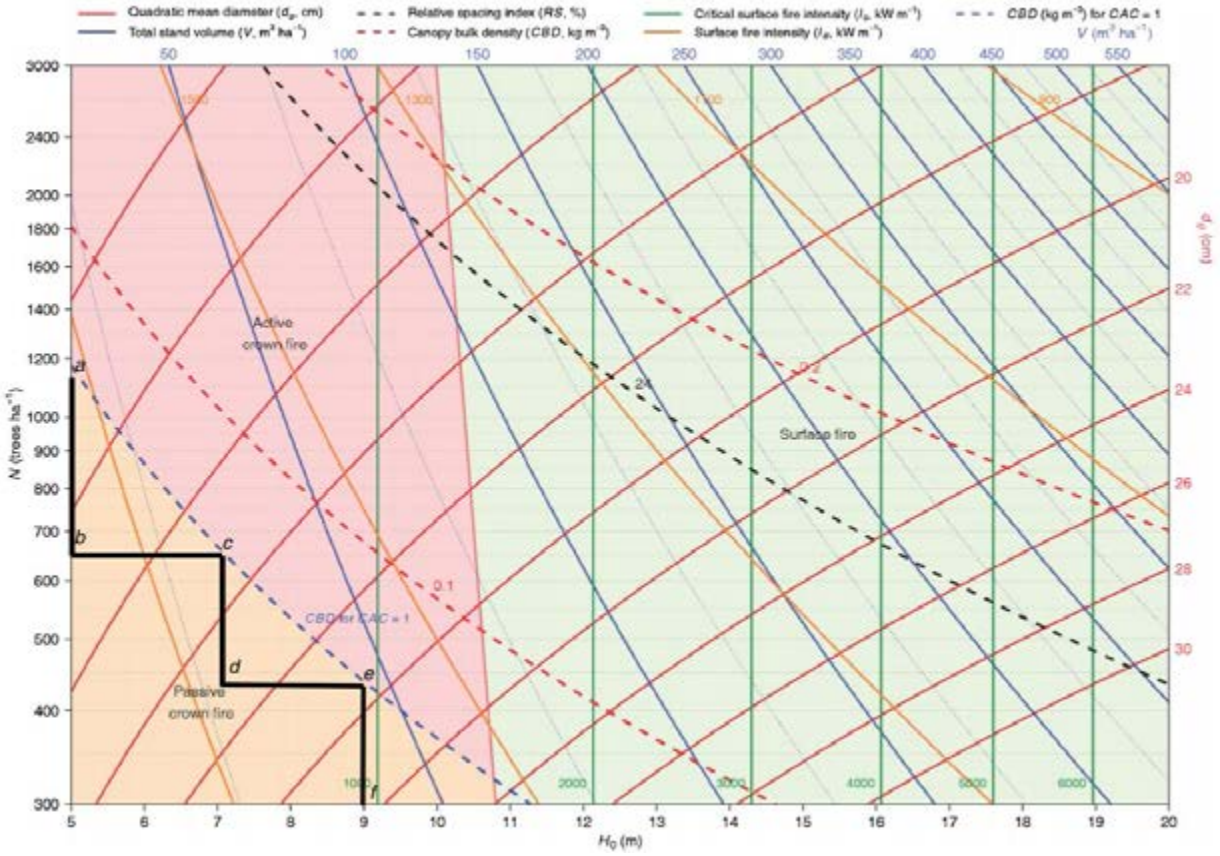
9 Gómez-Vázquez, I., Diéguez-Aranda, U., Álvarez-Álvarez, P., Barrio-Anta, M. y Castedo-Dorado, F. *Using density management diagrams to assess crown fire potential in Pinus pinaster Ait. stands*. Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences, 2014, 71 (4), pp.473 – 484

Ejemplo de DMD disponible para *Pinus pinaster* en Galicia basado en el riesgo de derribo por vendavales[10], incluyendo en este caso la relación o coeficiente de esbeltez (ce) mediante isolíneas verdes. Aplicando el programa ForestGALES a los pinares de Las Landas, los resultados indican una mayor sensibilidad al descuaje a medida que aumenta la altura dominante, sobre todo a partir de los 25 m, lo que explica que los rodales de mayor edad o mejor calidad sean más sensibles a las roturas. El riesgo queda nivelado hacia los 40-45 años, debido a la reducción del crecimiento en altura y mantenimiento del crecimiento diametral:



