



**TRABAJO FINAL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**“DISEÑO Y AJUSTE METODOLÓGICO DE UN PROTOCOLO DE TRABAJO EN PARCELAS PARA EL MUESTREO DE RODALES DE 5 y 10 AÑOS DE EDAD EN EL MARCO DE UN INVENTARIO PERMANENTE DE PLANTACIONES DE SALICÁCEAS”.**

**MODALIDAD**

Intervención en cualquier ámbito de la profesión.

**ALUMNO**

Tálamo, Alejandra Vanesa

Legajo: 25176/0

**DIRECTOR**

Ing. Ftal. Achinelli, Fabio Germán.

**TUTOR ACADÉMICO**

Rodríguez, Sabrina A.

**LUGAR Y FECHA DE ENTREGA**

La Plata, 15 de noviembre de 2021.

## RESUMEN

En este trabajo se resumen las actividades realizadas y los resultados obtenidos estadística y gráficamente, cuyo objetivo general fue desarrollar y evaluar un protocolo de relevamiento de datos con parcelas de muestreo (PM) ubicadas en plantaciones de Salicáceas de 5 y 10 años de edad (IA5 e IA10, respectivamente), a fin de ser aplicadas en el corto plazo en las actividades anuales de la Empresa Papel Prensa S.A.I.C.F. y M.

Para ello se realizan las estimaciones de área basal (AB; m<sup>2</sup>/ha) mediante muestreo puntual horizontal o Bitterlich, utilizando prisma y relascópio Haglof con variantes en los factores de AB (FAB) y de altura media dominante (AMD; m) por el método trigonométrico, en PM ubicadas en las plantaciones de sauces (*Salix* spp. L.) y álamos (*Populus* spp. L.). Estas variables permiten estimar el rendimiento de la parcela como peso útil con corteza (PUcc en t/ha; punta fina  $\geq 7,5$  cm) mediante una expresión matemática ajustada para tal fin. Además, se evalúa el instrumento (prisma y relascópio Haglof) y el FAB que combine mejor exactitud, costo y sencillez en el uso para cada clase de edad. El procedimiento de estimación de AB para IA5 con MPH utilizando el relascopio Haglof con un FAB=1 (AB<sub>MPHHg1</sub>) tuvo el mejor desempeño en comparación con las demás posibilidades. Y para IA10, fue el relascopio Haglof con un FAB=2 (AB<sub>MPHHg2</sub>). En cuanto a la estimación de PUcc (t/ha), el modelo de “Variante de la función estándar con factor de forma constante” y el modelo de “Spurr o de Variable combinada”, fueron los que mejor se ajustaron a los valores reales. El error de estimación al utilizar estos modelos es de 7,7%.

## INTRODUCCIÓN

La actividad forestal engloba varios aspectos de importancia a tener en cuenta a la hora de llevar adelante un proyecto a largo plazo. Los ciclos de producción son largos en comparación con los sistemas agropecuarios (por ejemplo, 10 años o más), lo cual limita el cambio de uso de las tierras (por ejemplo, cambio de cultivo o de genotipo), y acarrea elevados costos de implantación y manejo respecto al valor de la producción. Es por ello que el conocimiento y manejo adecuado de los recursos, puede llevar a un incremento en los rendimientos reales de la producción, disminuyendo los costos y maximizando las ganancias.

Tanto a nivel mundial como en Argentina, se ha intensificado el manejo de los bosques, pero sobre todo en plantaciones de especies de rápido crecimiento, dando como resultado un incremento en la superficie de implantación que va de la mano con el aumento del comercio mundial de productos de madera, al punto de convertirse en las principales abastecedoras de materia prima que consume la industria de transformación (Aguerre et. al., 2019).

Esta tendencia condujo a las Empresas y productores forestales a mejorar las prácticas de manejo, como ser, la preparación de sitio, calidad de implantación, control de malezas y plagas, fertilización, podas y raleos. Además de incorporar nuevas tecnologías, como los sistemas de información geográfica (SIG) y nuevos clones mejorados que se emplean en la llamada silvicultura sitio-específica (Pezzutti, 2014).

El sistema de inventarios de plantaciones es un componente indispensable para llevar adelante una buena planificación y gestión, ya que suministra la información necesaria en distintas etapas de la rotación. Por lo general, el muestreo de las plantaciones se realiza en forma continua, desde parcelas en rodales recién implantados (“año cero”), siguiendo por parcelas de un año de edad (“año 1”), parcelas de año 3 o 4 (“monte bravo” o plantaciones establecidas), parcelas de año 6 o 7 (“pre-raleo”), y parcelas precosecha (Pezzutti, 2014). Este tipo de muestreo, permite la toma de decisiones en el corto plazo y la planificación en el mediano y largo plazo, a partir del relevamiento de distintas variables.

El cultivo de Salicáceas en Argentina abarca actualmente 79.159,5 hectáreas, de las cuales 44.226,1 hectáreas son cultivadas en la provincia de Buenos Aires con diferentes objetivos productivos (Área SIG, Dirección de Producción Forestal, MAGyP., 2021). De la producción total de rollizos, el 28% va destinado a celulosa, el 19% a tableros, el 6% a debobinado y el 47% a aserrado. (Borodowski et. al., 2014).

En la región Delta del Paraná, las características productivas de las especies con respecto a su facilidad de clonación, su resistencia a períodos de anegamiento, su rápido crecimiento y su capacidad de rebrote, entre otras, ponen en situación de ventaja este cultivo con respecto a cualquier otra alternativa productiva (Cortizo et. al., 2015). Aquí, el 82,5% de la superficie total implantada con Salicáceas corresponde a sauce (*Salix* spp.) (Borodowski, 2014).

El Delta del Paraná es una llanura anegadiza formada por depósitos fluviales; con un borde elevado llamado comúnmente albardón y una parte central, deprimida y mucho más amplia, denominado bañado, estero o pajonal. Aquí se distinguen dos tipos principales de suelos, los aluvionales y los hidromórficos (Arano, INTA Delta del Paraná, 2006). En los albardones de arroyos y bañados se encuentran Hapludoles ácuicos. El clima de la región es templado-húmedo con precipitaciones medias que rondan los 1020,9 mm anuales, y temperatura media anual de 16,0°C-16,5°C, siendo las máximas del orden de los 37°C y mínimas entre 0°C y 5°C. Debido a la proximidad al Río de La Plata, la humedad relativa es elevada casi todo el año, con una media que ronda el 76% (Álvarez et. al., INTA Gral. Villegas e INTA Pergamino, 2009).

Por otro lado, la superficie forestada con álamo (*Populus* spp.) en Argentina se estima en 61.000 ha, de las cuales solo 5.000 ha plantadas en macizos se ubican en la región de la Pampa Húmeda (Achinelli, 2009). Son bosques establecidos en suelos agrícolas de elevada aptitud productiva, livianos, frágiles, suavemente ondulados y muy profundos (Argiudoles típicos y Hapludoles típicos). La calidad y topografía de estos sitios, permiten el cultivo de álamo y el uso de maquinaria en las tareas sin riesgo de inundación, pero presentan, como desventaja, el elevado costo de las tierras y el transporte de la producción hacia las industrias (Ubeda, 1985). Estos bosques constituyen una reserva de madera cuando las condiciones ambientales en el Delta del Paraná hacen dificultoso el aprovechamiento.

Aquí el clima es templado-húmedo, con temperaturas medias anuales de 16,6°C, temperaturas máximas del orden de los 41°C y mínimas de -7°C. Las precipitaciones medias anuales oscilan entre los 950 mm, concentrándose mayormente en la estación cálida (Álvarez et. al., INTA Gral. Villegas e INTA Pergamino, 2009).

Papel Prensa S.A.I.C.F. y M. es una empresa líder en la industria papelera argentina, que elabora y comercializa productos con los más altos estándares de calidad destinados a distintos usos: papeles para diarios y otras publicaciones periódicas, papeles para libros, catálogos, cuadernos y blocs, papeles para material publicitario y papeles de embalaje. La Oficina Central está ubicada en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y su planta industrial está radicada en la localidad de San Pedro, Provincia de Buenos Aires.



En su proceso productivo, la Empresa utiliza madera que proviene enteramente de bosques de cultivo, en su mayoría de sauces (*Salix* spp.) y álamos (*Populus* spp.), de los cuales, un 30% proviene de campos propios y el 70% restante es suministrado por pequeños y medianos productores de la zona, sobre todo de Buenos Aires (en su mayoría del Delta bonaerense), Entre Ríos y Corrientes.

Los campos propios son cuatro, dos de ellos ubicados en la Provincia de Buenos Aires, uno en Santa Fe y otro en Entre Ríos. Aquí la Empresa realiza actividades de investigación y desarrollo tecnológico, junto con instituciones nacionales educativas y científicas (INTA, UNLP), y ha avanzado en temas como mejoramiento genético, en silvicultura y control integrado de plagas.

Siguiendo por esta línea de innovación y desarrollo productivo, la Gerencia Forestal de la Empresa viene incorporando en forma gradual un conjunto de herramientas y realizando cambios a nivel organizativo, que le permiten monitorear el proceso bajo normativas estandarizadas. De esta manera, comenzó ejecutando inventarios de existencias (“año 1”), y apunta a incorporar un sistema permanente de inventarios de plantaciones, continuando por rodales de mediana edad (5 años) y rodales cercanos al turno de corta (10 años, “inventario precosecha”). Con ello se busca conocer la trayectoria de crecimiento y los rendimientos por hectárea, tanto actuales como futuros, a partir de la estimación del peso útil con corteza de madera verde, punta fina  $\geq 7,5$  cm (PUcc; t/ha). Los parámetros a inventariar son el área basal (AB; m<sup>2</sup>/ha) y la altura media dominante (AMD; m), analizando y utilizando esta información en el marco de sistemas de información geográfica (SIG) y de planificación forestal.

Actualmente, la Empresa viene estimando los rendimientos y tomando decisiones a mediano y largo plazo, en base a información empírica y poco sistematizada, lo cual se traduce en una baja confiabilidad de las estimaciones, limitando el uso de técnicas de optimización cuantitativas de mayor complejidad. Esta situación dificulta la adopción de procedimientos de monitoreo permanente de procesos que se busca implementar bajo normativa ISO 9001. Es por ello, que al momento de avanzar con los inventarios de 5 y 10 años de edad, la Empresa carece de protocolos de trabajo adecuados a sus objetivos particulares y tipos de plantación, que le permitan conocer los requerimientos en recursos humanos, instrumental y tiempos operativos tendientes a analizar los costos de la actividad.

Estos aspectos revisten especial importancia, ya que una vez implementados, los inventarios deberán llevarse a cabo todos los años y sobre una superficie de plantaciones de considerable extensión, y se busca realizarlos a un bajo costo por hectárea.

Lo que este trabajo propone es realizar un método que cumpla con las exigencias y necesidades de la Empresa, mediante el empleo de un muestreo puntual horizontal (MHP) o “parcelas Bitterlich” (Prodan et al., 1997) para estimar el área basal (AB;  $m^2/ha$ ) en plantaciones de Salicáceas de 5 y 10 años de edad, a partir del análisis de dos instrumentos (mira relascópica y prisma), distintos factores de área basal (FAB<sub>s</sub>) y el error de estimación. Existen antecedentes como el de da Cunha & Guimarães Finger (2008), que demuestran la conveniencia de realizar estudios previos para evaluar qué FAB elegir según el tipo de rodal, pues de esta manera se facilitaría el trabajo operativo y mejoraría la eficiencia en el campo. Para la estimación de la altura media dominante (AMD; m) se propone realizar la medición de manera indirecta, es decir, a través del método trigonométrico y de manera expeditiva, seleccionando a “ojo” los tres árboles más gruesos en cercanía al centro de parcela.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

En función de lo anterior, el presente trabajo tiene por objetivo general desarrollar y evaluar en campo, un procedimiento para el relevamiento de datos mediante parcelas de muestreo (PM), aplicables al inventario de las plantaciones de Salicáceas de 5 y 10 años de edad en los Establecimientos de la Empresa, para luego ser incorporado dentro de un protocolo más amplio de inventario permanente, enmarcado en el plan de actividades anuales de la Gerencia Forestal.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar un procedimiento de trabajo para estimar en forma expeditiva el área basal (AB;  $m^2/ha$ ) y la altura media dominante (AMD; m) en PM ubicadas en plantaciones y rebrotes en macizo de sauces (*Salix* spp.) y álamos (*Populus* spp.) de cinco años de edad (en adelante “IA5”) y de diez años de edad (en adelante “IA10”), tomando como base los antecedentes disponibles y



adecuándolo a las características particulares de los Establecimientos de la Empresa.

- Poner a prueba dichos protocolos mediante muestreos en condiciones operativas reales en campos de la Pampa Húmeda y del Delta del Paraná, evaluando los errores de estimación de las variables, comparando el desempeño de distintos instrumentos y ensayando técnicas de marcación para parcelas temporarias y parcelas permanentes.
- Sintetizar los resultados y recomendaciones bajo la forma de un Manual de Procedimientos.