10 Capítulo *Selvicultura de Pinus pinaster Subesp. Atlantica*, (2007), de Rodríguez Soalleiro y Madrigal. Disponible en: http://webspersoais.usc.es/export9/sites/persoais/persoais/roque.rodriguez/ descargas/Pinus_pinaster_sub__atlantica.pdf

Aunque normalmente los DMD se destinan a buscar la máxima espesura con el fin de producir madera, también se pueden adaptar a otros objetivos. Un ejemplo son los DMD creados para minimizar el riesgo de incendio en esos pinares[11]. En estos diagramas, las estrategias más efectivas para reducir este riesgo incluyen la reducción o manipulación de la carga del combustible superficial, aumentar la altura de la base del dosel de copas (*Canopy Base Height*, CBH) y disminuir la densidad aparente del dosel de copas (*Canopy Bulk Density*, CBD). Estas variables clave en la selvicultura preventiva dependen, en gran medida, de la densidad del arbolado, por lo que se pueden modificar mediante la gestión selvícola:

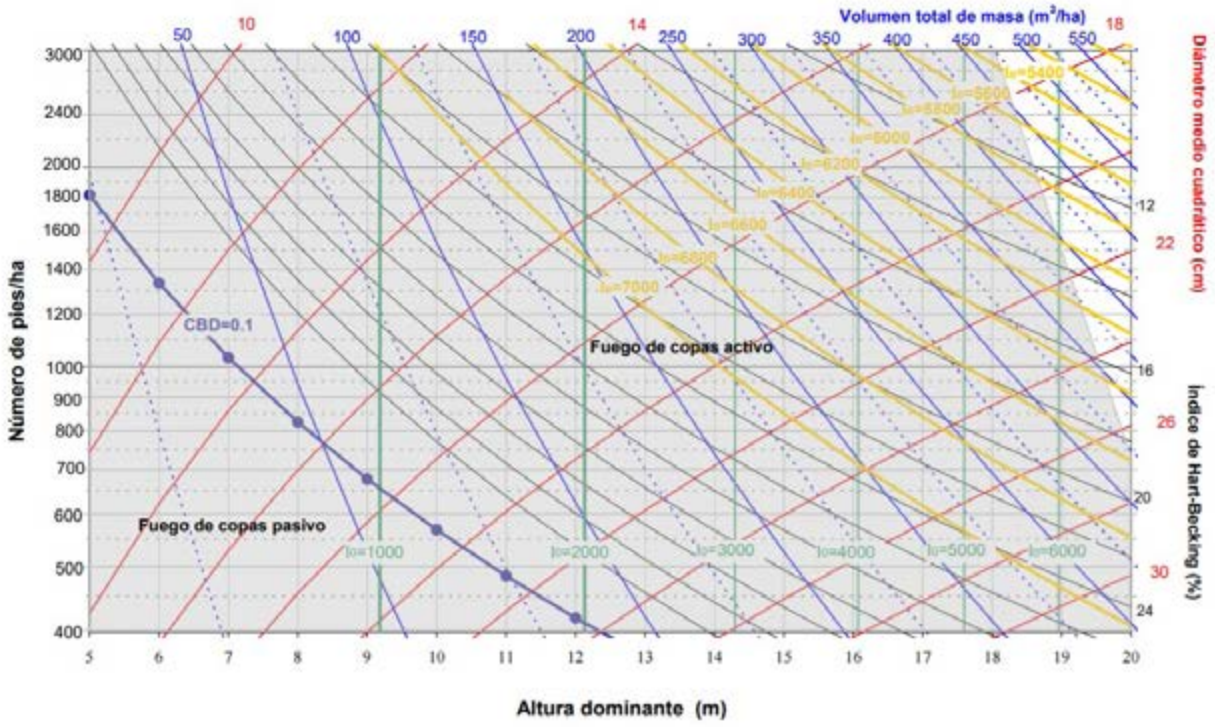


Las claras propuestas buscan mantener el CBD por debajo del valor nominal de 0,1 kg/m³. Aunque en rodales más altos que 10,5 m, el CBD siempre es mayor que ese valor, la elevada altura de la base de las copas CBH dificultaría el inicio de los fuegos de copa. Por lo tanto, sería necesario un fuego superficial muy intenso para alcanzar la intensidad de fuego crítica más alta implicada en los casos de mayores CBH.