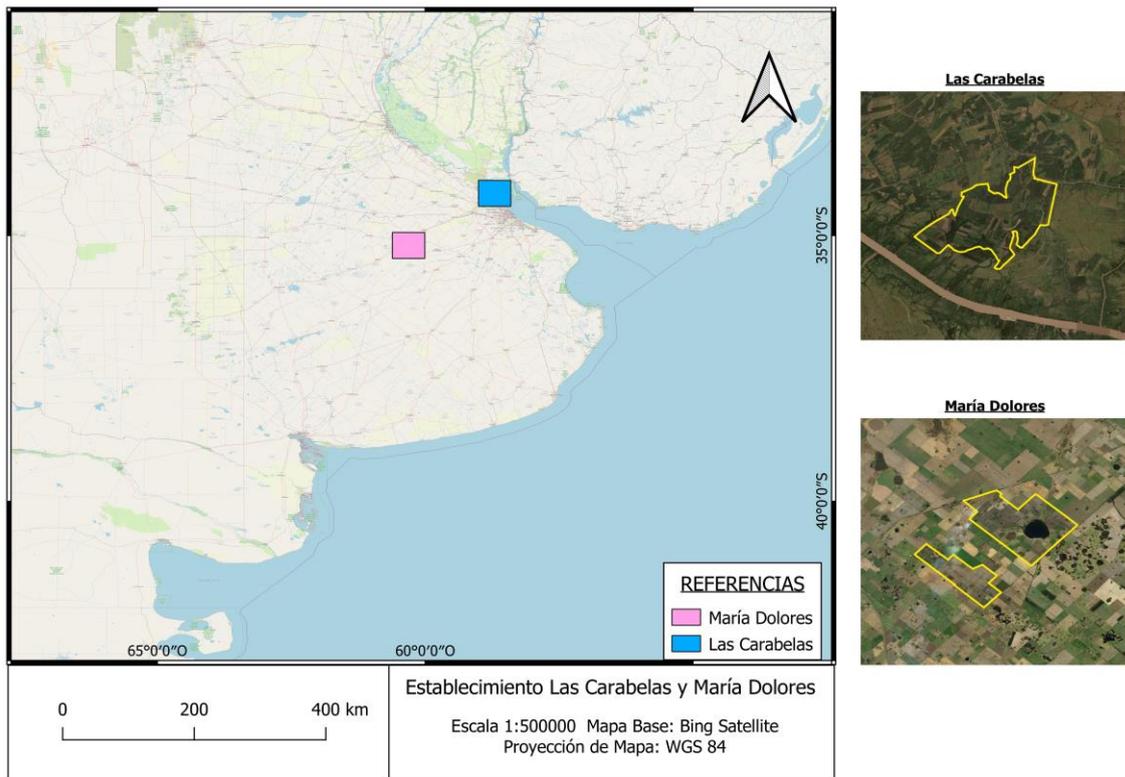
## **PROPUESTA DE INTERVENCIÓN**

### **Plan de acción:**

#### *I. Antecedentes específicos y superficie bajo inventario.*

Para la realización de este trabajo se han elegido dos Establecimientos de la Empresa ubicados en la Provincia de Buenos Aires: “Las Carabelas” (LC), ubicado en la 4° Sección de Islas, Campana ( $34^{\circ}10'05.46''$  S;  $58^{\circ}44'29.11''$  O; 0 m.s.n.m.) y “María Dolores” (MD), ubicado en Palantelén, partido de Alberti ( $35^{\circ}10'43.73''$  S;  $60^{\circ}17'43.07''$  S; 62 m.s.n.m.); los mismos permiten abarcar situaciones representativas de las principales regiones productivas de Salicáceas del Delta del Paraná y de la Pampa Húmeda o región continental (Figura 1).

Se realizó una compilación de todos los polígonos de cinco y diez años de edad, con fecha a mayo de 2017, los cuales se implantaron o se receparon (rebrote) en los años 2013 y 2007 respectivamente. Se tomaron los atributos de denominación o “Código identificador” (ID), ubicación y superficie, procedente de la base de datos de la Empresa (denominada “Registro de Plantación”) aportadas por el entorno de trabajo en SIG.



**Figura 1:** A la izquierda: Ubicación de los Establecimientos “Las Carabelas” y “María Dolores” en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. A la derecha: Superficie delimitada de cada uno de los Establecimientos (LC arriba y MD abajo). Fuente de imagen satelital: Bing Satellite.

Las plantaciones de año cinco (IA5) comprenden 182,52 ha totales, de las cuales 82,36 ha corresponden a Las Carabelas (LC) y 100,16 ha a María Dolores (MD) (Tablas 1 y 2).

Para las plantaciones de año diez (IA10), la superficie total inventariable es de 218,6 ha, correspondiendo 98,4 ha a LC y 123,8 ha a MD (Tablas 3 y 4).

**Tabla 1.** Listado de atributos para los  $n=38$  polígonos de plantación de Salicáceas de 5 años de edad del Establecimiento Las Carabelas, que formaron parte de la población muestreada en este trabajo. LC= Las Carabelas; ID= código identificador; AL= álamo; SH= sauce híbrido; RE= rebrote; PL= plantación; EN= ensayo; \*= polígono muestreado con una o más PM.

Código Identificador ID	Superficie (ha)	Especie	Clon	Tipo de rodal	Muestreado
LC-10-2-a	10,598	SH	13-44	PL	
LC-10-2-b	0,258	AL	129-60	PL	
LC-10-3-a	6,188	SH	Yaguareté	PL	*
LC-10-3-b	0,512	AL	129-60	PL	
LC-10-4-a	5,786	SH	95 -12-03	PL	
LC-10-4-b	0,526	AL	129-60	PL	
LC-10-5-c	0,265	AL	129-60	PL	
LC-1-1-a	0,821	SH	Varios	EN	
LC-15-1-a	10,381	SH	Lezama/otro	PL	**
LC-15-1-b	0,463	AL	239-68	PL	
LC-15-2-a	7,9	SH	13-44	PL	
LC-15-2-b	0,738	AL	239-68	PL	
LC-16-3-c	1,503	SH	13-44	PL	
LC-18-11-b	0,657	AL	129-60	PL	*
LC-18-12-b	0,812	AL	129-60	PL	*
LC-18-13-c	1,715	AL	129-60	PL	
LC-18-2-b	1,992	SH	13-44	PL	
LC-18-8-a	4,234	SH	13-44	PL	*
LC-18-8-c	0,668	AL	239-68	PL	
LC-18-99-b	0,511	AL	129-60	PL	
LC-19-20-b	1,093	AL	129-60	PL	*
LC-19-21-b	0,254	AL	129-60	PL	*
LC-20-7-a	5,505	SH	C01-09	PL	**
LC-20-7-b	3,901	SH	Sauce 14-12	PL	*
LC-20-7-c	0,318	AL	239-68	PL	
LC-2-15-a	6,283	AL	129-60	PL	*
LC-25-6-b	0,719	AL	I-74	RE	
LC-2-7-b	0,55	AL	239-68	PL	
LC-4-9-i	0,198	AL	129-60	PL	
LC-4-9-n	0,405	AL	129-60	PL	
LC-5-10-a	1,059	SH	Yaguareté/Los Arroyos	PL	*
LC-5-5-c	0,69	AL	239-68	PL	*
LC-7-11-a	2,082	SH	Agronales	PL	
LC-7-11-b	0,267	AL	568-1	PL	
LC-7-12-a	1,903	AL	239-68	PL	
LC-7-13-a	0,281	SH	Agronales	PL	
LC-7-13-b	0,187	AL	239-68	PL	
LC-7-99-a	0,14	AL	239-68	PL	
<b>Total LC 2013</b>	<b>82,363</b>		<b>Muestreado LC 2013</b>		<b>41,057</b>

**Tabla 2.** Listado de atributos para los  $n=23$  polígonos de plantación de Salicáceas de 5 años de edad del Establecimiento María Dolores, que formaron parte de la población muestreada en este trabajo. MD= María Dolores; ID= código identificador; AL= álamo; SH= sauce híbrido; RE= rebrote; PL= plantación; EN= ensayo; \*= polígono muestreado con una o más PM.

Código Identificador (ID)	Superficie (ha)	Especie	Clon	Tipo de rodal	Muestreado
MD-12-1	7,09	AL	564-53	PL	
MD-12-1	8,17	AL	564-53	PL	*
MD-12-1	1,133	AL	Varios	EN	
MD-12-2	0,287	AL	Ston.66	PL	
MD-12-2	5,38	AL	Ston.66	PL	*
MD-12-2	4,494	AL	Ston.66	PL	
MD-17-1	2,625	AL	564-53	PL	*
MD-17-1	6,056	AL	568-1	PL	*
MD-17-2	3,99	AL	564-53	PL	
MD-17-2	4,59	AL	568-1	PL	*
MD-2-4	17,104	AL	Ston.66	RE	*
MD-3-5	12,25	AL	Ston.66	RE	*
MD-3-6	5,792	AL	Ston.66	RE	*
MD-5-2	6,354	AL	564-53	PL	*
MD-5-3	0,332	AL	Ston.66	PL	*
MD-5-3	0,972	AL	Ston.66	PL	
MD-5-3	0,189	AL	Ston.66	PL	
MD-5-3	0,679	AL	564-53	PL	*
MD-5-3	0,217	AL	564-53	PL	*
MD-5-3	0,951	AL	Ston.66	PL	*
MD-5-3	0,6	AL	Ston.66	PL	
MD-5-3	0,954	AL	Ston.66	PL	*
MD-9-3	9,953	AL	Ston.66	PL	*
<b>Total MD 2013</b>	<b>100,16</b>		<b>Mustreado MD 2013</b>		<b>81,41</b>

**Tabla 3.** Listado de atributos para los  $n=31$  polígonos de plantación de Salicáceas de 10 años de edad del Establecimiento Las Carabelas, que formaron parte de la población muestreada en este trabajo. LC= Las Carabelas; ID= código identificador; AL= álamo; SA= sauce Soveny americano; SH= sauce híbrido; RE= rebrote; PL= plantación; EN= ensayo; \*= polígono muestreado con una o más PM.

Código Identificador (ID)	Superficie (ha)	Especie	Clon	Tipo de rodal	Muestreado
LC-8-5-c	1,026	AL	208-68	RE	
LC-8-6-a	7,45	SA		RE	
LC-7-6-a	1,942	AL	Ston.67	PL	
LC-7-5-a	2,755	SH	26992	RE	
LC-7-14-a	0,6391	SA		RE	
LC-7-4-a	3,645	SH	26992-Lazarín	RE	***
LC-7-4-b	3,39	SH	Varios	EN	***
LC-7-3-a	3,305	SA		RE	
LC-7-2-b	0,764	SH	Sin determinar	RE	
LC-7-2-a	4,535	AL	129-60	PL	
LC-7-1-a	5,605	AL	129-60	PL	
LC-6-16-a	6,628	AL	568-1/Triplo	PL	
LC-6-13-a	5,433	AL	Ston.67	PL	*
LC-6-12-a	4,116	AL	Ston.67	PL	
LC-6-11-a	4,426	AL	568-1	PL	*
LC-6-10-a	3,587	AL	568-1	PL	
LC-6-9-a	3,555	AL	568-1	PL	
LC-6-8-a	2,233	AL	568-1	PL	*
LC-6-7-a	3,294	AL	Ston.67	PL	*
LC-6-6-a	2,267	AL	129-60	PL	*
LC-26-1-c	0,8134	SH	250/36	RE	
LC-9-5-c	0,2973	SH	131-27	RE	
LC-4-5-d	0,9747	SH	26992	RE	
LC-3-14-a	3,354	SA		RE	
LC-3-15-a	3,728	SA		RE	
LC-5-6-b	1,144	SH	26993	RE	
LC-2-16-a	2,238	SA		RE	
LC-5-3-b	3,725	AL	106-60	PL	
LC-5-2-c	2,302	AL	129-60	PL	*
LC-5-1-b	0,9326	AL	129-60	PL	*
LC-2-3-a	4,737	AL	Ston.67	PL	
<b>Total LC 2007</b>	<b>94,841</b>		<b>Muestreado LC 2007</b>		<b>27,923</b>

**Tabla 4.** Listado de atributos para los  $n=17$  polígonos de plantación de Salicáceas de 10 años de edad del Establecimiento María Dolores, que formaron parte de la población muestreada en este trabajo. MD= María Dolores; ID= código identificador; AL= álamo; RE= rebrote; PL= plantación; PC= plantación en cosecha; EN= ensayo; \*= polígono muestreado con una o más PM.

Código Identificador ID	Superficie (ha)	Especie	Clon	Tipo de rodal	Muestreado
MD-1-4	1,844	AL	Ston.66	PL	
MD-4-1	0,3251	AL	Ston.66	EN	**
MD-4-1	8,209	AL	610-12/Ston.66	PL	
MD-6-8	4,649	AL	Ston.66	PL	*
MD-6-8	11,07	AL	I-63/Ct12	RE	
MD-6-10	10,122	AL	Ston.66	PL	*
MD-6-11	9,387	AL	Ston.66/568-1	PC	*
MD-5-11	10,831	AL	Ston.66	PL	*
MD-10-8	12,465	AL	Ston.66	PL	**
MD-9-5	5,919	AL	568-1/Guardi	PL	***
MD-10-5	6,057	AL	Guardi/Ston.66	PL	
MD-20-4	1,846	AL	Ston.66	PL	*
MD-13-1	2,072	AL	Ct12	RE	
MD-13-2	10,388	AL	Ct12	RE	*
MD-13-3	8,987	AL	Ct12/Ston.66	RE	**
MD-13-4	8,338	AL	Ct12/Ston.66/Ston.71	RE	
MD-13-5	11,313	AL	Ston.66/Ston.67	RE	*
<b>Total MD 2007</b>	<b>123,822</b>		<b>Muestreado MD 2007</b>		<b>86,232</b>

## II. Ubicación de las PM y tamaño de muestra.

Los trabajos en campo con las parcelas de muestreo (PM) se llevaron a cabo durante el invierno de 2017 y el verano de 2018 (período Julio–Enero), dando prioridad al muestreo de los rodales IA10 y luego prosiguiendo con los rodales IA5 durante el invierno de 2018.

La selección de los polígonos se llevó a cabo en dos etapas. Primero se seleccionaron 30 polígonos al azar (15 en cada Establecimiento) para ambas clases de edad, sin estratificación por especie, clon, superficie ni estado (plantación o rebrote). Seguidamente se descartaron aquellos polígonos de escasa representatividad o poca importancia en cuanto a existencias en pie presentes.

Se propuso alcanzar un tamaño de muestra mínimo de  $n = 30$  PM en ambas clases de edad entre los dos Establecimientos, basándonos en el supuesto de que las muestras siguen una distribución normal y son independientes entre sí, y de esta

manera que nos permitiera analizar los diferentes tratamientos bajo test estadísticos paramétricos (t-Student).

En el IA5, se muestrearon 12 polígonos en LC (41,05 ha) y 15 en MD (81,40 ha). En el IA10, se muestrearon 9 polígonos en LC (27,92 ha) y 11 en MD (86,23 ha). En ambos casos se colocaron más de una PM en algunos polígonos.

Una vez finalizada esta etapa, se definieron las PM en el programa QGIS como puntos al azar y se determinó una distancia mínima entre parcelas. A cada punto se les colocó su nombre correspondiente (ID) y luego la capa se exportó en formato .gpx para utilizar en GPS. En el trabajo a campo, se reubicaron algunos puntos cuyas coordenadas quedaban por fuera de los límites del polígono o que se encontraban en una situación de difícil acceso por presencia de malezas, y se seleccionó otro punto al azar para reemplazarlo.

### *III. Características de las parcelas de muestreo (PM)*

Para este trabajo se definieron parcelas de muestreo de tamaño rectangular, abarcando un total de 16 lugares de plantación en MD y 24 en LC.

Para la definición de la forma y el tamaño de las parcelas se tuvieron en cuenta ciertos aspectos:

- Que la PM permitiera un relevamiento expeditivo del AB y de la AMD del rodal, siendo por ello importante que la cantidad de individuos incluida no sea tan grande;
- Fácil ubicación en el terreno en cuanto a su forma, teniendo en cuenta la configuración de plantación utilizada por la Empresa (rectangular);
- Que la superficie de cada PM tuviera la mayor similitud posible a un cuadrado, de modo que los datos obtenidos por MPH puedan ser contrastados con los datos relevados de las parcelas cuadrangulares (“parcelas convencionales”, véase más adelante). La cantidad de árboles que forman parte de las PM son distintas en ambos Establecimientos, ya que en MD la distancia entre hileras es mayor que en LC;
- Que permita la comparación de varios instrumentos de estimación de AB de modo de obtener el que presenta mayor exactitud.

### *IV. Procedimiento de muestreo*

Los rodales IA10 fueron muestreados con PM temporarias (PMT), mientras que en los rodales IA5 se utilizaron tanto PMT como PM permanentes (PMP). Con

excepción de las diferencias en los métodos de marcación entre PMT y PMP, el procedimiento de trabajo que se propuso para llevar a cabo en las PM de IA5 e IA10 es el mismo, buscando el relevamiento expeditivo del AB y de la AMD del rodal. A los fines del ajuste metodológico, el muestreo en dichas PM fue planteado en dos etapas.

#### Primera etapa

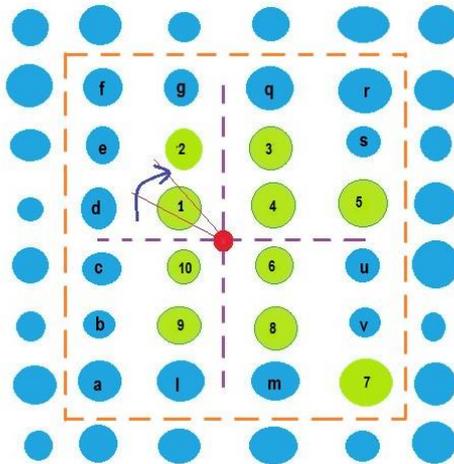
Cada PM se instaló dentro del rodal a muestrear en un punto del terreno cuyas coordenadas geográficas fueron obtenidas al azar mediante el programa QGIS. Los operadores se desplazaron hasta los puntos utilizando mapas satelitales y GPS y cuando la posición marcaba +/- 1 metro, se fijó en el terreno un punto equidistante entre filas y entre hileras, el cual fue registrado como PM Real con el GPS y pasó a funcionar como centro de parcela. Allí se llevó a cabo primeramente un muestreo del área basal por hectárea (AB; m<sup>2</sup>/ha) de tipo puntual horizontal o “Método de Bitterlich” (muestreo puntual horizontal – MPH, Prodan et al., 1997) (Figura 2).

Con este método, una vez ubicado en el centro de parcela, el operador pivotea sobre el mismo, realizando un giro de 360° mientras proyecta un ángulo horizontal con el instrumento hacia los árboles del entorno y realiza el conteo de aquellos individuos cuyos diámetros sobrepasan (árbol entero=1) o se incluyen tocando los bordes del ángulo proyectado (árbol límite=0,5). Los árboles cuyos diámetros es menor de dicho ángulo, quedan excluidos (Prodan et al., 1997). Este recuento nos permite obtener un estimador del área basal por hectárea, de la zona en la que se hace la observación, y complementando esto con la medición de la altura de los árboles, podemos obtener también la cuantificación del volumen por unidad de superficie (Romahn de la Vega, 1999).

Cualquier FAB proporciona, en teoría, estimaciones puntuales insesgadas del total por unidad de superficie. Sin embargo, la eficiencia y el riesgo de sesgamiento en las estimaciones varían según el FAB elegido (Prodan et al., 1997).

Este muestreo se realizó utilizando dos tipos de instrumentos, prisma y relascopio Haglof, y a su vez empleando variantes de los mismos con diferentes factores de área basal (FAB: 0,5; 1; 2; 3; 4). Se comenzó el MPH utilizando el instrumento con menor FAB (ej. 0,5 o 2 dependiendo de la edad del rodal), e

iniciando el giro de 360° desde el ejemplar vivo más cercano al punto de observación, desplazando la visual siguiendo el sentido de las agujas del reloj.



**Figura 2.** Esquema que representa el procedimiento del muestreo puntual horizontal (MPH) en una parcela de muestreo (PM). Se observa la proyección horizontal de los diámetros a la altura del pecho (DAP) de 48 ejemplares de un rodal hipotético de Salicáceas (plantación), desde el centro de parcela, indicado en color rojo. Este punto se ubica de manera equidistante entre filas y entre hileras (líneas violetas punteadas), y las dos líneas rojas que convergen en el punto de observación, marcan el ángulo de observación proyectado para el conteo de ejemplares. Los árboles de color verde son los ejemplares vivos que se marcan y cuentan para la estimación del área basal en la primera etapa (ej. prisma con FAB=2), mientras los que tienen color celeste son árboles vivos que han quedado excluidos, al igual que los árboles muertos. La línea cortada de color naranja representa el límite de la parcela “convencional” en donde se midieron los DAP de los ejemplares vivos mediante cinta diamétrica, y la altura total mediante el método trigonométrico (segunda etapa).

La expresión que determina el área basal por hectárea a través del factor de área basal (FAB) y el número de árboles que cumplen con la condición Bitterlich, es la siguiente:

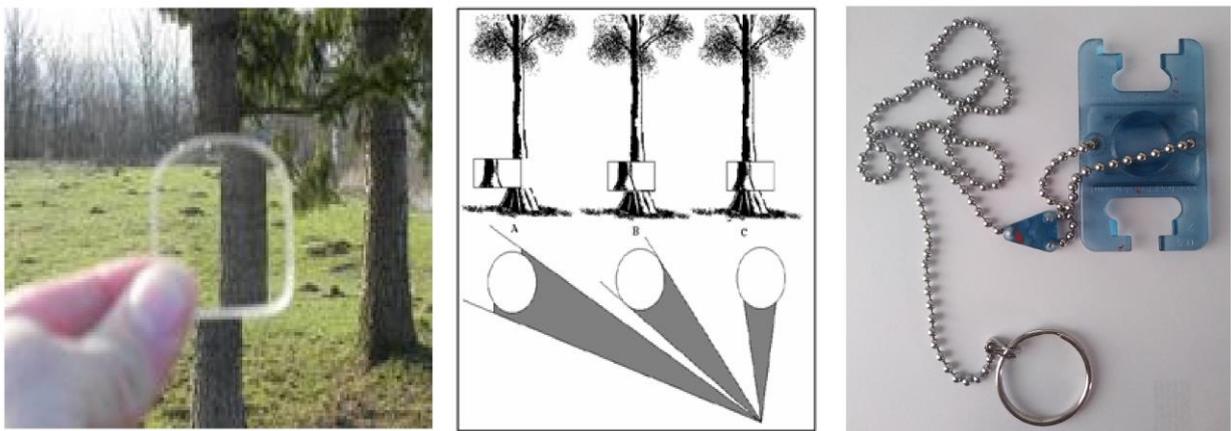
$$G \text{ (m}^2\text{/ha)} = f_n * N$$

Dónde:  $f_n$ = factor de AB utilizado;  $N$ = n° árboles contados.

El prisma es una pieza de cristal rectangular en forma de cuña que causa una distorsión a la luz, desplazando la imagen hacia la parte más fina. De esta manera se observa el fuste de los árboles a través del prisma, de tal forma que su borde superior coincida con la altura del DAP. Los árboles que se cuentan serán aquellos en los que exista superposición entre la imagen desplazada y el fuste real del árbol;

aqueellos en los que no exista superposición no serán contados, y finalmente aquellos en los que existe sobreposición en un punto, son considerados árbol límite, y se cuentan como media unidad (Romahn de la Vega, 1999) (Figura 3).

El relascopio de Haglof es una mira graduada con cuatro graduaciones de FAB (0,5; 1; 2 y 4). Dispone de una cadena y un anillo, el cual se coloca con una mano cerca del ojo del observador y con la otra se extiende la cadena que contiene la mira. De acuerdo al FAB a utilizar, se debe mirar por la ranura al árbol a la altura del DAP; si éste sobresale, debe contarse como árbol entero (=1); si no sobresale, no se cuenta; y si entra tocando con sus bordes los laterales de la ranura, se cuenta como árbol límite (=0,5) (Figura 3).



**Figura 3:** A la izquierda: foto del prisma utilizado en este trabajo y ejemplo de su uso; Al centro: ejemplos del funcionamiento de un prisma (arriba) y de un relascopio Haglof (abajo) para tres ejemplares diferentes: árbol A= no se cuenta; árbol C= se cuenta; árbol B o “árbol límite” = se cuenta como 0,5; A la derecha: relascopio Haglof utilizado en este trabajo con el detalle de la cadena, anillo y las ranuras.

En las PM de IA10 los FAB utilizados con prisma fueron de 2, 3 y 4 y con relascopio Haglof, de 2 y 4.

En las PM de IA5 los FAB que se utilizaron con prisma fueron 2 y 3, y con relascopio Haglof de 0,5, 1 y 2.

Ambas mediciones, tanto con prisma como con relascopio, fueron promediadas entre dos o tres lecturas.

En las PM de IA10, los ejemplares vivos contados mediante el prisma con FAB=2 fueron marcados con pintura en aerosol, siguiendo la progresión del observador en el sentido de las agujas del reloj (flecha azul, Figura 2). El procedimiento de MPH se repitió con prismas de FAB mayor (3 y 4) y luego con

relascopio Haglof (FAB=2 y 4), pero en esos casos los árboles contados no fueron marcados.

En el caso de las PM de IA5 en cambio, se comenzó la marcación de árboles a través del conteo con el relascopio de Haglof de FAB=0,5, y repitiendo el procedimiento con los FABs mayores.

A continuación, se eligieron los tres ejemplares de mayor DAP por aproximación visual ubicados relativamente cerca del punto de observación y se midieron las alturas totales; todas las mediciones se llevaron a cabo utilizando clinómetro Suunto (grados; °) y distanciómetro (metros; m). En este caso, un operador se ubicó junto al árbol a medir con el dispositivo electrónico y el segundo operador se ubicó a una distancia tal que le permitiera observar y medir la altura sin interferencias. De esta manera se obtiene la altura total por método trigonométrico, sumando finalmente la altura de los ojos del observador.

Para finalizar esta etapa, se determinó la superficie de la parcela mediante el promedio del distanciamiento entre filas e hileras con cinta métrica; midiendo tres entre filas consecutivas y haciendo pasar la cinta por el punto de observación de PM; el mismo procedimiento se aplicó para la medición de la distancia entre hileras; en caso de que la configuración fuera rectangular (menor distancia entre hileras) se abarcaron seis entre hileras consecutivas (véase en Figura 2).

### Segunda etapa

Se tomó como referencia el punto de observación y, con centro en el mismo, se definió una parcela aproximadamente cuadrada que abarcó 4 filas y 6 hileras (en los casos de distanciamientos rectangulares como de 3,5 m x 1,7 m) (véase Figura 2), en base a los cuales se definieron los límites de la parcela para las mediciones “convencionales”, es decir, sin recurrir a la técnica de MPH (línea cortada de color naranja, Figura 2); la marcación de esta parcela se llevó a cabo con cinta plástica roja y blanca, colocada en los fustes de los árboles situados en cada uno de los vértices, y a una altura de entre 1,3 y 1,7 m; en el caso de parcelas permanentes (PMP), además de la cinta plástica se marcó con aerosol cada árbol vértice con su respectiva numeración. Las coordenadas del punto de observación (en todas las parcelas) y de los cuatro árboles vértice (parcelas PMP) fueron registrados en el terreno mediante GPS y nombradas como punto Real (ejemplo: 5-1-bP1Real).

Dentro de esos límites se midieron con cinta diamétrica los diámetros a la altura del pecho (DAP) de la totalidad de los ejemplares/fustes vivos, así como también sus alturas totales (método trigonométrico, igual procedimiento que en MPH).

Es importante notar que la superficie de las PM “convencionales” varió levemente, en función de la distancia entre filas y entre hileras que tenía el rodal. En MD la configuración de plantación era de aproximadamente 4 x 2 m, y en LC de 3,5 x 2,8 m.

#### V. Análisis estadístico

- Parte I. Obtención del AB (m<sup>2</sup>/ha), AMD (m) y PU<sub>cc</sub> (t/ha) a nivel de rodal.

El trabajo en campo con las parcelas “convencionales” hizo posible obtener valores de DAP y altura total de todos los individuos vivos incluidos en cada PM; esta información, sumada al conocimiento de la superficie abarcada por la parcela y a la aplicación de tablas estándar de volumen, permitió estimar el AB, la AMD y el rendimiento por hectárea para el inventario pre-cosecha IA10 (PU<sub>cc</sub>; t/ha).