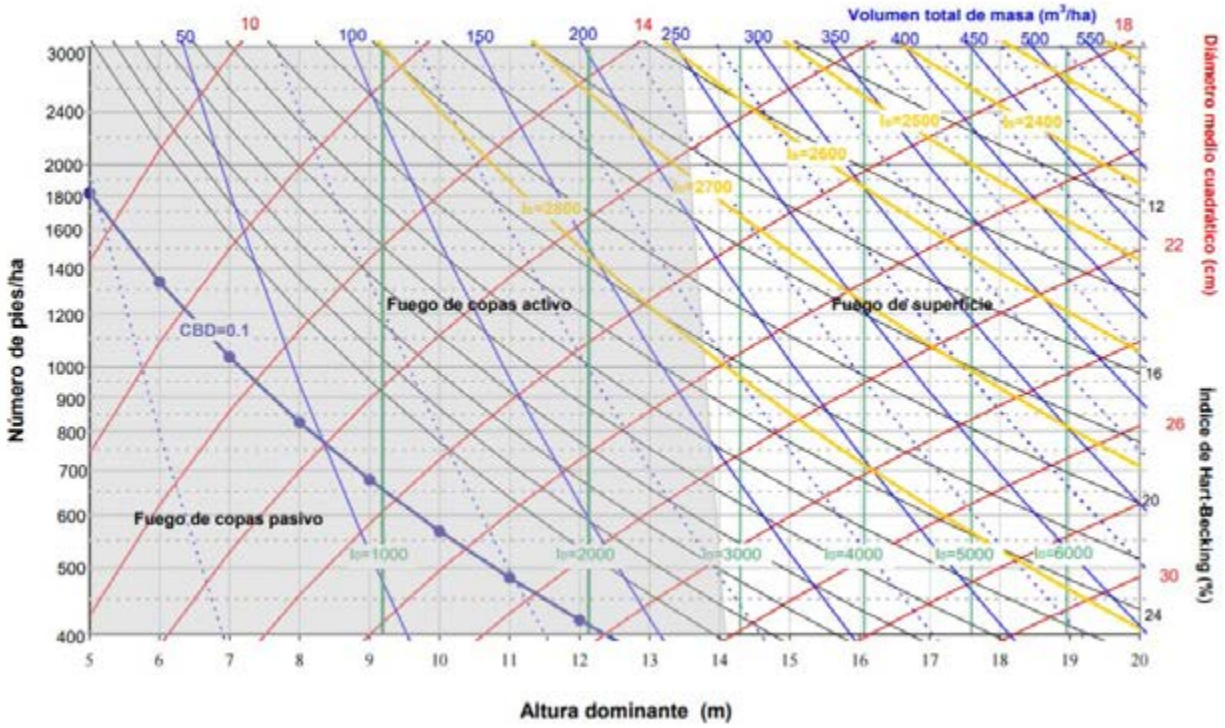
Para la valoración del riesgo de fuego de copas, los autores han representado gráficamente en los DMD isolíneas correspondientes a la intensidad del fuego de superficie (I_B), a la intensidad crítica para la iniciación de fuego de copas (I_0) y a la densidad aparente del dosel de copas (CBD, en kg/m³). Se han construido dos DMD, uno para cada una de las condiciones de carga de combustible fino y de altura de matorral analizadas (condiciones extremas y condiciones medias).

11 Gómez-Vázquez, I., Diéguez-Aranda, U., Álvarez-Álvarez, P., Barrio-Anta, M. y Castedo-Dorado, F. Utilización de diagramas de manejo de la densidad como herramientas para el diseño de esquemas selvícolas que consideren el riesgo de incendio. Comunicación 6CFE01-357 (2013)

1.- DMD incluyendo las isolíneas para I_B (**líneas curvas en amarillo**), I_0 (**líneas verticales en verde**) y CBD, considerando condiciones extremas de carga de combustible y altura de matorral. La zona sombreada se corresponde a la de riesgo de iniciación de fuego de copas:

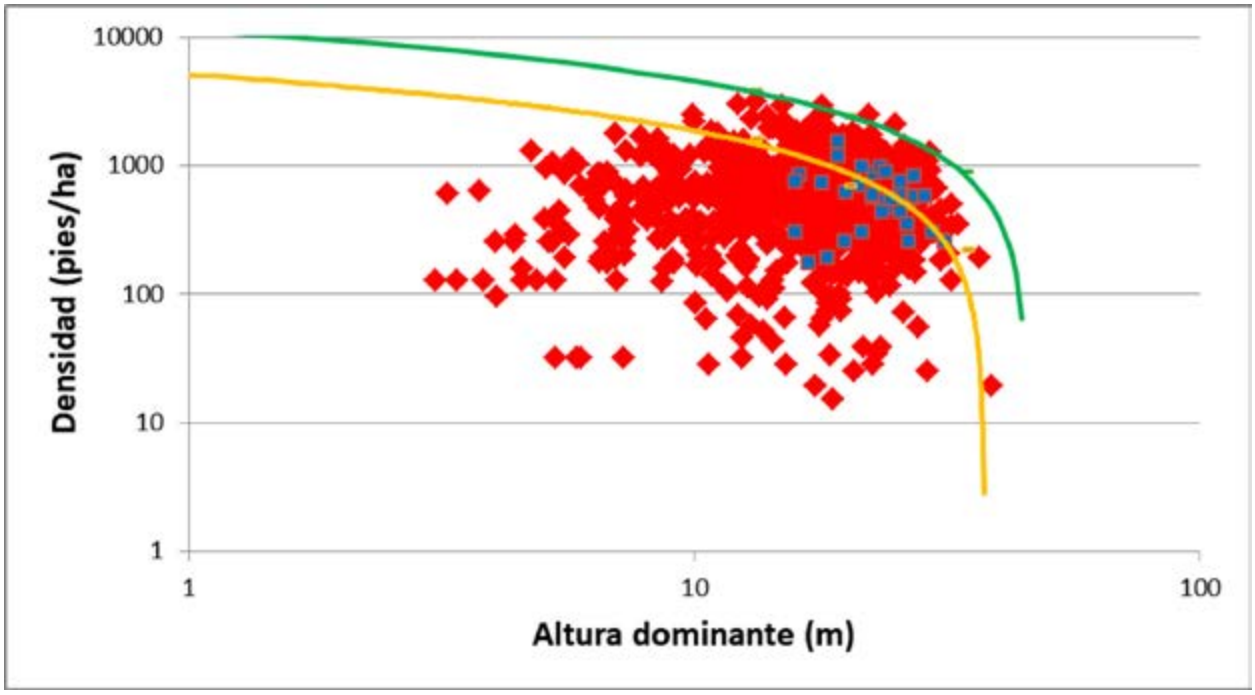


2.- DMD incluyendo las isolíneas para I_B, I_0 y CBD, considerando condiciones medias de carga de combustible y altura de matorral. La zona sombreada se corresponde a la de riesgo de iniciación de fuego de copas:

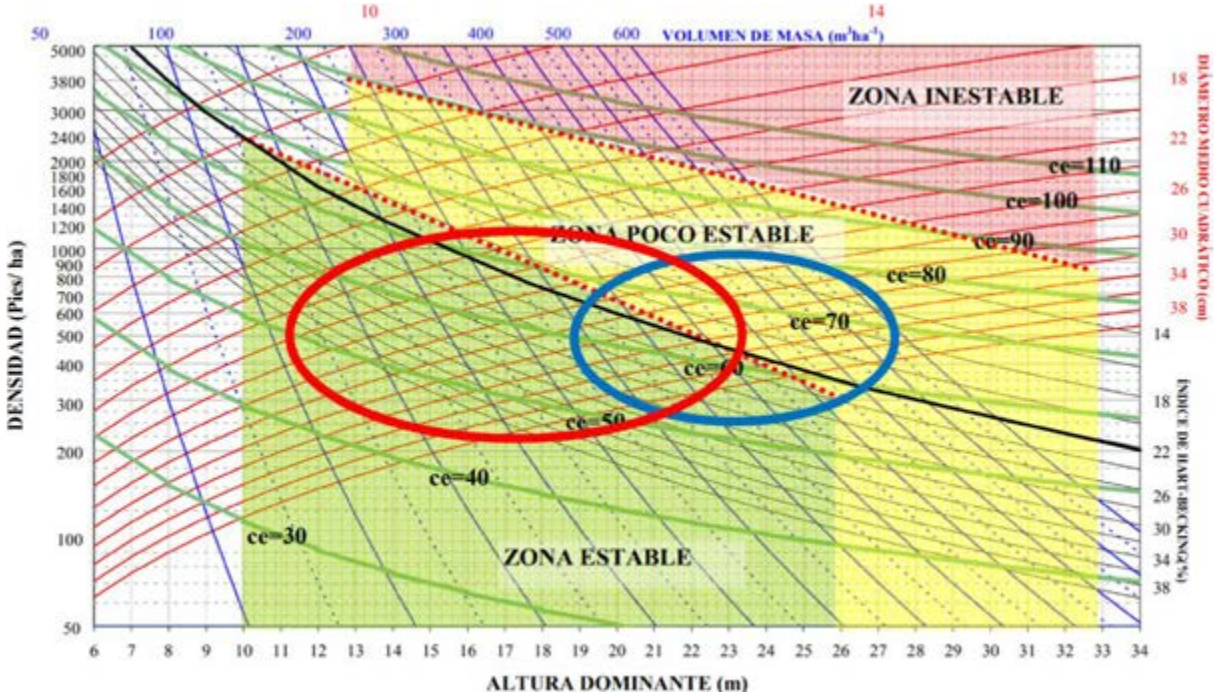


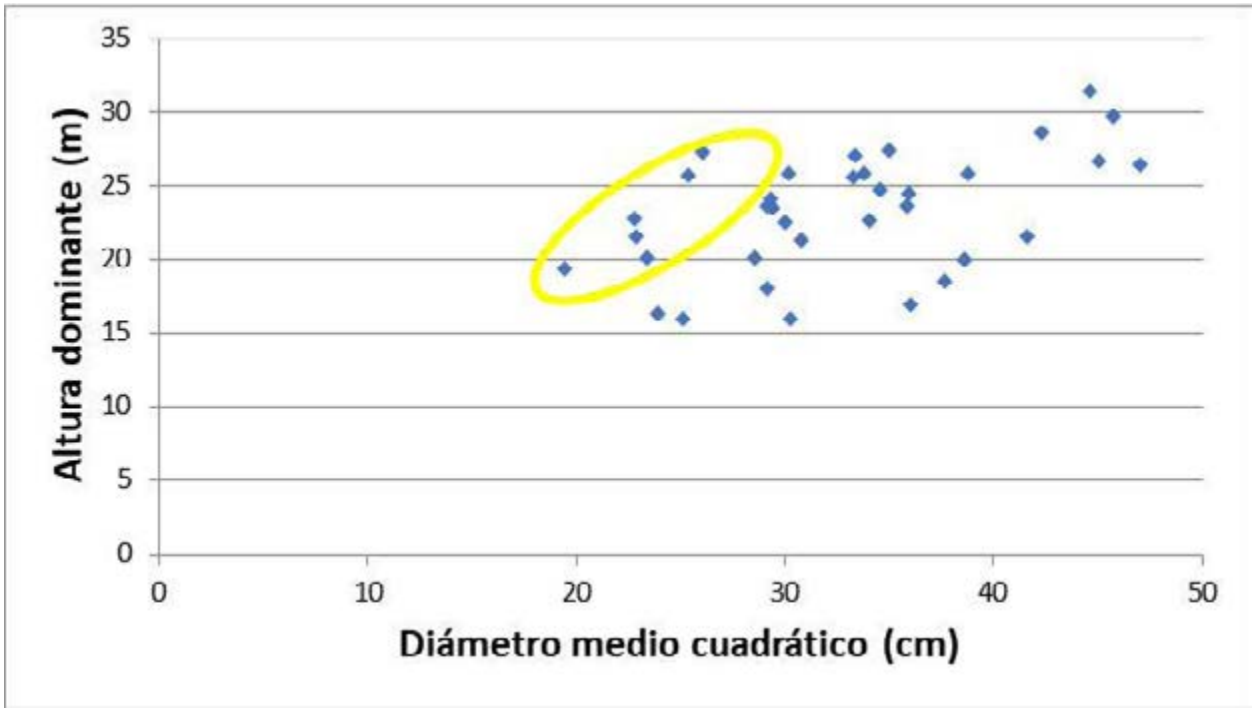
Contexto selvícola de las parcelas analizadas

Las parcelas disponibles de *Pinus pinaster* del IFNN y del proyecto SiGCa-PIMA presentan estos datos dasométricos en escala logarítmica, tal y como se representan sus alturas dominantes y densidades en escala logarítimica en los DMD. Se incluyen también las isolíneas ce=60 (**amarillo**) y ce=90 (**verde**), comprobando que pocas parcelas IFNN (**color rojo**) y del proyecto SiGCa-PIMA (**color azul**) superan el límite de arbolado poco estable.