La ecuación utilizada para estimar el Volumen Útil con corteza (VU<sub>cc</sub>; m<sup>3</sup>) por árbol es la de Schumacher & Hall de regresión no lineal para *Populus deltoides* cv. “Stoneville 66”, la cual fue seleccionada luego de comparar su coeficiente de bondad de ajuste (R<sup>2</sup><sub>aj</sub>) con otros modelos mediante regresión lineal y no lineal, que fueron analizados estadística y gráficamente con el programa Statgraphics. Las variables independientes son el DAP (cm) y la altura total del árbol (AT; m). Se utiliza tanto para álamos como para sauces y tiene la siguiente expresión:

$$VU_{cc} (m^3) = b_0 * DAP^{c_1} * AT^{c_2}$$

$$VU_{cc} (m^3) = 0,0000194336*(DAP^{2,07796}) *(AT^{1,06542})$$

Dónde: DAP= diámetro a 1,30 m de altura; AT= altura total (m) del árbol; b<sub>0</sub>, c<sub>1</sub> y c<sub>2</sub> = parámetros del modelo.

A partir de allí, la ecuación que estima el Peso Útil con corteza (PU<sub>cc</sub>; t) por árbol individual está dada por la siguiente expresión:

$$PU_{cc} (t) = VU_{cc}(m^3) * \rho (g/cm^3)$$

Dónde: VU<sub>cc</sub>= volumen útil con corteza (m<sup>3</sup>); ρ= densidad de la madera que para Salicáceas es igual a 0,80 (g/cm<sup>3</sup>).

- Parte II. Comparación de medias y varianzas por prueba de t y F y análisis de estadísticos descriptivos.

Los datos de AB, AMD y rendimiento (PUcc) estimados por el procedimiento convencional, fueron considerados en adelante valores “reales”, pudiéndose calcular su promedio, desvío estándar, varianza, intervalo de confianza y error absoluto medio. Por otro lado, los distintos métodos angulares suministraron, para cada PM, cinco estimaciones del AB adicionales en IA10 (prismas de FAB=2, 3 y 4; relascopio Haglof con FAB=2 y 4) y en IA5 (prismas de FAB=2 y 3; relascopio Haglof de FAB=0,5, 1 y 2). A esos datos también se les calcularon los estadísticos descriptivos mencionados.

El error absoluto medio (EAM) fue calculado mediante el método paramétrico de Estadística descriptiva de Bootstrap plot ([www.wessa.net](http://www.wessa.net)), tanto para los datos reales como estimados mediante MPH, para LC, MD, IA5 e IA10. Haciendo una simulación de 100.000 combinaciones y utilizando los Cuantiles P 2,5 como límite inferior y P 97,5 como límite superior. El procedimiento fue calcular el promedio del error en ese rango, para lo cual se repitió cinco veces y luego se promedió. Ese fue el resultado que se tomó como estimado.

Finalmente, las diferencias existentes entre las AB reales y las AB estimadas por MPH para cada combinación de instrumento fueron analizadas mediante la prueba de *t* para muestras pareadas, con un nivel de confianza del 95%, poniendo a prueba la hipótesis nula ( $H_0$ ) que la diferencia de medias es igual a cero (Ej:  $AB_{real} = AB_{MPHpr2}$ ). Junto con estas comparaciones se realizó la prueba de F para comparar las varianzas entre las muestras. Los análisis se efectuaron mediante el programa Infostat (InfoStat, 2008) y Excel.

El mismo procedimiento se aplicó para comparar las muestras de AMD real (m) y  $AMD_{MPH}(m)$ .

- Parte III. Elección del mejor método estimativo de AB ( $m^2/ha$ ) a partir de modelos de regresión lineal.

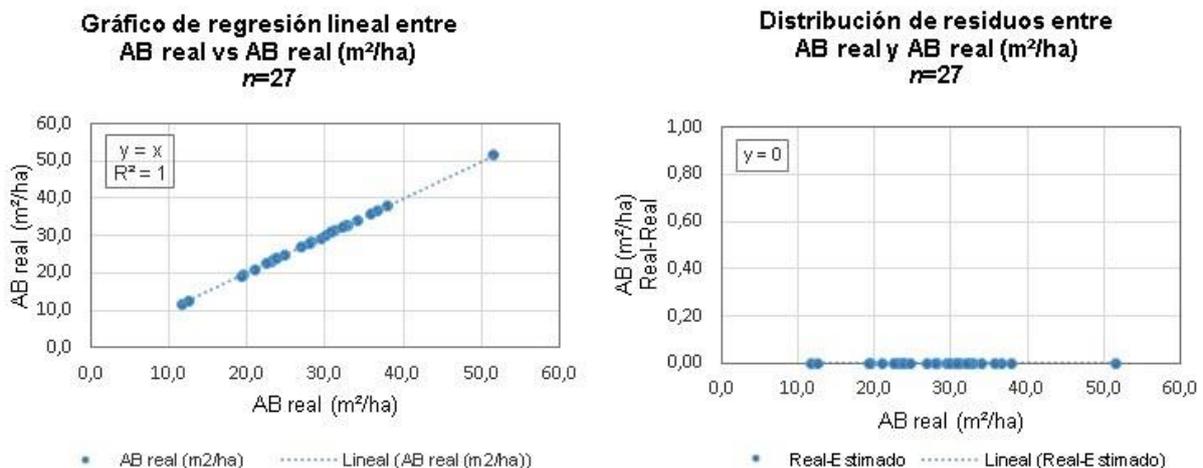
Para describir la relación entre las variables (AB y AMD) reales y estimadas mediante MPH, se ajustaron y evaluaron ecuaciones de regresión lineal para ambas clases de edad. El análisis de regresión involucra un conjunto de técnicas estadísticas cuyo propósito es la construcción de un modelo para la estimación de la media de una variable dependiente (en este caso AB real; AMD real) a partir de una o más variables independientes (regresión simple o múltiple, respectivamente), también llamadas regresoras (en este caso  $AB_{MPHi}$ ;  $AMD_{MPH}$ ).

La forma particular de la función es:

$$AB \text{ real (m}^2/\text{ha)} = \beta_0 + \beta_1 \cdot AB_{MPHI}(\text{m}^2/\text{ha)} + \varepsilon_i$$

El primer coeficiente ( $\beta_0$ ) corresponde a la ordenada al origen y el segundo ( $\beta_1$ ) a la pendiente. Por otra parte, el error experimental ( $\varepsilon_i$ ) se conceptualiza como una variable aleatoria que introduce perturbaciones sobre los valores que deberíamos observar de la variable dependiente (Balzarini et al., 2015).

Para realizar la comparación de los métodos estimativos por MPH que mejor se ajustan a los valores reales de AB y AMD, se estableció la línea de tendencia de referencia representada por la serie de datos de AB real vs AB real, es decir, utilizada tanto como variable dependiente (Y) e independiente (X). Dando como resultado una recta que pasa por el origen ( $\beta_0=0$ ), tiene pendiente igual a 1 ( $\beta_1=1$ ) y un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ) igual a 1. Además, el error absoluto medio (EAM) es igual a 0. De esta manera se establece que el mejor método de estimación angular será aquel cuyo  $R^2_{aj}$  arroje valores cercanos o iguales a 1 y un EAM menor. Por el contrario, si  $R^2_{aj}$  es cercano o igual a 0, se tratará de un ajuste malo o no representativo de la realidad. Los análisis se efectuaron mediante el programa Excel (Figura 4).



**Figura 4:** A la izquierda: Regresión lineal que establece la línea de tendencia de referencia del AB real (m<sup>2</sup>/ha), con su respectiva ecuación y valor de R<sup>2</sup>. A la derecha: Distribución de residuos de la relación de referencia de AB real (m<sup>2</sup>/ha), utilizando los datos reales del IA10, pero lo mismo se aplica para IA5.

El EAM es una medida de la diferencia entre dos variables continuas, considerando dos series de datos (unos calculados y otros observados) que, en nuestro caso, los reales son los “calculados” y los obtenidos por MPH los

“observados”, para cuantificar la precisión de las diferentes técnicas de medición. Considerando un diagrama de dispersión de  $n$  puntos en base a una serie de datos (ej: AB real vs  $AB_{MPH_{pr2}}$ ), el EAM corresponde a la distancia vertical promedio entre cada uno de los puntos y la recta identidad obtenida por el modelo lineal. Se calcula restando Valor Real – Valor Estimado (Valor estimado es calculado a partir de la ecuación que se obtiene de la regresión lineal, utilizando como dato de variable predictora, el obtenido por MPH), y promediando su valor absoluto ( $EAM = \sum |y_i - \hat{y}_i| / n$ ).

- Parte IV. Determinación de Peso útil con corteza mediante modelo de predicción para IA10.

Luego de determinar mediante regresión lineal qué instrumento angular (Prisma o relascopio Haglof) y su factor de AB (FAB) se ajusta mejor a los valores reales de AB, se determinó la ecuación que predice el Peso Útil con corteza ( $PU_{cc}$ ; t/ha) en base al análisis de varios modelos de volumen que se utilizan para Salicáceas determinando el que presenta mejor ajuste (Tabla 5).

**Tabla 5:** Expresión matemática de los modelos utilizados para estimar volumen en Salicáceas según diferentes autores. Estos modelos matemáticos fueron reajustados para estimar  $PU_{cc}$  (t/ha) a través de las variables independientes AB ( $m^2/ha$ ) y AMD (m).

N° Modelo	Expresión matemática	Nombre del modelo
1	$V = a * DAP^b * H^c$ $PU_{cc} = p1 * AB^{p2} * AMD^{p3}$	Shumacher & Hall 1933 (Fernández Tschieder et. al. 2011).
2	$V = a + b * DAP^2 * H$ $PU_{cc} = p1 + p2 * AB * AMD$	Spurr o de Variable combinada (Fernández Tschieder et. al. 2011).
3	$V = a + b * DAP^2 + c * H + d * DAP^2 * H$ $PU_{cc} = p1 + p2 * AB + p3 * AMD + p4 * (AB * AMD)$	Variable Combinada Generalizada (Suárez & García Volonté, 1993).
4	$V = a * DAP^2 * H * F$ $PU_{cc} = p1 * AB * AMD$	Variante de la función estándar con factor de forma constante. (Kershaw Jr. et. al. 2016)
5	$Y = a + b * X$ $PU_{cc} = p1 + p2 * AB$	Modelo lineal
6	$Y = a + b * X$ $PU_{cc} = p1 + p2 * AMD$	Modelo lineal

$a, b, c, d, p1, p2, p3, p4$ : parámetros del modelo;  $V$ : volumen ( $m^3$ );  $DAP$ : diámetro a 1,30 m de altura (cm);  $H$ : altura total (m);  $AB$ : área basal ( $m^2/ha$ );  $PU_{cc}$ : peso útil con corteza (t/ha);  $AMD$ : altura media dominante (m).

La función de volumen general más conocida es la de Spurr o de variable combinada:

$$V=b_0+b_1*d^2*h$$

Este modelo, ajustado sin intercepto, se denomina de factor de forma constante, dado que la expresión  $d^2h$ , al ser multiplicada por la constante  $\pi/40.000$ , representa el volumen de un cilindro; de esta manera, en el modelo, sin término constante, el coeficiente de regresión  $b_1$  representaría el factor de forma falso que reduce el cilindro para transformarlo en volumen del árbol (Prodan et al., 1997).

La determinación del o los modelos que mejor se ajustan a los valores reales de Peso útil con corteza y por ende estiman con mayor exactitud esta variable, se realizó a partir del análisis del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ), el error absoluto medio (EAM) y el análisis del gráfico de dispersión de residuos.

El gráfico de la dispersión de residuos de los diferentes modelos resulta de la diferencia entre los valores observados y los pronosticados. Este análisis está relacionado con el error estándar de estimación, que mide la relación entre la gráfica de la función obtenida por regresión y la nube de puntos. Esto nos permite observar casos atípicos (valores) y la distribución del error a lo largo del eje de la variable estimada.

## RESULTADOS

### *Análisis estadístico*

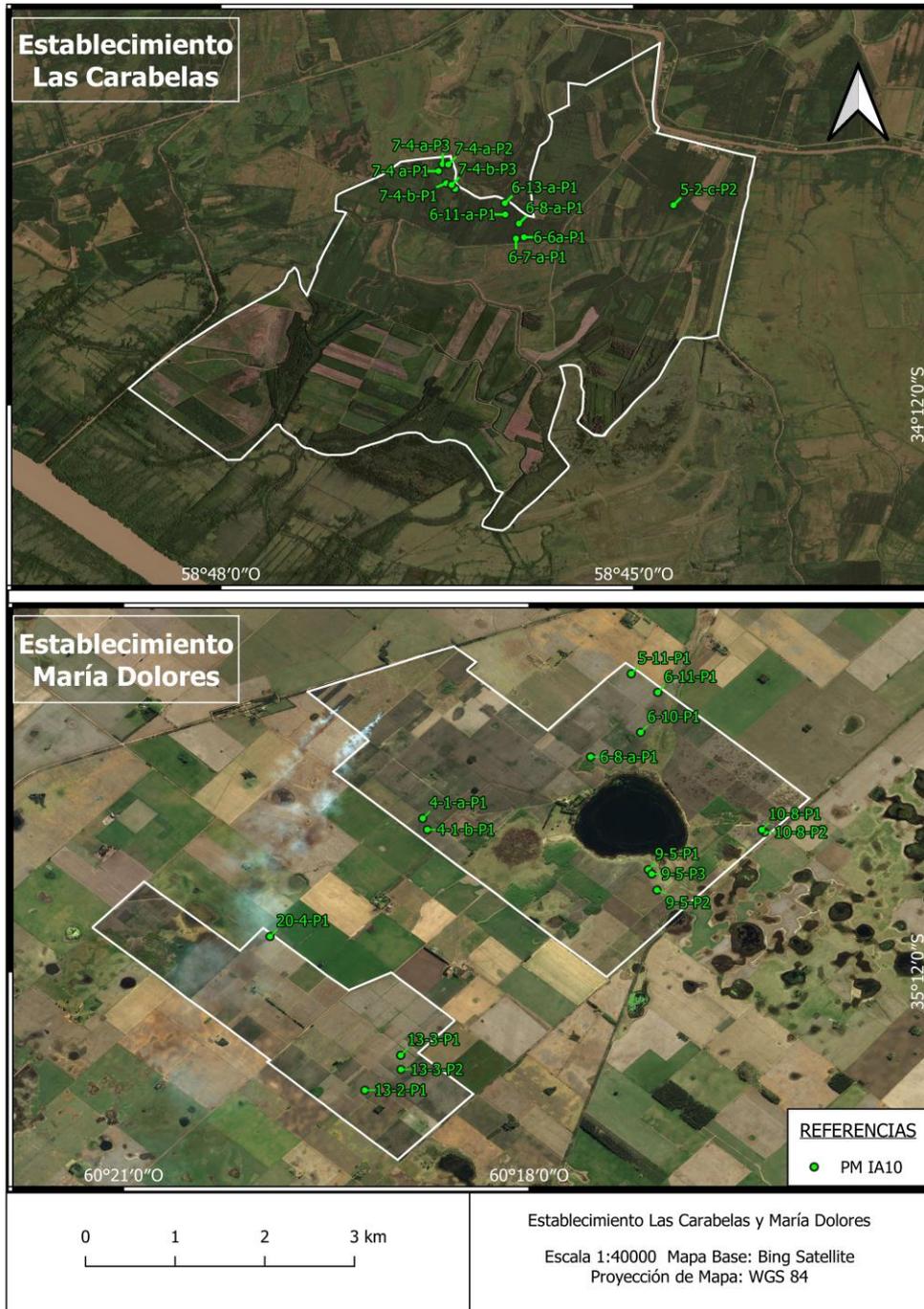
- Parte I. Obtención del AB ( $m^2/ha$ ), AMD (m) y PUcc (t/ha) a nivel de rodal.

Como resultado de los trabajos realizados en los dos Establecimientos, para el IA10 se relevaron finalmente 27 PM distribuidas en 218,6 ha de plantaciones, y 29 PM para IA5, distribuidas en 179,4 ha (Figura 5 y 6, respectivamente). La intensidad de muestreo resultante y el detalle del mismo se muestran en la Tabla 6.

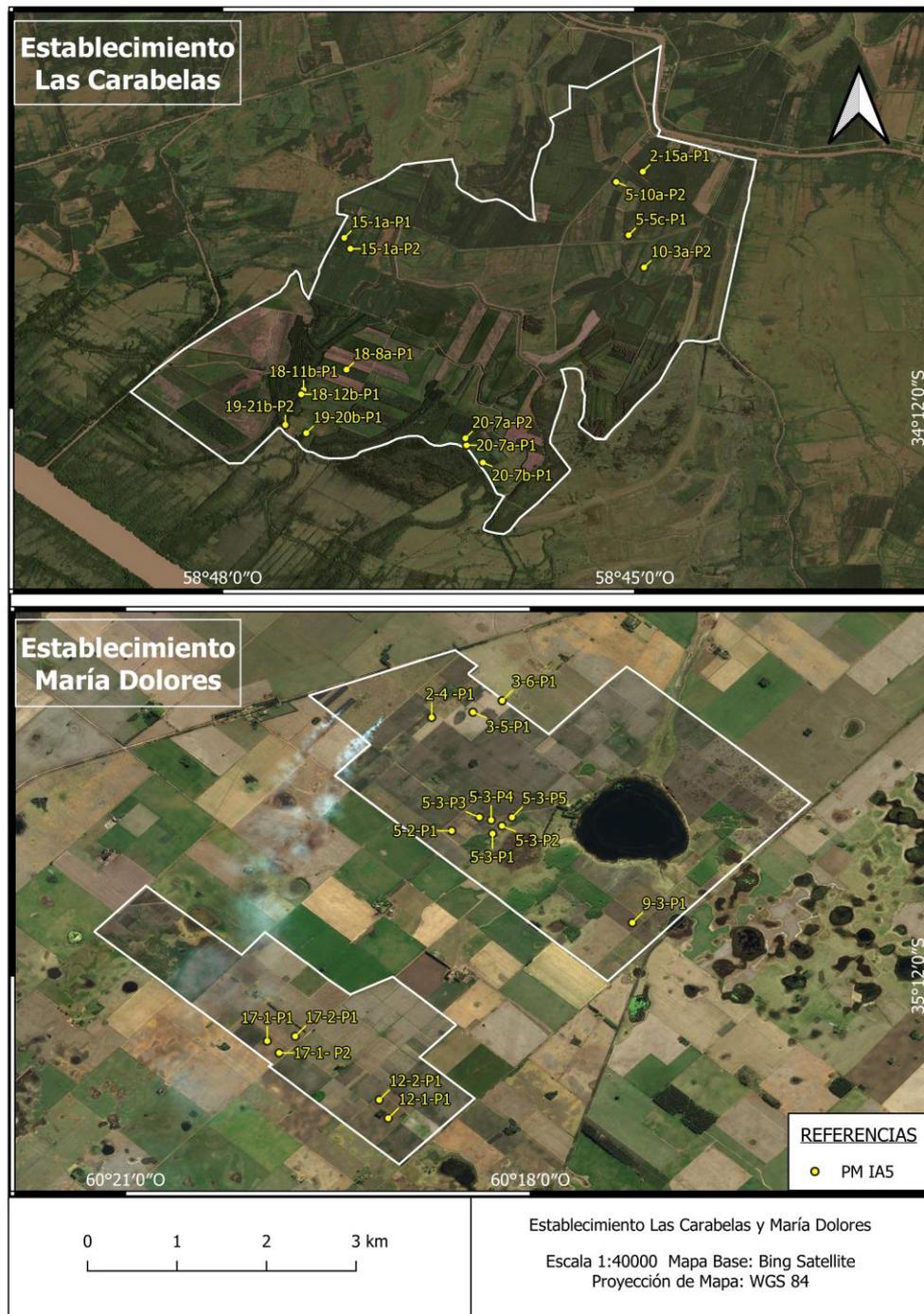
Los valores promedios de las variables AB ( $m^2/ha$ ), AMD (m), PUcc (t/ha) y errores obtenidos de las PM convencionales, se muestran en la tabla 7 para cada Establecimiento y cada inventario.

Como puede observarse, existen diferencias en los valores medios de las variables entre los Establecimientos, siendo mayores en MD en comparación con LC, para las dos clases de edad. Esto puede deberse, en parte, a la homogeneidad en las condiciones del terreno que presenta la región continental en comparación

con las condiciones del Delta, donde existen mayor variedad de calidades de sitios dentro de un mismo lote, además de que la totalidad de los rodales relevados en MD son de álamos.



**Figura 5:** Ubicación de las PM en los Establecimientos “Las Carabelas” (arriba) y “María Dolores” (abajo) para IA10. Fuente de imagen satelital: Bing Satellite.



**Figura 6:** Ubicación de las PM en los Establecimientos “Las Carabelas” (arriba) y “María Dolores” (abajo) para IA5. Fuente de imagen satelital: Bing Satellite.

**Tabla 6:** Intensidad de muestreo final para cada Establecimiento, superficie de parcela medio y total para inventario de año 10 (IA10) e inventario de año 5 (IA5). LC= Las Carabelas; MD= María Dolores; PM= parcela de muestreo.

IA10							
Estab.	Polígonos 10 años (n)	Superficie (ha)	PM (n)	Tamaño medio PM (ha)	Sup. Total PM (ha)	Intensidad (%sup. muestreada)	Intensidad (N°PM/ha)
LC	31	94,8	12	0,019	0,230	0,24	7,90
MD	17	123,8	15	0,015	0,227	0,18	8,25
<b>IA10</b>	<b>48</b>	<b>218,6</b>	<b>27</b>	<b>0,017</b>	<b>0,456</b>	<b>0,21</b>	<b>8,10</b>
IA5							
Estab.	Polígonos 5 años (n)	Superficie (ha)	PM (n)	Tamaño medio PM (ha)	Sup. Total PM (ha)	Intensidad (%sup. muestreada)	Intensidad (N°PM/ha)
LC	38	82,4	14	0,020	0,284	0,35	5,88
MD	23	97,0	15	0,016	0,233	0,24	6,47
<b>IA5</b>	<b>61</b>	<b>179,4</b>	<b>29</b>	<b>0,018</b>	<b>0,519</b>	<b>0,29</b>	<b>6,19</b>

**Tabla 7.** Promedios, desvíos estándar, error estándar del promedio (EAM) y error porcentual (E%) para una probabilidad del 95% según las variables obtenidas en PM convencionales para los dos Establecimientos (MD y LC) y para la totalidad de la muestra en ambos inventarios (IA10 e IA5). AB= área basal por hectárea (m<sup>2</sup>/ha); AMD= altura media dominante (m); PUcc= peso útil con corteza por hectárea (punta fina ≥ 7,5 cm; t/ha).

IA10						IA5							
Est.	Variable	n	Media	Desvío Estándar	EAM	Error %	Est.	Variable	n	Media	Desvío Estándar	EAM	Error %
LC	AB	12	24,08	7,08	3,84	15,94	LC	AB	14	11,77	9,07	4,58	38,86
	AMD	12	20,12	4,64	2,50	12,41		AMD	14	12,12	3,59	1,79	14,79
	PUcc	12	139,18	61,43	33,13	23,80							
MD	AB	15	31,02	7,92	3,87	12,47	MD	AB	15	13,38	5,01	2,44	18,25
	AMD	15	24,11	2,65	1,30	5,38		AMD	15	13,89	1,84	0,87	6,26
	PUcc	15	225,58	85,06	41,54	18,42							
IA10	AB	27	27,94	8,21	3,45	12,36	IA5	AB	29	12,60	7,17	2,55	20,19
	AMD	27	22,33	4,12	1,54	6,91		AMD	29	13,04	2,92	1,02	7,84
	PUcc	27	187,18	86,06	34,72	18,55							

Cabe mencionar, que la no conducción de rebrote en alguna de las parcelas, también obstaculiza las visuales y hace que los operarios tarden más tiempo en despejar la zona y realizar el conteo de los fustes, porque se vuelve confuso. En el IA10, se encontró una situación en donde la presencia de malezas no permitió realizar el MPH. Esta parcela se ubicaba en el campo de Las Carabelas (polígono 5-2-c). Además, una vez relevados los datos, se encontraron dos situaciones

sobresalientes en las PM, las cuales fueron eliminadas del análisis general. Dichas parcelas fueron: LC-5-1b-P1 (ubicada en LC) y MD-13-5-P1 (ubicada en MD). En el primer caso, la PM se encontraba en una situación de borde de rodal, en la cual seis ejemplares de una fila se ubicaban al borde de zanja, dando por consiguiente valores muy superiores en cuanto a crecimiento. En la parcela MD-13-5-P1 en cambio, los árboles presentan un crecimiento diferencial en cuanto al diámetro y altura total, alcanzando hasta 32 m de altura, condición que limita la utilización de las ecuaciones estándar utilizadas en este trabajo para estimar el PUcc (t/ha), las cuales fueron desarrolladas para una altura máxima de 26,4 m.

Ambas parcelas fueron excluidas del análisis debido a su condición no representativa en los valores de AB y AMD con el resto de las PM. Como consecuencia de la exclusión de los “outliers”, el tamaño de muestra quedó reducida a  $n=27$  PM totales para IA10.

- Parte II. Comparación de medias y varianzas por prueba de  $t$  y  $F$  y análisis de estadísticos descriptivos.

Se realizaron comparaciones de los valores medios de las diferentes muestras de área basal (AB;  $m^2/ha$ ) y altura media dominante (AMD; m), utilizando los test paramétricos de  $t$  y de  $F$  para comparar medias y varianzas, respectivamente, para un nivel de confianza de 95% ( $\alpha=0,05$ ), poniendo a prueba como hipótesis nula que  $media AB_{REAL} = media AB_{MHPi}$ . Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Para el IA10, los resultados de las comparaciones entre las muestras de  $AB_{real}$  vs  $AB_{MHPi}$ , indican que no existen diferencias estadísticamente significativas para cada Establecimiento, a pesar de que con  $AB_{Hg2}$  y  $AB_{Hg4}$  los valores de  $p$  son mayores en los dos campos y en la totalidad de la muestra, con lo cual se puede asumir en principio, que estos métodos se aproximan mejor al valor real de AB y puede considerarse su extensión a todos los rodales de diez años de edad, independientemente de su ubicación en el Delta o en la región continental.

Con respecto a la AMD, tampoco se observan diferencias estadísticamente significativas entre el valor real y el estimado por MPH, y se ve reflejado en los altos valores de  $p$  y  $F$  para ambos Establecimientos y la totalidad de la muestra.

En el IA5, las comparaciones entre las muestras reales de AB y las estimadas por MPH, indican que no existen diferencias estadísticamente significativas en los

Establecimientos ni en la totalidad de la muestra, lo cual se refleja en los altos valores de  $p$  y  $F$ .

Así mismo, las comparaciones de AMD en dicho inventario, tampoco evidencian diferencias estadísticamente significativas en ambos Establecimientos, ni en la totalidad de la muestra.

**Tabla 8:** Probabilidades obtenidas en las comparaciones de medias (test de  $t$ ) y de varianzas (test de  $F$ ) para el contraste entre las muestras de Área Basal real (AB;  $m^2/ha$ ) y la Altura Media Dominante (AMD;  $m$ ) provenientes de parcelas convencionales (Muestra 1) y las muestras obtenidas por muestreo puntual horizontal (MPH; Muestra 2), para IA10 e IA5. Para los contrastes paramétricos la hipótesis nula planteada fue:  $H_0$ : Media 1=Media 2, y  $H_0$ :  $\sigma_1 = \sigma_2$ ; LC= Las Carabelas; MD= María Dolores; IA10= totalidad de la muestra (LC+MD) para inventario año 10; IA5= totalidad de la muestra (LC+MD) para inventario año 5.