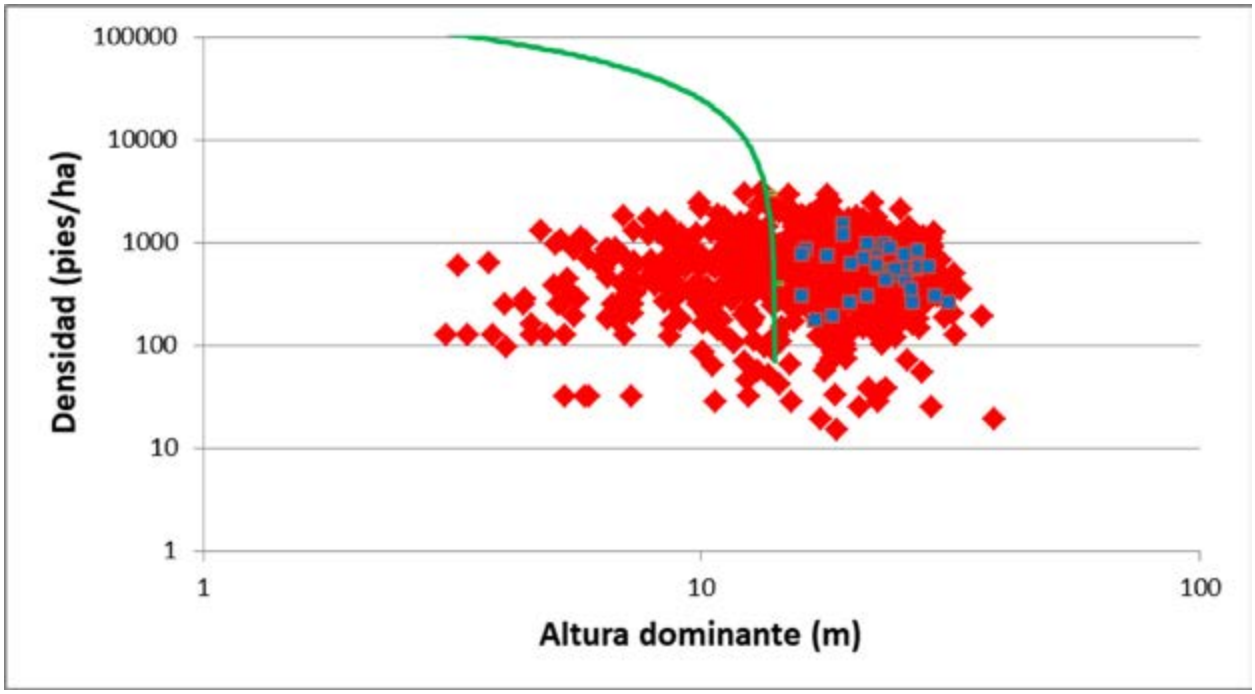
La situación selvícola actual de todas estas parcelas se representa en estos DMD mediante su densidad y altura dominante. Por ejemplo, la mayoría (68%) de las parcelas de *Pinus pinaster* del IFNN (**color rojo**) y del proyecto SiGCa-PIMA (**color azul**) se ubican en el límite entre las zonas de arbolado estable y poco estable del DMD de riesgo de derribo por viento. Parcelas gallegas del proyecto SiGCa-PIMA como las 2, 9, 12, 13 y 33 presentan altas relaciones medias de esbeltez: h/dg superior a 82 y ho/dg superior a 85.