IA10					IA5				
MUESTRA 1	MUESTRA 2	n	p(t)	p(F)	MUESTRA 1	MUESTRA 2	n	p(t)	p(F)
<i>AB Real (m<sup>2</sup>/ha) LC</i>	AB pr 2 (m <sup>2</sup> /ha)	12	0,068	0,813	<i>AB Real (m<sup>2</sup>/ha) LC</i>	AB pr 1 (m <sup>2</sup> /ha)	14	0,804	0,263
	AB pr 3 (m <sup>2</sup> /ha)	12	0,088	0,762		AB pr 2 (m <sup>2</sup> /ha)	14	0,909	0,416
	AB pr 4 (m <sup>2</sup> /ha)	12	0,142	0,801		AB Hg 0,5 (m <sup>2</sup> /ha)	14	0,927	0,502
	AB Hg 2(m <sup>2</sup> /ha)	12	0,235	0,838		AB Hg 1 (m <sup>2</sup> /ha)	14	0,849	0,426
	AB Hg 4(m <sup>2</sup> /ha)	12	0,691	0,673		AB Hg 2 (m <sup>2</sup> /ha)	14	0,616	0,269
<i>AMD Real (m) LC</i>	AMD "MPH" (m)	12	0,940	0,950	<i>AMD Real (m) LC</i>	AMD "MPH" (m)	14	0,960	0,991
<i>AB Real (m<sup>2</sup>/ha) MD</i>	AB pr 2 (m <sup>2</sup> /ha)	15	0,103	0,705	<i>AB Real (m<sup>2</sup>/ha) MD</i>	AB pr 1 (m <sup>2</sup> /ha)	15	0,515	0,722
	AB pr 3 (m <sup>2</sup> /ha)	15	0,081	0,917		AB pr 2 (m <sup>2</sup> /ha)	15	0,869	0,767
	AB pr 4 (m <sup>2</sup> /ha)	15	0,118	0,446		AB Hg 0,5 (m <sup>2</sup> /ha)	15	0,861	0,535
	AB Hg 2(m <sup>2</sup> /ha)	15	0,343	0,880		AB Hg 1 (m <sup>2</sup> /ha)	15	0,791	0,861
	AB Hg 4(m <sup>2</sup> /ha)	15	0,424	0,303		AB Hg 2 (m <sup>2</sup> /ha)	15	0,736	0,632
<i>AMD Real (m) MD</i>	AMD "MPH" (m)	15	0,864	0,928	<i>AMD Real (m) MD</i>	AMD "MPH" (m)	15	0,910	0,842
<i>AB Real (m<sup>2</sup>/ha) IA10</i>	AB pr 2 (m <sup>2</sup> /ha)	27	0,027	0,797	<i>AB Real (m<sup>2</sup>/ha) IA5</i>	AB pr 1 (m <sup>2</sup> /ha)	29	0,572	0,184
	AB pr 3 (m <sup>2</sup> /ha)	27	0,024	0,807		AB pr 2 (m <sup>2</sup> /ha)	29	0,852	0,332
	AB pr 4 (m <sup>2</sup> /ha)	27	0,044	0,700		AB Hg 0,5 (m <sup>2</sup> /ha)	29	0,860	0,698
	AB Hg 2(m <sup>2</sup> /ha)	27	0,174	0,926		AB Hg 1 (m <sup>2</sup> /ha)	29	0,760	0,370
	AB Hg 4(m <sup>2</sup> /ha)	27	0,398	0,394		AB Hg 2 (m <sup>2</sup> /ha)	29	0,541	0,437
<i>AMD Real (m) IA10</i>	AMD "MPH" (m)	27	0,979	0,992	<i>AMD Real (m) IA5</i>	AMD "MPH" (m)	29	0,924	0,964

También se aplicaron los estadísticos descriptivos para las distintas muestras de AB y AMD, tanto para los valores reales como para los obtenidos por el MPH, para ambas clases de edad (Tabla 9).

**Tabla 9:** Promedios, desvío estándar, intervalo de confianza, varianza, error estándar y EAM para las variables área basal (AB; m<sup>2</sup>/ha) y Alturas (m) para IA10 e IA5, y Peso Útil con corteza (PUcc; t/ha) para IA10.

IA10							
Muestra	Promedio	n	Desvío estándar	Intervalo de confianza	Varianza	Error estándar	EAM
<i>AB real (m<sup>2</sup>/ha)</i>	27,94	27	8,21	3,10	67,33	1,79	3,45
<i>AB pr 2 (m<sup>2</sup>/ha)</i>	22,98	27	7,80	2,94	60,80	1,66	3,24
<i>AB pr 3 (m<sup>2</sup>/ha)</i>	22,88	27	7,82	2,95	61,12	1,75	3,35
<i>AB pr 4 (m<sup>2</sup>/ha)</i>	23,15	27	8,86	3,34	78,42	1,77	3,42
<i>AB Hg 2(m<sup>2</sup>/ha)</i>	24,83	27	8,36	3,15	69,85	1,72	3,32
<i>AB Hg 4(m<sup>2</sup>/ha)</i>	25,85	27	9,72	3,67	94,44	2,09	4,01
<i>Alt Media (m)</i>	19,97	27	4,08	1,54	16,67	0,77	1,47
<i>AMD real (m)</i>	22,33	27	4,12	1,55	16,96	0,8	1,54
<i>AMD MPH (m)</i>	22,31	27	4,11	1,55	16,89	0,79	1,51
<i>PUcc (t/ha)</i>	187,18	27	86,06	32,46	7406,92	18,11	34,72
IA5							
Muestra	Promedio	n	Desvío estándar	Intervalo de confianza	Varianza	Error estándar	EAM
<i>AB real (m<sup>2</sup>/ha)</i>	12,60	29	7,17	2,61	51,45	1,33	2,55
<i>AB pr 1 (m<sup>2</sup>/ha)</i>	11,64	29	5,56	2,02	30,93	1,11	2,13
<i>AB pr 2 (m<sup>2</sup>/ha)</i>	12,28	29	5,96	2,17	35,50	1,24	2,38
<i>AB Hg 0,5 (m<sup>2</sup>/ha)</i>	12,28	29	6,66	2,42	44,37	1,03	2,00
<i>AB Hg 1 (m<sup>2</sup>/ha)</i>	12,07	29	6,04	2,20	36,51	1,12	2,18
<i>AB Hg 2 (m<sup>2</sup>/ha)</i>	11,52	29	6,18	2,25	38,24	1,15	2,20
<i>Alt Media (m)</i>	3,64	29	0,92	0,33	0,84	0,17	0,33
<i>AMD real (m)</i>	12,45	29	2,88	1,05	8,29	0,53	1,02
<i>AMD MPH (m)</i>	12,97	29	2,94	1,07	8,64	0,55	1,05

A partir de estos resultados, podría afirmarse que el método angular presenta buenos resultados en comparación con los valores reales obtenidos por el método convencional para la estimación de AB en ambas clases de edad.

En el IA10, el relascopeo Haglof con FAB=2 y FAB=4 fueron los que presentaron valores medios de AB cercanos al valor real y altos valores de  $p$  en las pruebas paramétricas en comparación con los otros métodos.

En el IA5, en cambio, los valores medios de AB entre los distintos métodos son muy similares, y como se mencionó anteriormente, no existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos instrumentos según los valores de  $p$  y  $F$  en las muestras paramétricas. Por lo tanto, en principio, podría seleccionarse el que presente mayor valor medio y menor EAM ( $AB_{Hg0,5}$ ).

Así mismo, la estimación de AMD por método expeditivo presenta muy buen comportamiento en ambos Establecimientos y altos valores de probabilidad, tanto para la prueba de  $t$  como para la prueba de  $F$ , y los valores de la media, desvío estándar y EAM son muy similares a los valores reales.

- Parte III. Elección del mejor método estimativo de AB ( $m^2/ha$ ) a partir de modelos de regresión lineal.

En función del análisis anterior y buscando plantear un procedimiento de trabajo a campo que reúna las características que la Empresa solicita para todas las plantaciones, se agruparon la totalidad de las PM de cada clase de edad, para analizar la relación entre el AB real y el  $AB_{MPH_i}$  mediante el ajuste por regresión lineal.

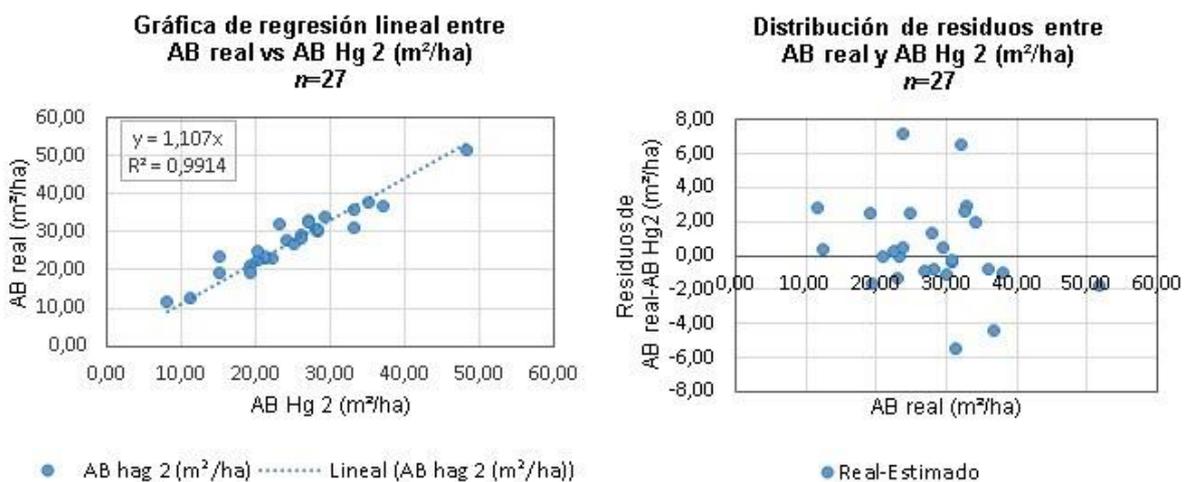
El análisis de regresión lineal se realizó con el programa Excel. De allí se obtuvieron las gráficas con sus respectivos valores de coeficientes de determinación ajustados ( $R^2_{aj}$ ), junto con la ecuación que describe la recta de regresión, la cual predice el valor de la variable a analizar (AB o AMD) por los diferentes métodos. También se calculó el error absoluto medio (EAM) para cada muestra (Tabla 10).

**Tabla 10:** Coeficientes de determinación ajustados ( $R^2_{aj}$ ) y valores de error absoluto medio (EAM;  $m^2/ha$ ) y Error %, resultantes del ajuste por regresión lineal para analizar la relación entre el AB real y los distintos métodos de estimación por MPH, tanto para IA10 como para IA5. El valor medio de AB real para la totalidad de la muestra de IA10 fue de 29,4  $m^2/ha$ . En tanto que para la muestra de IA5, el AB real arrojó un valor de 12,6  $m^2/ha$ .

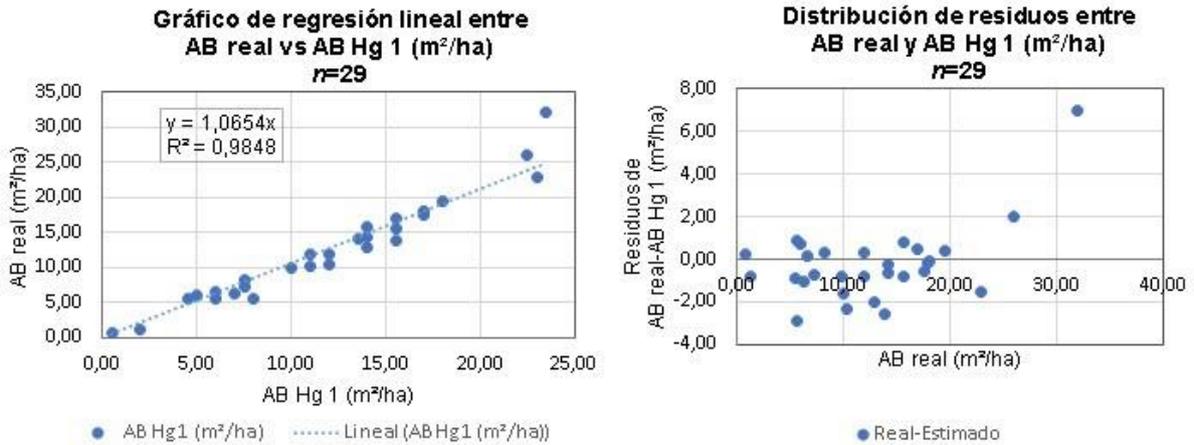
IA10					IA5				
Estimador de AB	$n$	$R^2_{aj}$	EAM	Error %	Estimador de AB	$n$	$R^2_{aj}$	EAM	Error %
<i>AB pr 2 (<math>m^2/ha</math>)</i>	27	0,984	2,52	9,01	<i>AB pr 1 (<math>m^2/ha</math>)</i>	29	0,969	1,56	12,38
<i>AB pr 3 (<math>m^2/ha</math>)</i>	27	0,978	3,12	11,16	<i>AB pr 2 (<math>m^2/ha</math>)</i>	29	0,987	1,03	8,20
<i>AB pr 4 (<math>m^2/ha</math>)</i>	27	0,963	4,15	14,85	<i>AB Hg 0,5 (<math>m^2/ha</math>)</i>	29	0,959	2,17	17,19
<i>AB Hg 2(<math>m^2/ha</math>)</i>	27	0,991	1,91	6,84	<i>AB Hg 1 (<math>m^2/ha</math>)</i>	29	0,984	1,17	9,29
<i>AB Hg 4(<math>m^2/ha</math>)</i>	27	0,962	3,83	13,70	<i>AB Hg 2 (<math>m^2/ha</math>)</i>	29	0,950	2,09	16,61

Estos resultados indican que el método angular que mejor se ajusta a los valores reales de área basal (AB; m<sup>2</sup>/ha) es el relascopio Haglof con FAB=2 para IA10 y prisma con FAB= 2 para IA5, ya que presenta un valor de R<sup>2</sup><sub>aj</sub> más cercano a 1 y un EAM menor en comparación con los otros métodos. Sin embargo, en este último caso, se recomienda el uso del relascopio Haglof con FAB= 1 para la estimación del área basal, ya que su valor de R<sup>2</sup><sub>aj</sub> y EAM es semejante al de prisma 2, y por otro lado, la mira es un instrumento mucho más accesible de conseguir en el mercado, está graduado con cuatro FABs y podría ser utilizado para ambas clases de edad.

Los gráficos del modelo ajustado y de distribución de residuos se muestran a continuación (Figuras 7 y 8).



**Figura 7:** A la izquierda: Regresión lineal entre AB real y AB<sub>M<sub>PHHg2</sub></sub> (m<sup>2</sup>/ha) para IA10 con su respectiva ecuación y R<sup>2</sup>. A la derecha: Distribución de residuos del modelo de regresión lineal AB real=1,107 \* AB<sub>M<sub>PHHg2</sub></sub> (m<sup>2</sup>/ha), según los valores estimados de AB para n=27 (IA10).

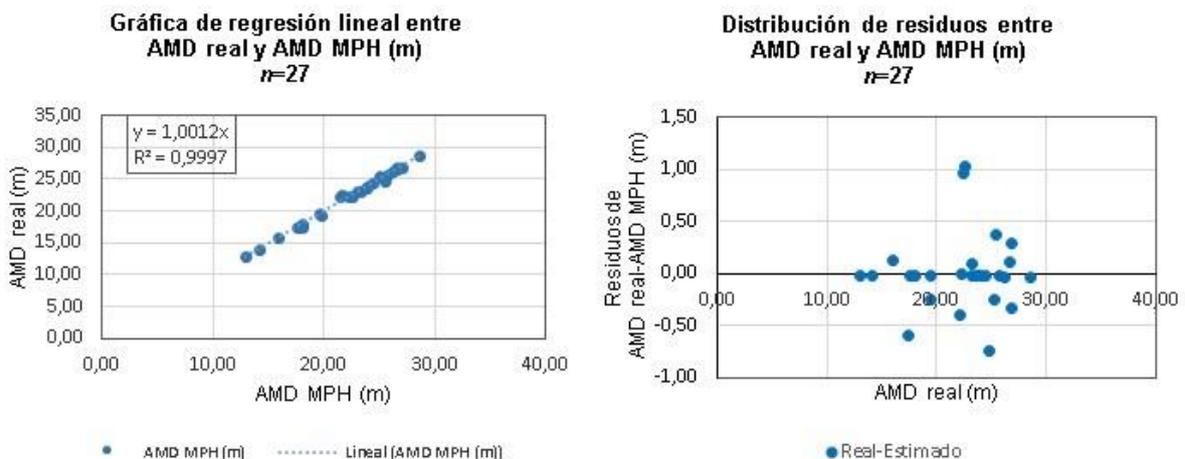


**Figura 8:** A la izquierda: Regresión lineal entre AB real y  $AB_{MPHHg1}$  (m<sup>2</sup>/ha) para IA5 con su respectiva ecuación y R<sup>2</sup>. A la derecha: Distribución de residuos del modelo de regresión lineal  $AB_{real} = 1,0654 * AB_{MPHHg1}$  (m<sup>2</sup>/ha), según los valores estimados de AB para n=29 (IA5).

En cuanto a la estimación de la AMD, se ajustó de igual manera un modelo lineal para relacionar la AMD real y la  $AMD_{MPH}$  para ambas clases de edad. Para IA10, el modelo arrojó un valor de  $R^2_{aj} = 0,991$ , un EAM=0,22 m y Error %=0,98. El modelo ajustado es el siguiente:

$$AMD_{real} (m) = 1,0012 * AMD_{MPH} (m)$$

El gráfico del modelo ajustado y de la distribución de residuos se presentan en la Figura 9.



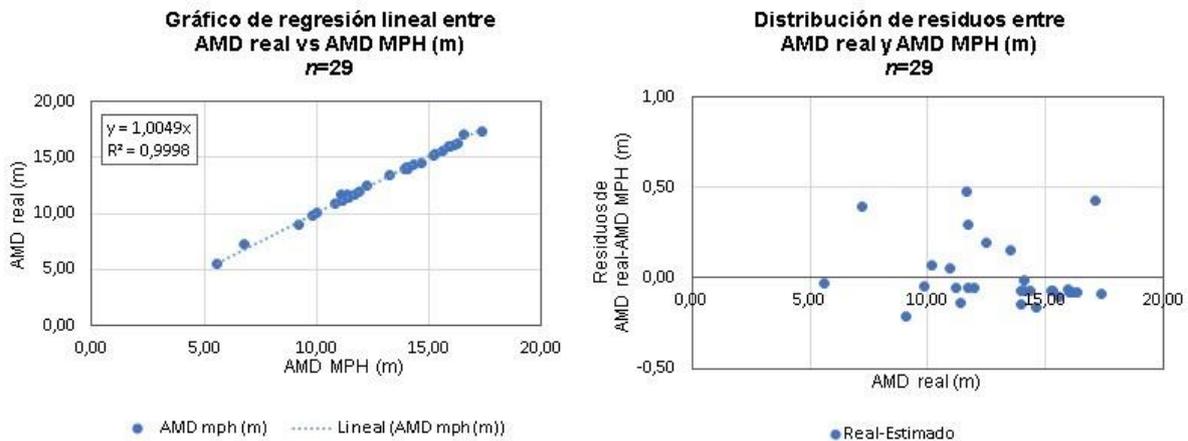
**Figura 9:** A la izquierda: Regresión lineal entre AMD real y  $AMD_{MPH}$  (m) para IA10 con su respectiva ecuación y R<sup>2</sup>. A la derecha: Distribución de residuos del modelo de regresión lineal  $AMD_{real} = 1,0012 * AMD_{MPH}$  (m), según los valores estimados de AB para n=27 (IA10).

En el IA5, el modelo de regresión lineal para la estimación de AMD (m) arrojó un valor de  $R^2_{aj} = 0,9998$ , un EAM= 0,132 m y Error %=1,01. El modelo ajustado es el siguiente:

$$\text{AMD real (m)} = 1,0049 * \text{AMD}_{\text{MPH}} \text{ (m)}$$

El gráfico del modelo ajustado y de la distribución de residuos se presentan en la Figura 10.

Si bien este modelo arroja un elevado grado de ajuste, su empleo en la práctica resulta de escasa utilidad, ya que la magnitud del error está por debajo del promedio de errores instrumentales esperables para la medición de altura total en el terreno. Así es que se recomienda el uso de la AMD estimada por el método angular en forma directa para su cálculo para ambas clases de edad.



**Figura 10:** A la izquierda: Regresión lineal entre AMD real y  $\text{AMD}_{\text{MPH}}$  (m) para IA5 con su respectiva ecuación y  $R^2$ . A la derecha: Distribución de residuos del modelo de regresión lineal  $\text{AMD real} = 1,0049 * \text{AMD}_{\text{MPH}}$  (m), según los valores estimados de AB para  $n=29$  (IA5).

- Parte IV. Determinación de Peso útil con corteza (PUcc; t/ha) mediante modelo de predicción para IA10.

Se evaluaron los diferentes modelos matemáticos señalados en el apartado correspondiente a esta sección, para determinar el que mejor predice el PUcc (t/ha) a nivel de rodal. Para ello se realizaron ecuaciones de regresión lineal utilizando como variables predictoras al  $\text{AB}_{\text{MPHHg2}}$  ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) y  $\text{AMD}_{\text{MPH}}$  (m).

Los análisis se realizaron con el programa Statgraphics y Excel, y los resultados se muestran en la Tabla 11.

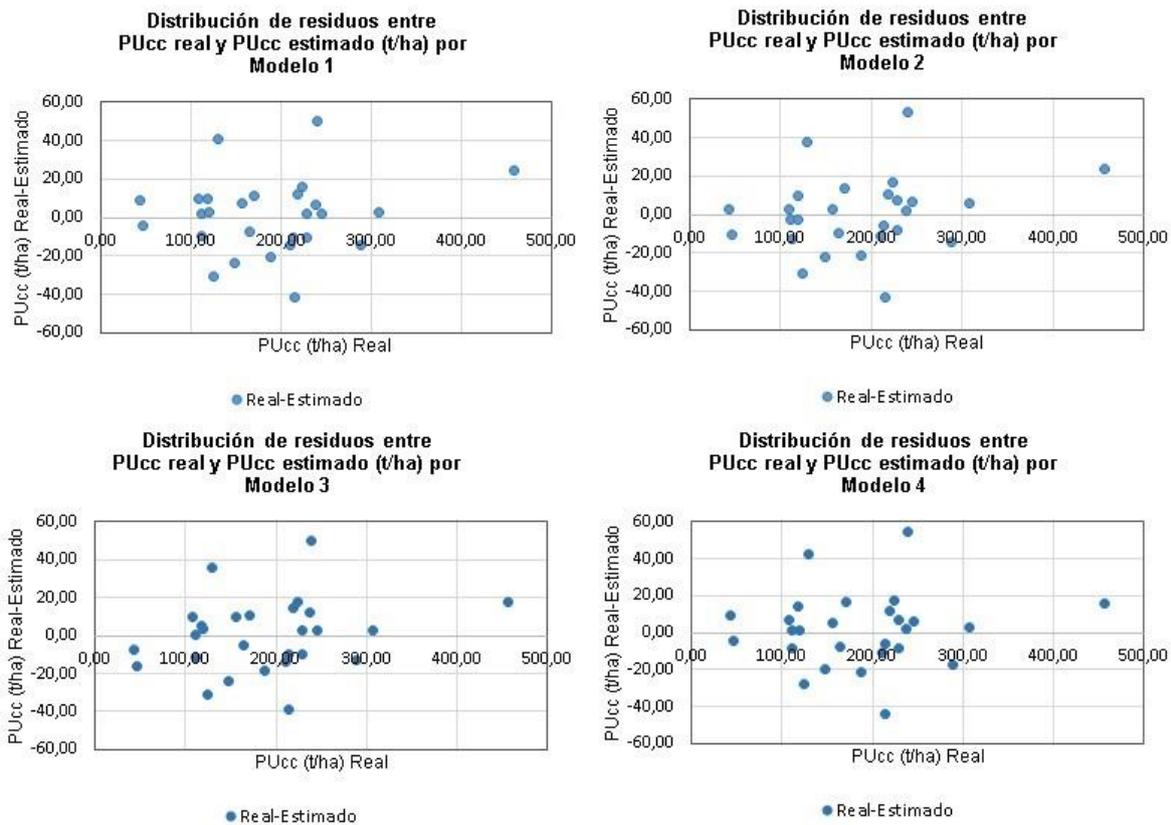
**Tabla 11:** Resultados de los coeficientes de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ), error absoluto medio (EAM; m), desviación estándar de los residuos y error % para cada modelo analizado, resultantes del ajuste por regresión lineal, para estimar el PUcc (t/ha) para el tamaño de muestra  $n=27$  (IA10). El promedio para PUcc real (t/ha) = 187,18.

Modelos Pucc (t/ha)	$R^2_{aj}$	EAM	Des.Est. de Residuos	Error %
1. Schumacher & Hall	0,943	14,70	19,72	7,9
2. Spurr	0,945	14,45	19,73	7,7
3. Variables combinadas generalizadas	0,944	14,58	19,13	7,8
4. Variante de la función estándar con factor de forma cte	0,946	14,48	19,98	7,7
5. Modelo lineal (var. Ind. AB)	0,880	24,46	29,20	13,1
6. Modelo lineal (var. Ind. H)	0,711	32,38	45,40	17,3

Como puede observarse, los modelos lineales presentan un menor grado de ajuste (valores de  $R^2_{aj}$ ) en comparación con el resto de los modelos, y valores mucho más altos de EAM y error porcentual (Error %). El error % aceptable para este tipo de muestreos ronda el 10%, razón por la cual, en este trabajo, ambos modelos lineales son descartados para la estimación del PUcc (t/ha) porque no son representativos de la realidad.

En cuanto a los modelos 1, 2, 3 y 4, se observan valores muy similares en todas las variables analizadas, pero tomamos como relevante los valores de  $R^2_{aj}$  y de EAM para su comparación, y además se analizaron los gráficos de distribución de residuos para determinar el comportamiento del error a lo largo del eje de la variable estimada, los cuales se muestran en la Figura 11.

En los cuatro modelos analizados, la distribución del error presenta un buen comportamiento, y la mayoría de los residuos se ubican en forma proporcional por encima y por debajo de la recta de referencia. Sólo se observan dos puntos que sobrepasan valores de 40 t/ha, pero en general, el error se ubica dentro del rango de las 20 t/ha.



**Figura 11:** Gráficos de distribución de residuos de los Modelos 1, 2, 3 y 4 en relación al PUcc real (t/ha), elaborados con el programa Excel.

Los valores de los parámetros, coeficientes de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ) y error absoluto medio (EAM) de los cuatro modelos de predicción, se muestran en la siguiente tabla (Tabla 12).

**Tabla 12:** Valores de los parámetros,  $R^2_{aj}$  y EAM de los cuatro modelos analizados para estimar peso útil con corteza (PUcc; t/ha) en inventario de año 10 (IA10).