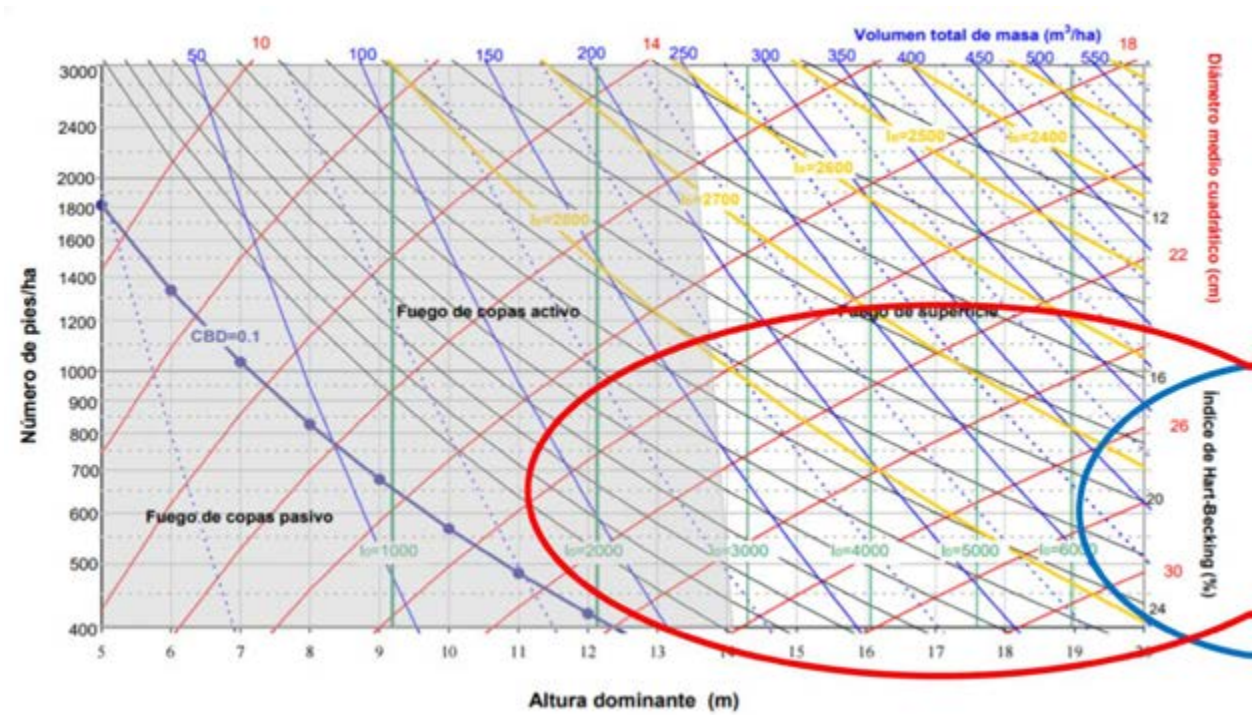


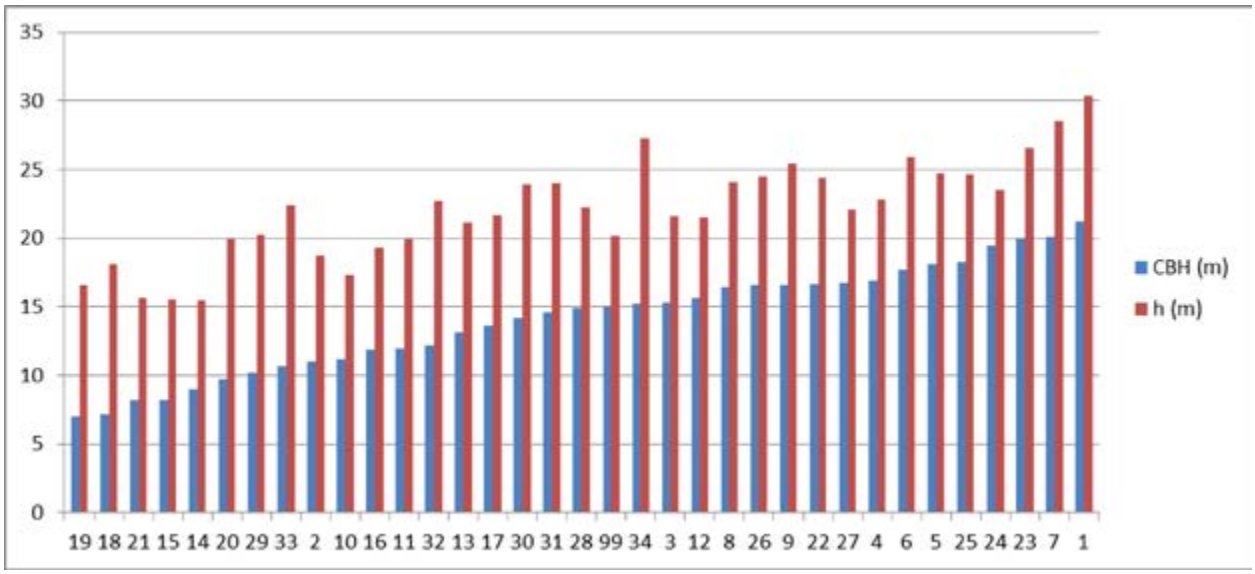


Representación de las parcelas del proyecto SiGCa-PIMA con mayor relación de esbeltez y riesgo de derribo.