Modelo	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3	Parámetro 4	$R^2_{aj}$	EAM
1	0,276317	0,91421	1,13739	-	0,943	14,7
2	8,06734	0,308873	-	-	0,945	14,45
3	43,1625	-3,19833	-0,786442	0,415561	0,944	14,58
4	0,320364	-	-	-	0,946	14,48

El Modelo 4 de “Variante de la función estándar con factor de forma constante” y el Modelo 2 de “Spurr o de Variable Combinada” presentan los mayores valores de  $R^2_{aj}$ , menores valores de EAM y Error %. Por lo tanto, se afirma que ambos modelos tienen una gran posibilidad de selección por su buen ajuste. Pero también el Modelo 1 de “Schumacher & Hall” viene siendo muy utilizado en la

estimación de volúmenes de madera y es comprobadamente confiable su estimación. Además, dado que las variables predictoras fueron más de una y dicho Modelo representa a la variable dependiente (PUcc; t/ha) y a las variables independientes ( $AB_{MPHHg2}$ ; m<sup>2</sup>/ha y  $AMD_{MPH}$ ; m) que se ajustan a una regresión lineal con altos valores de correlación y parámetros pequeños, también este Modelo puede ser seleccionado para la estimación del PUcc (t/ha).

De la utilización de estos modelos en un muestreo precosecha como el de este trabajo, puede esperarse que la estimación del rendimiento, expresado en peso útil con corteza (PUcc; t/ha) tenga un error promedio del 7,7%. Estos modelos son:

1.  $PUcc (t/ha) = 0,320364 * (AB_{MPHHg2} * AMD_{MPH})$  [Modelo 4]
2.  $PUcc (t/ha) = 8,06734 + 0,308873 * (AB_{MPHHg2} * AMD_{MPH})$  [Modelo 2]
3.  $PUcc (t/ha) = 0,276317 * (AB_{MPHHg2})^{0,91421} * (AMD_{MPH})^{1,13739}$  [Modelo 1]

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, podemos concluir que el método angular utilizado (MPH) para la estimación de área basal ( $AB$ ; m<sup>2</sup>/ha) y altura media dominante ( $AMD$ ; m), refleja un buen comportamiento en comparación con el método tradicional de parcelas convencionales, tanto en el Delta como en la región continental para ambas clases de edad. Además, presenta la ventaja de hacer operativamente más rápido el relevamiento en el campo, siempre y cuando las condiciones del sotobosque lo permitan.

Para ello, es importante que el rodal se encuentre lo más limpio posible al momento de hacer el relevamiento, ya que la presencia de malezas herbáceas y leñosas dificultan el normal desplazamiento de los operarios dentro de la parcela, lo cual hace el trabajo más tedioso y con mayores períodos de tiempos muertos, además de proporcionar mayores errores en cuanto a las estimaciones de las variables porque se obstaculizan las visuales de los fustes. Si las malezas son altas y están junto a los árboles, uno de los operarios debe correrlas o cortarlas con machete para que el otro realice la estimación del  $AB$  con el relascopio o el prisma, y esto demanda mucho tiempo.

Es recomendable en estos casos, disminuir la presencia de malezas anticipadamente a la realización del trabajo, ya sea con control químico, mecánico con rolo o rastra de discos, manual con machete o incorporando el ganado para

controlar la pastura. Por otro lado, la presencia de agua en los rodales, sobre todo en el Delta, también hace que el desplazamiento sea más lento y los operarios deben moverse con mayor cuidado.

En el Establecimiento “María Dolores”, las plantaciones son más homogéneas, tanto en especie como en calidad de sitio, es decir, sin presencia de impedimentos (malezas o anegamientos), lo cual facilita el trabajo operativo.

En ambos casos se introduce el ganado en rodales mayores de 2 años, permitiendo un manejo de la pastura durante la época invernal antes del rebrote, sin necesidad de aplicar algún tratamiento físico-mecánico o químico para su control. De esta manera se obtienen beneficios en cuanto al rendimiento del animal, protección contra incendios forestales al bajar la carga combustible, abonado del suelo naturalmente, limpieza del rodal que favorece la entrada de maquinaria, e ingresos económicos para la empresa antes del turno de corta.

En los rodales con rebrotes de plantación sin conducción, la estimación del AB con ambos instrumentos también resulta dificultada, ya que los fustes se superponen unos con otros y desde el centro de parcela no se puede delimitar exactamente la visual.

En cuanto a los instrumentos, el prisma tiene la ventaja de ser más cómodo al momento de realizar las visuales en comparación al relascopio Haglof. Pero cada lente contiene un solo FAB y es más costoso de adquirir. El relascopio tiene como desventaja que, al momento de hacer la estimación, se pueden confundir las visuales de los fustes dependiendo de la incidencia de la luz. Pero, en la misma mirilla contiene cuatro FABs, lo cual permite realizar ambos inventarios.

Para la estimación de área basal en las plantaciones y rebrotes de 10 años de edad, el método angular (MPH) utilizando el relascopio Haglof con FAB=2 ( $AB_{MPHHg2}$ ), presentó el mejor desempeño en comparación al prisma y a los diferentes FABs analizados, en relación al valor real de AB obtenido por el método convencional. El valor del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ) que arrojó el modelo lineal fue de 0,991, con un EAM=1,91 y un error porcentual medio del 6,84%. El modelo que predice el AB real ( $m^2/ha$ ) para plantaciones y rebrotes de 10 años de edad a partir de la variable predictora es:

$$AB \text{ real } (m^2/ha) = 1,107 * AB_{MPHHg2} (m^2/ha)$$

Para las plantaciones y rebrotes de 5 años de edad, el prisma con FAB=2 ( $AB_{MPHpr2}$ ) y el relascopio Haglof con FAB=1 ( $AB_{MPHHg1}$ ), fueron los instrumentos que presentaron los mayores valores de  $R^2_{aj}$  y menor EAM y Error% en los modelos de regresión lineal ( $R^2_{aj}= 0,987$ , EAM=1,03 y E%=8,2 para  $AB_{MPHpr2}$ ;  $R^2_{aj}=0,984$ , EAM=1,17 y E%=9,29 para  $AB_{MPHHg1}$ ). Sin embargo, se recomienda este último, ya que la diferencia es poco relevante, el relascopio es más accesible de adquirir y puede utilizarse para la estimación del área basal en ambas clases de edad. El modelo que predice el AB real ( $m^2/ha$ ) en plantaciones y rebrotes de 5 años, es el siguiente:

$$AB \text{ real } (m^2/ha) = 1,0654 * AB_{MPHHg1} (m^2/ha)$$

En cuanto a la estimación de la altura media dominante (AMD; m), el método angular de selección visual de los tres árboles más gruesos cercanos al punto de observación dentro la parcela y su posterior medición de altura ( $AMD_{MPH}$ ), arrojó valores de  $R^2_{aj}$  muy cercanos a 1, EAM y Error % bajos en relación al valor real obtenido en las parcelas convencionales, en ambas clases de edad ( $R^2_{aj}=0,991$ , EAM=0,22 y E%=0,98 para IA10, y  $R^2_{aj}=0,999$ , EAM=0,132 y E%=1,01 para IA5). La magnitud de estos errores está por debajo del promedio de errores instrumentales esperables durante el relevamiento a campo. Por lo tanto, el valor estimado de  $AMD_{MHP}$  puede utilizarse de manera directa, sin el empleo de la ecuación obtenida.

Para la estimación del rendimiento por hectárea (PUcc; t/ha) en plantaciones precosecha, se evaluaron y ajustaron seis modelos diferentes convencionalmente utilizados para calcular el volumen del árbol individual. Entre ellos, dos modelos lineales en cuya ecuación incorpora solo una de las variables predictoras.

A partir de los resultados del ajuste de los modelos en relación al valor real del PUcc (t/ha) obtenidos de las parcelas convencionales, se recomienda el uso del modelo de "Variante de la función estándar con factor de forma constante" (Kershaw, Jr., et. al., 2016) y el modelo de "Spurr" (Fernández Tschieder et. al., 2011) por presentar los mayores valores de  $R^2_{aj}$ , menor EAM y por su simplicidad de uso. Dichos modelos son:

- $PUcc (t/ha) = 0,320364 * (AB_{MPHHg2} * AMD_{MPH})$  [Modelo 4]
- $PUcc (t/ha) = 8,06734 + 0,308873 * (AB_{MPHHg2} * AMD_{MPH})$  [Modelo 2]

El error porcentual esperado a partir de la utilización de estos modelos es de 7,7%.

En el IA10 la intensidad de muestreo fue de 1 PM:8,10 ha de plantación (0,21% del total de la superficie) y se obtuvo un error del 18,55% para la estimación del rendimiento (PUcc; t/ha). Dicho valor está por encima del error admisible en muestreos de tipo aleatorios simples (10%), como el realizado en este trabajo, por lo tanto, se recomienda aumentar la intensidad de manera progresiva hasta llegar a un valor deseable.

En el IA5 la intensidad de muestreo fue de 1 PM: 6,19 ha de plantación (0,29% del total de la superficie) y el error porcentual del AB (m<sup>2</sup>/ha) fue de 20,19%. Por lo tanto, debería aumentarse la intensidad de muestreo en este caso a 1PM: 2 ha, por ejemplo, y evaluar el comportamiento del error.

Para la realización de este trabajo no se calcularon los tiempos operativos de relevamiento en campo de las variables AB y AMD por MPH, pero se estima, que en condiciones favorables de terreno, un operario puede tardar entre 10 y 15 minutos una vez establecido el centro de parcela. Es recomendable realizar los inventarios durante el receso invernal, ya que las plantas se encuentran en reposo (sin follaje), facilitando las visuales. El momento del día indicado para realizar el trabajo en el campo, es desde que sale el sol hasta antes del atardecer, ya que la luz va menguando, y se confunden las visuales con el color de los fustes si no hay un contraste detrás.

El procedimiento de trabajo y los análisis correspondientes para llevar adelante ambos inventarios en cualquiera de los Establecimientos de la Empresa, se resumen en un Manual de Procedimientos bajo el título de “Protocolo de muestreo con parcelas temporarias en rodales de cinco y diez años de edad en plantaciones de Salicáceas de la Empresa Papel Prensa S.A.I.C.F. y M.”.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**Achinelli, F.G.** 2006. Silvicultura de álamos y sauces en la Pampa Húmeda. Actas de las I Jornadas Argentinas de Salicáceas, Buenos Aires, Argentina, pp:21-36.

**Aguerre, M., Denegri, G.A., & Acciaresi, G.** 2019. Políticas de promoción sectorial en Argentina: el caso de las plantaciones forestales y la conformación del sector forestoindustrial. Revista de Perspectivas de Políticas Públicas. 8 (16). FCAyF, Universidad Nacional de La Plata, pp:329-363. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/115572> Último acceso: septiembre 2021.



- Álvarez, R., Leavy, S., & Marino, M.** 2009. Zonas agroeconómicas homogéneas Buenos Aires Norte. Proyecto: Economía de los Sistemas de Producción, Caracterización y Prospectivas. Buenos Aires. INTA. Disponible de: <http://inta.gob.ar/.../zonas-agroeconómicas-homogéneas-buenos-aires-norte> Último acceso: agosto 2021.
- Arano, A., & Casaubón, E.** 2006. Ganadería en sistemas silvopastoriles del Delta del Paraná. Agromercado-Producción animal. EEA INTA Delta del Paraná. No 117 (marzo 2006), pp:12-15.
- Área SIG e Inventario Forestal. Dirección de Producción Forestal, MAGyP.** 2021. Inédito.
- Balzarini, M., Di Rienzo, J., Tablada, M., Gonzalez, L., Bruno, C., Córdoba, M., Robledo, W., & Casanoves, F.** 2015. Estadística y Biometría: Ilustraciones del uso de InfoStat en problemas de agronomía. Ed. Brujas. Argentina. 390 pp.
- Borodowski, E.** 2014. Situación de las Salicáceas en Argentina. Actas Jornadas de Salicáceas 2014. Cuarto Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. Presentación, 21 pp.
- Borodowski, E., Signorelli, A., & Battistella, A.** 2014. Salicáceas en el Delta del Paraná: situación actual y perspectivas. Actas Jornadas de Salicáceas 2014. Cuarto Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. Disertación, 13 pp.
- Cortizo, S., Cerrillo, T., Thomas, E. & Monteverde, S.** 2015. Subprograma Salicáceas (*Salix* y *Populus*). En. Domesticación y Mejoramiento de especies forestales. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Unidad para el Cambio Rural. Proyecto Forestal BIRF, 7520, pp:85-112.
- da Cunha, T.A., & Guimarães Finger, C.A.** 2008. Selección del factor de área basal del relascopio de Bitterlich para el muestreo de un rodal de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 5(15), pp:34-44.
- Fernández Tschieder, E., Fassola, H., García Cortés, M.** 2011. Ecuación de volumen total para *Populus deltoides* de plantaciones del bajo Delta del Paraná. RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, 37 (2), pp:172-179.
- InfoStat.** 2008. Manual de usuario, versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 334 pp.
- Kershaw Jr., J.A, Ducey, M.J., Beers, T.W., & Husch, B.** 2016. Forest mensuration. 5th Edition. Chichester, Inglaterra. Wiley-Blackwell. 630 pp.



- Pezzutti, R.** 2014. Silvicultura sitio específica, una herramienta para ajustar el manejo a la capacidad productiva del sitio. XXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Octubre 2014, INTA Concordia, Argentina, pp:1-12.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P.** 1997. Mensura Forestal. Ed. Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible. Costa Rica. 586 pp.
- Romahn de la Vega, C.F.** 1999. Relascopeía. Una técnica de medición forestal. Ed. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales, México. 116 pp.
- Suárez, E. A. & Garcia Volonté, R.** 1993. Tablas de volumen para álamos del Delta Bonaerense. Primer Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Comisión 4: Ciencia y técnica aplicada. Paraná, Entre Ríos, Argentina; pp:266-272.
- Ubeda, L.** 1985. Rentabilidades comparadas de forestaciones de álamos en el Delta del Paraná y zona medanosa de la provincia de Buenos Aires. Cátedra de Administración Rural, FAUBA, (16), 56 pp.
- Wessa, P.** 2021. Software de estadísticas gratuito, Office for Research Development and Education, versión 1.2.1, URL <http://www.wessa.net/> Último acceso: julio 2021.