Sobre el riesgo de incendio, la altura de la base del dosel de copas (*Canopy Base Height*, CBH) de las 35 parcelas del proyecto SiGCa-PIMA es elevada, entre 7 y 21 m, lo que disminuye el riesgo de sufrir un incendio de copas. En este caso también, la mayoría de las parcelas de *Pinus pinaster* del IFNN (**color rojo**) y del proyecto SiGCa-PIMA (**color azul**) se ubican en la zona teórica de fuegos de superficie, por encima del límite téorico de fuego de copas (isolínea **verde**).







Densidad media (pies/ha) según Clase de calidad (IS) y edad (años)							
Clase de calidad	**1-10**	**11-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**51-60**	**Media**
11	255	518	585	838	130		533
13	648	619	765				676
15	286	1.167	1.032	1.039			1.005
17	843	766	645				696
19		973	674				935
21	817	721	527				715
26	724	770					746
Media (pies/ha)	**705**	**746**	**715**	**986**	**218**	**366**	**734**

Índice de Reineke medio (pies/ha) según Clase de calidad (IS) y edad (años)							
Clase de calidad	**1-10**	**11-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**51-60**	**Media**
11	1.747	1.687	1.308	997	81		1.501
13	2.489	1.345	1.278				1.463
15	1.204	3.217	2.067	1.251			2.205
17	2.655	1.326	893				1.251
19		2.028	798				1.810
21	2.590	1.145	503				1.295
26	1.836	1.198					1.426
SDI medio (pies/ha)	**2.007**	**1.518**	**1.193**	**1.213**	**142**	**248**	**1.511**

Índice de Hart-Becking medio (%) según Clase de calidad (IS) y edad (años)							
Clase de calidad	**1-10**	**11-20**	**21-30**	**31-40**	**41-50**	**51-60**	**Media**
11	97	73	46	60	41		67
13	64	50	43				49
15	96	39	45	38			44
17	51	41	29				36
19		34	28				34
21	40	28	20				29
26	31	23					27
IH medio (%)	**40**	**39**	**36**	**43**	**36**	**45**	**39**

Dedicado a D. Francisco Javier Martínez Millán, gran profesor e ingeniero de montes fallecido en 2019

QUIEN corta la dulce madera
tiene un rostro dulce ante sí
pero aplicará la regla ardiente
y medirá el leño antes de herir
(…)
Pusiste Señor un árbol
hermoso como un rostro en la falda del Aloña
lo miraban un carpintero y un pintor
(…)
No distinguí el árbol en lo que me mostró el carpintero
él me respondió es obra del carpintero
en lo que el pintor
tampoco me recordaba el árbol
me dijo es obra del pintor
aprendí el hondo significado
vi que todos se transformaban
los árboles
según el sitio que tienen destinado en el hombre
porque también el árbol tiene su cuerpo y su alma
y su cuerpo se prolonga en nuestros cuerpos
y en alma en nuestras almas
resucita
la sabiduría del hombre distingue
las almas y los cuerpos que parecían iguales
me puse de regreso y agradecí al Señor
(…)
todo el que fabrica con un árbol
hará otro árbol
y así el carpintero hará un banco nuevo
el pintor el retrato del aire sin los gritos
en la frente rota de la mañana
y ya nadie hará de una cosa la misma cosa
de un árbol el mismo árbol
de un rostro el mismo rostro
Y se alborotaban las gentes que subían
a la santa montaña

Tú que entiendes por niños a todos los hombres
que entendamos por constructores lo mismo
al que fabrica una mesa o limpia de nuestros ojos el aire
al que mide y corta la leña y al que la enciende
ante nuestros ojos murió el árbol y ha resucitado
muy bajo ha caído el hombre y tú le has confundido
(…)
antes tenía una vaca y se decidía
tenía un árbol y veía
ahora tiene todo y no ve nada

Ahora tengo que irme (2003),
escrito por Jorge de Oteiza (1908 - 2003)

Beneficiarios

Colaboradores

El grupo operativo "Sistemas de gestión forestal en bosques productores de madera de calidad" ha recibido para su proyecto de innovación una subvención de **538.000,01 euros**. El importe del proyecto es cofinanciado al 80% por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (**FEADER**) y al 20% por fondos de la Administrción General del Estado (**AGE**), tal como se establece en el Real Decreto 169/2018, de 23 de marzo.

La **Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Política Forestal** (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) es la autoridad de gestión encargada de la aplicación de la ayuda del FEADER y nacional correspondiente.

Comisión Europea: Área de Agricultuta y Desarrollo Rural

FINANCIA: