

Antecedentes de *Paulownia elongata x fortunei* para la producción de bioenergía



Universidad de Concepción



PROYECTO GENÉTICO
Miscanthus & Paulownia
Programa de Bioenergía



Editores

Fernando Muñoz - Jorge Cancino

Antecedentes de *Paulownia elongata x fortunei* para la producción de **bioenergía**

Fernando Muñoz
Jorge Cancino
Editores

Edición de Texto y Estilo
Ana José Cobar-Carranza

Diseño y Diagramación
Espiga Comunicación Creativa

Imprenta
Ícaro Impresores Ltda.

Octubre de 2014



Editores



Fernando Muñoz Sáez

*Ingeniero Forestal, Mg., Dr.
Profesor Asociado
Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Concepción*

*Correo: fmunoz@udec.cl
Victoria 631, barrio universitario
Concepción, Chile*



Jorge Cancino Cancino

*Ingeniero Forestal, Mg., Dr.
Profesor Asociado
Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Concepción*

*Correo: jcancino@udec.cl
Victoria 631, barrio universitario
Concepción, Chile*

Presentación del libro



La generación de energía desde fuentes renovables es un gran desafío que debe enfrentar Chile. La Universidad de Concepción no ha estado ajena a esta situación, por ello ha desarrollado diversas investigaciones especialmente en la generación de energía a base de biomasa, que ha permitido valorar energéticamente este recurso.

Para enfrentar el desafío de entregar suministro de biomasa permanente y suficiente al mercado de la generación de energía, la Universidad de Concepción se adjudicó el proyecto titulado “Introducción y evaluación del cultivo de *Miscanthus* y *Paulownia* como fuente de biomasa lignocelulósica para la generación de energía renovable en la zona centro sur de Chile”, presentado al Programa de I+D en Bioenergía del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef). El proyecto se desarrolló entre diciembre del año 2010 y mayo del 2014, permitiendo obtener importantes resultados para el uso de nuevas especies en cultivos dendroenergéticos.

La relación que la Universidad de Concepción posee con empresas e instituciones ha permitido que este proyecto cuente con el apoyo de 14 entidades, 11 empresas y 3 instituciones, tres de ellas extranjeras, lo cual agradecemos. También ha sido fortalecida la formación de nuevos profesionales e investigadores en bioenergía con la participación de estudiantes de pre y postgrado de la Facultad de Ciencias Forestales, ya sea realizando sus trabajos de titulación o graduación o colaborando en las distintas etapas de desarrollo del proyecto.

Este libro, elaborado por el equipo de investigadores y colaboradores, a quienes junto con agradecer los invita a seguir contribuyendo con nuevas ideas y proyectos, reafirma nuestro compromiso como Universidad de Concepción de incentivar el establecimiento de más y mejores cultivos para la producción de biomasa para uso en la generación de energía y con ello contribuir al desarrollo de la región y el país.

Dr. Bernabé L. Rivas
Vicerrector
Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo
Universidad de Concepción

Equipo de investigación

Equipo directivo

Dr. Fernando Muñoz Sáez, Director del proyecto
Dr. Jorge Cancino Cancino, Sub Director
Dr. Eduardo Acuña Carmona, Investigador
Dr. Miguel Espinosa Bancalari, Investigador
Dr. Rafael Rubilar Pons, Investigador
Ingeniero Forestal Luis Cerda Martínez, Investigador

Asistente Técnico

Ingeniero Forestal Cynthia Labraña Gutiérrez

Estudiantes tesistas

Agustín Jiménez Fernández, pregrado ETS de Montes (España)
David Salguero Ávila, Programa Magíster, Facultad Ciencias Forestales
María Eugenia Hinojosa Rodríguez, pregrado Ingeniería Forestal
Oscar González Araya, pregrado Ingeniería Forestal
Viviana Flórez Uribe, Programa Doctorado, Facultad Ciencias Forestales

Estudiantes colaboradores

Bárbara Henríquez Henríquez, estudiante Ingeniería Forestal
Carlos Soto de la Vega, estudiante Ingeniería Forestal
Carlos Valenzuela Castillo, estudiante Ingeniería Forestal
César Carrasco Campos, estudiante Ingeniería Forestal
Daniela García Figueroa, estudiante Ingeniería Forestal
Fabián San Martín Vásquez, estudiante Ingeniería Forestal
Fernando Sepúlveda Sánchez, estudiante Ingeniería Forestal
Francisco Rivera Irrázabal, estudiante Ingeniería Forestal
Francisco Riquelme Vejar, estudiante Ingeniería Forestal
Gerson Riffo Catril, estudiante Ingeniería en Biotecnología Vegetal
Giordano Jaque Caro, estudiante Ingeniería Forestal
Guido Ruíz Riquelme, estudiante Ingeniería Forestal
James Iturrieta Berríos, estudiante Ingeniería Forestal
Julio García Ramírez, estudiante Ingeniería Forestal
Malu Nahuelpi Pino, estudiante Ingeniería Forestal
Leonardo Muñoz Vega, estudiante Ingeniería Forestal
Paola Gavilán Cárdenas, estudiante Ingeniería Forestal
Rosa Zapata Robles, estudiante Ingeniería Forestal
Waldo Oviedo Quinteros, estudiante Ingeniería Forestal

Agradecimientos

Los investigadores agradecen a las siguientes entidades que apoyaron el proyecto.

Asociación de Municipalidades de la Región del Biobío
Eléctrica Nueva Energía S.A.
Ingeniería y Desarrollo Forestal S.A., Indef
Inversiones Quelén Quelén S.A.
John O’Ryan Surveyors
Masisa S.A.
Papelera Norske Skog Biobío Ltda
Planta S.A., España
Proyersa Energía S.A. Chile
Río Claro Ltda.
Sociedad Agrícola y Forestal La Fortuna Ltda – Cambium Ltda.
Universidad de Santiago de Compostela, España
Universidad Politécnica de Madrid, España
Vivero Piedra del Águila E.I.R.L.

A la Universidad de Concepción y al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef) que dieron soporte financiero al proyecto.

Un especial agradecimiento a los académicos e investigadores Dr. Roque Rodríguez de la Universidad de Santiago de Compostela (España) y Dr. Francisco Marcos de la Universidad Politécnica de Madrid (España).



Contenido

1.	Introducción	10
2.	Descripción de la especie	12
2.1	Generalidades	13
2.2	Distribución y características edafoclimáticas	13
2.3	Producción de plantas y establecimiento	15
2.4	Aspectos biológicos y manejo del cultivo	16
2.5	Crecimiento y rendimiento del cultivo	17
2.6	Daños bióticos y abióticos	17
2.7	Propiedades y usos de la madera	19
3.	Objetivos del proyecto	20
4.	Metodología	21
4.1	Descripción de los sitios de ensayo	21
4.2	Multiplicación del material genético utilizado	30
4.3	Preparación de sitio	31
4.4	Plantación y establecimiento de <i>Paulownia elongata x fortunei</i>	33
4.5	Diseño experimental en plantación	35
4.6	Mediciones realizadas	35
5.	Resultados	38
5.1	Protocolos de propagación de material genético	39
5.2	Evaluación del crecimiento del cultivo	43
5.3	Rendimiento de biomasa	48
5.4	Caracterización energética	50
5.5	Etanol	54
5.6	Pélets	55
6.	Conclusiones	56
7.	Bibliografía	58
8.	Anexo Fotográfico	60

Introducción



1. Introducción

La generación de energía desde fuentes renovables es un gran desafío que debe enfrentar Chile. Por esta razón el Estado de Chile, a través de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Conicyt), ha impulsado la investigación en nuevas fuentes de energía renovable. Así nació el Programa de I+D en Bioenergía del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef) en colaboración con la Comisión Nacional de Energía (CNE), que buscaba fomentar la búsqueda de soluciones para incorporar con fuerza a la bioenergía en la matriz energética nacional. En su primer llamado a concurso, la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción se adjudicó el proyecto titulado “Introducción y evaluación del cultivo de *Miscanthus* y *Paulownia* como fuente de biomasa lignocelulósica para la generación de energía renovable en la zona centro sur de Chile” (FONDEF B09I 1008). El proyecto, que se desarrolló entre diciembre del año 2010 y mayo del año 2014, presentó como objetivo “Desarrollar una nueva alternativa de producción de biomasa lignocelulósica para su uso en la cogeneración de energía y elaboración de biocombustibles”. Para ello consideró establecer y manejar plantaciones, a base de material de alta calidad genética (clones) de *Miscanthus x giganteus* y *Paulownia elongata x fortunei*. El material fue importado desde Italia y España para la producción de biomasa lignocelulósica en sitios marginales de la zona centro sur de Chile, evaluando la biomasa producida, así como, sus propiedades energéticas según distintos esquemas de establecimiento.

El presente documento resume, en una primera parte, información de *Paulownia elongata x fortunei*, su origen, ecología, condiciones de crecimiento, información sanitaria y condiciones de establecimiento. En una segunda parte, se detalla la instalación de las parcelas experimentales en la zona centro sur de Chile, metodologías utilizadas, tanto para su establecimiento como las mediciones y determinaciones realizadas. En una tercera parte, se entregan los principales resultados de la investigación.

Cabe hacer notar que parte de la información que se entrega es común para los ensayos de *Paulownia elongata x fortunei* y *Miscanthus x giganteus*, especialmente en lo referido a la descripción de los sitios de ensayo y las actividades de preparación realizadas (roce, control de malezas, cerco, entre otras).

Descripción de la especie



2. Descripción de la especie

2.1 Generalidades

Paulownia elongata x fortunei, conocida por su nombre común "Kiri", es una especie decidua de rápido crecimiento, perteneciente a la familia de las *Paulowniaceae*, única familia mono genérica del orden *Lamiales*, clase *Magnoliopsida*. En un principio, el género fue ubicado en la familia *Bignoniaceae* y luego en la familia *Scrophulariaceae*, sin embargo se determinó mediante estudios moleculares que el género debía conformar una familia propia (Olmstead et al., 2001).

Es originaria de China, y ha sido cultivada ampliamente por más de 3.000 años con fines madereros (Bergmann y Moon, 1997). El género *Paulownia* posee diecisiete especies, siete de ellas originarias de China, *i.e.* *Paulownia elongata* S.Y. Hu, *Paulownia fortunei* (Seem.) Hemsl., *Paulownia kawakamii* T. Itô, *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud., *Paulownia catalpifolia* T. Gong, *Paulownia taiwaniana* T.W. Hu & H.J. Chang, *Paulownia fargesii* Franch (Hong et al., 1998). Entre las especies se han creado clones híbridos, de forma natural y artificial, incapaces de producir semillas viables (Silvestre et al., 2005), los cuales se adaptan a gran variedad de climas y suelos, con amplios rangos de temperatura y precipitación, y buen desempeño en suelos pobres (Kasamaki, 2007).

P. elongata x fortunei posee hojas simples, opuestas, de hasta 80 cm de ancho, margen entero y hojas con cinco lóbulos, características que la distinguen de otras especies. Su corteza es de color gris claro, los árboles jóvenes poseen lenticelas y luego forma grietas longitudinales. Las flores son racimos terminales de aproximadamente 40 cm de largo, con cáliz carnoso, acompañado de cinco lóbulos asimétricos (Figura 1). El interior de la flor es de color violáceo a púrpura, y posee cuatro estambres y un pistilo un poco más largo que los estambres. Sus frutos son cápsulas bivalvas de 6 a 10 cm de largo, y semilla alada en forma de mariposa.

2.2 Distribución y características edafoclimáticas

El género *Paulownia* crece de forma natural en China. Los primeros registros de su expansión por Europa datan del año 1712, cuando fue introducida en Holanda, Francia, Estados Unidos, Austria, Italia y Australia (Barton et al., 2007). Se introdujo en Japón y Corea hace 1000 años, y actualmente se distribuye también a lo largo de Argentina, Bélgica, Brasil, Canadá, Camboya, Colombia, España, India, Indonesia, Inglaterra, Israel, Italia,

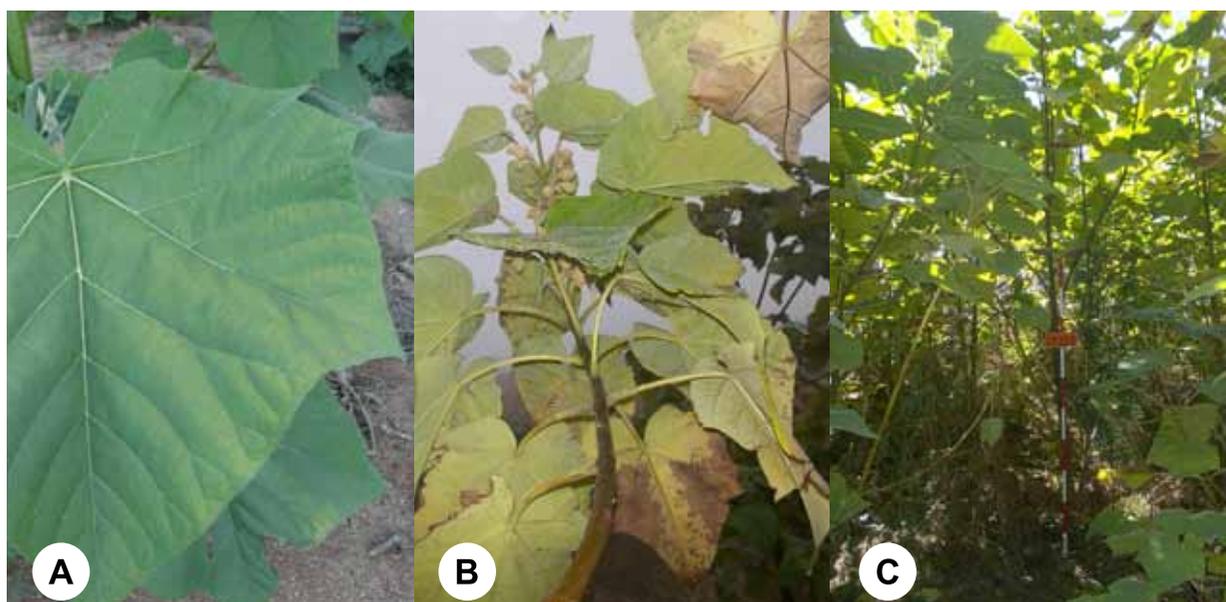


Figura 1. Características morfológicas de *P. elongata x fortunei* en plantaciones experimentales creciendo en Chile (Región de Biobío). A) Forma de la hoja B) Formación de semillas. C) Desarrollo fustal.

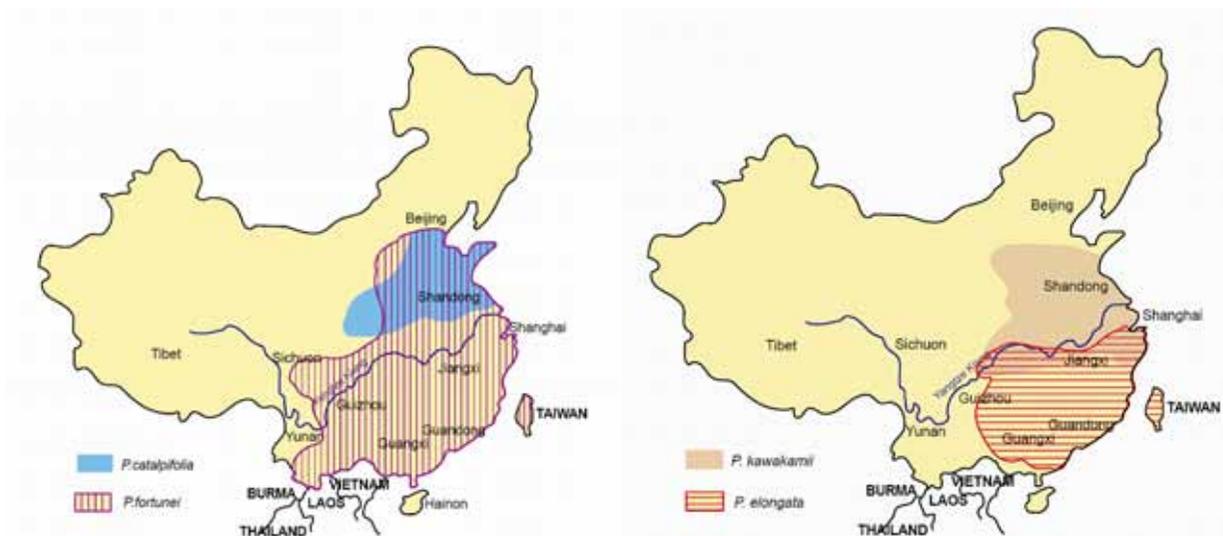


Figura 2. Distribución geográfica natural de las especies precursoras del clon híbrido *P. elongata x fortunei* (Barton et al., 2007).

Laos, Vietnam, México, Nueva Zelanda, Portugal, Taiwán y Turquía. La especie ha sido ampliamente plantada con fines madereros para ser exportada a China. En Chile se establecieron ensayos de *Paulownia sp.* en el año 2010 en la Región de Antofagasta, para obtener biomasa para la producción de energía.

Todas las especies y clones de este género, son similares en apariencia y propiedades de la madera. Sin embargo, el clon *P. elongata x fortunei*, se diferencia por corresponder a un híbrido natural que combina en su genotipo las características de dos especies destacadas por su gran crecimiento, adaptabilidad a diferentes tipos de sitios, resistencia a la sequía y a las bajas temperaturas (Figura 2) (Hua et al., 1986).

Las condiciones medioambientales en la distribución natural de *P. elongata x fortunei* correspon-

den a temperaturas que van desde los 12 a 23 °C, precipitaciones media anuales entre 600 y 2.500 mm y entre 600 y 1.500 m.s.n.m. (Tabla 1). El rango óptimo de temperatura para su crecimiento se encuentra entre los 24 y 29 °C (Van de Hoef, 2003).

El género *Paulownia* crece en un amplio rango de tipos de suelos, pero se desarrolla bien preferiblemente en suelos profundos, con menos de 25% de arcilla, y más de 50% de porosidad, menos del 1% de salinidad, y pH entre 5 y 8,9. Puede crecer en suelos poco fértiles, siempre y cuando la textura y el drenaje del suelo sean favorables. La aplicación de fertilizantes, preferiblemente a base de nitrógeno, favorece su crecimiento (Hua et al., 1986).

Tabla 1. Ecología y distribución de *P. elongata* y *P. fortunei* en China (Hua et al., 1986).

Especie	Distribución			Temperatura (°C)			Precipitación (mm)	Suelo	
	Lat. (N)	Long. (E)	m.s.n.m	Max.	Media	Min.	Media anual	pH	Textura
<i>P. elongata</i>	28 - 36	112 - 120	1.200	40	12 - 17	-15	600 - 1500	5 - 8.5	Franco arenoso
<i>P. fortunei</i>	18 - 30	105 - 122	1100	40	15 - 23	-10	1.200 - 2.500	4.5 - 7.5	Arcillo arenoso

2.3 Producción de plantas y establecimiento

Los clones híbridos de *P. elongata x fortunei* se reproducen a través de macro y micro propagación de tejidos. Esto incluye reproducción a partir de esquejes de raíz o mediante multiplicación in vitro (Figura 3).

Las características del tejido, el medio de cultivo, el tipo de estimulador del crecimiento y su concentración en los medios de cultivo, tienen un efecto significativo sobre la propagación de brotes y la producción de raíces. *P. elongata x fortunei* puede reproducirse desde segmentos foliares, nodales y de raíz, pero la multiplicación vegetativa a partir de segmentos internodales, suele ser muy eficiente. La tasa de regeneración usando explantes internodales puede alcanzar hasta el 83% obteniendo hasta 2 brotes por explante; en comparación con el uso de explantes de segmentos peciolares, los cuales pueden alcanzar tasas de regeneración de hasta el 53% con cerca de 0,62 brotes por explante. Para el primero se usa una combinación de 4 mg/L de 6 - benciladenina (BA) y 0,2 mg/L de ácido naftalenacético (ANA)

para estimular su crecimiento, mientras que para el segundo se utiliza una mezcla de 7 mg/L de BA y 0,2 mg/L de ANA (Castillo et al., 2012). Castellanos et al. (2006) evaluó el efecto del medio de cultivo, el regulador de crecimiento y el tipo de explante sobre la organogénesis indirecta de *P. elongata*, y el efecto de diferentes tipos de enraizadores i.e. químicos, físicos y biológicos, sobre la producción de raíces de los explantes, encontrando que la reproducción a partir de tejidos peciolares se puede mejorar tanto o más que al usar tejidos internodales, con la aplicación de 10 mg/L de BA y 0,5 mg/L de ANA en un medio de cultivo Murashige y Skoog (MS). El mejor tratamiento para el enraizamiento, se presenta usando enraizadores químicos como el AIB (ácido indolbutírico) a una concentración de 1,5 mg/L; obteniendo de esta forma, mayor número de raíces y hojas por explante, y plantas de mayor altura.

La multiplicación vegetativa a partir de esquejes de raíz también resulta ser una técnica adecuada para la multiplicación de este clon híbrido (Sosa



Figura 3. Multiplicación in vitro en Chile de *P. elongata x fortunei*. A) y B) Enraizamiento de esqueje en medio de cultivo. B) Secuencia de desarrollo de *P. elongata x fortunei* – clon libre, vivero Proplantas-Quinchamalí, agosto 2011.

y Ramos, 2004). Para la obtención de brotes de *P. elongata* se recomienda usar cortes de esquejes de raíz de aproximadamente 5 a 6 cm de largo y 1,25 – 2,5 cm de diámetro, puestas en bandejas enraizadoras con arena como sustrato. Luego se trasladan a bolsas plásticas con una mezcla de tierra + arena + compost en proporciones de 1:1:1.

En algunos casos, la reproducción puede realizarse directamente en terreno, para lo cual se usan esquejes de raíz de 10 cm de largo y 3 cm de diámetro, y se plantan directamente en terreno; sin embargo la sobrevivencia es baja.

En Estados Unidos, las plántulas de *Paulownia* producidas más comúnmente para el establecimiento de plantaciones, provienen de esquejes de raíz, las cuales son cultivadas en invernadero, en contenedores, tubos, macetas de turba o envases de polietileno (plástico). Los esquejes de raíz cuentan con la ventaja de poder ser producidas en menor tiempo, que las plántulas provenientes de multiplicación in vitro.

La inducción de yemas adventicias es otra alternativa de multiplicación de *Paulownia* (Corredoira et al., 2010). La formación de brotes también se puede obtener de forma directa, por medio de la inducción de yemas adventicias en medios de cultivo con tiazurón (TDZ), la cual permite no sólo diferenciar el origen de las yemas para procesos de mejoramiento genético, sino que además permite obtener buen número de brotes, con buen tamaño, en menos tiempo, aproximadamente 10 días. Una desventaja de este método, es que los explantos pueden producir exudados que provocan la muerte de los tejidos y reducen la tasa de sobrevivencia de los brotes; para disminuir esto, los explantos se someten a periodos cortos de oscuridad. Este procedimiento también permite el desarrollo de brotes adventicios a partir de segmentos foliares, procedentes de árboles maduros (Ipekci y Gozukirmizi, 2004; Corredoira et al., 2008); donde la regeneración óptima de los brotes se obtiene en medios de cultivos TDZ con la aplicación de 2,9 µM de AIA (ácido indolacético), durante dos semanas, y posterior cultivo en medio TDZ con 0,44 µM de BA, por un periodo de cuatro semanas.

El establecimiento de árboles de *Paulownia* de buena calidad debe considerar tanto las características de la planta como el medio de establecimiento. La razón altura – diámetro a la altura del cuello de las plántulas debe ser de 60 a 70, de

tallo recto, firme y bien lignificado. Para esto, se requiere de una buena aclimatación fuera del invernadero, ya que una de las principales causas de mortalidad post-plantación se debe al establecimiento de plántulas que no están adaptadas a las condiciones de estrés en las cuales son plantadas. El sistema de raíz debe estar completo, sin lesiones o cortes que permitan el ingreso de hongos y enfermedades, y el espacio útil de crecimiento de la raíz en terreno debe tener alrededor de 50 cm de diámetro (Hua et al., 1986). La plantación se debe realizar a finales de invierno, y las plantas deben ser regadas inmediatamente, para evitar la deshidratación y posterior mortalidad de las plántulas recién establecidas.

2.4 Aspectos biológicos y manejo del cultivo

La capacidad de rebrote está influenciada por la cantidad de luz recibida por las copas de los árboles de *Paulownia* (Longbrake y McCarthy, 2001), y por la cantidad de biomasa acumulada en la zona radical de los árboles. La cantidad de biomasa subterránea acumulada, al final de un período vegetativo, en plantas que crecen bajo condiciones de luz deficientes es mucho menor, en comparación a las plantas que crecen bajo condiciones de luz favorables. De este modo, la capacidad de rebrote es mucho menor en plantas que crecen bajo poca disponibilidad de luz que en plantas que crecen a plena exposición (Longbrake y McCarthy, 2001).

La cantidad de luz disponible también afecta la forma del árbol. En árboles jóvenes la presencia de más del 70% de sombra puede afectar significativamente el desarrollo de las plantas causando su muerte. *Paulownia* es un género que requiere grandes cantidades de luz para su buen desarrollo, por lo tanto, no debe ser plantada en combinación con otras especies que limiten la luz disponible a sus copas, ni debe ser plantada en espaciamentos muy estrechos ya que la competencia entre las copas genera mayores tasas de mortalidad (Hua et al., 1986).

Paulownia puede desarrollarse bajo condiciones de sequía, pero su buen desarrollo demanda altas cantidades de agua para su crecimiento. En un experimento de *Paulownia elongata x fortunei* bajo diferentes condiciones de fertilización y riego, Martínez et al. (2010) encontró que el crecimiento de la planta depende en mayor grado de la cantidad de agua que de la cantidad de nutrientes

disponibles en el suelo. La cantidad de biomasa acumulada, al final del período de crecimiento, fue significativamente mayor en el tratamiento donde se aplicó mayor cantidad de agua sin fertilización, que donde se aplicó una menor cantidad de agua combinada con fertilizante.

Las principales ventajas de su cultivo se ven reflejadas en sus bajos costos de mantención, no requiere labranza, ni aplicación de pesticidas. Posee alta capacidad de rebrote, lo que permite hacer uso de las plantaciones por más de un turno de cosecha (Mueller et al., 2001). Por lo tanto, ha sido considerada como adecuada para el uso en cultivos energéticos (Hua et al., 1986).

El establecimiento de las plántulas requiere el laboreo de casillas profundas y amplias que permitan el buen crecimiento radicular. Para esto, se puede utilizar una barra plantadora, pala, o plantador de bulbos; la utilización de un tractor con una barra asistida suele ser muy eficiente, al igual que el uso de los plantadores mecánicos. La mayor porción del sistema radicular se encuentra bajo los 40 cm, en árboles provenientes de semilla, y por encima de los 40 cm, en árboles obtenidos por reproducción clonal o vegetativa (Wang y Shogren, 1992).

La aplicación de riego puede ser necesaria en sitios de baja disponibilidad de agua, durante parte o todo el período de crecimiento, ya que los vientos cálidos y secos pueden afectar fácilmente los árboles (Van de Hoef, 2003). La aplicación de fertilizantes a base de N-P-K puede ser necesaria sólo cuando los árboles están recientemente establecidos, para promover su crecimiento; otras aplicaciones van a depender de las características propias del sitio.

Paulownia es intolerante a la sombra; por esta razón, se requiere el control continuo de la competencia, durante los primeros años de crecimiento. Para esto, la aplicación de herbicidas a base de glifosato suelen ser muy efectivos (Woods, 2008).

Los árboles de *Paulownia* requieren un manejo intensivo de los brotes. La poda de los brotes laterales es esencial para potenciar el crecimiento del fuste principal, aunque una poda excesiva puede resultar en la pérdida de biomasa total. En plantaciones para la producción de madera, *Paulownia* posee algunos problemas de forma, ocasionados principalmente por su crecimiento pseudo-dicotómico, que genera la bifurcación del fuste. Este problema se corrige fácilmente con la realización

de poda, obteniendo fustes con mayor cantidad de madera libre de nudos (Bergmann, 1998).

2.5 Crecimiento y rendimiento del cultivo

El crecimiento es muy dependiente de las condiciones del sitio y la edad del árbol. En estado maduro, los árboles de *Paulownia* pueden alcanzar hasta 50 m de altura y 2 m de diámetro a la altura del pecho. Durante el primer año de crecimiento, pueden llegar a medir de 4 a 6 m de altura. En el cuarto año de edad, los cultivos manejados con poda, pueden tener hasta 10 m de altura, con 5 m de fuste limpio de ramas y 22 cm de diámetro (Van de Hoef, 2003).

Las plantaciones de *P. elongata x fortunei* poseen altos rendimientos en biomasa y producción de energía. Los árboles de diferentes especies del género *Paulownia*, además de producir madera de buena calidad, poseen la capacidad de recuperar suelos degradados, estabilizar la erosión, fijar altas cantidades de CO₂ y alcanzar altos rendimientos en biomasa por unidad de tiempo (Hua et al., 1986; Bergmann, 2003). En Brasil, se han observado rendimientos en volumen de 11 a 30 m³/ha/año (Barton et al., 2007). En EEUU, se registró crecimiento de 5,5 m de altura en 16 meses, con rendimiento en biomasa de hasta 84 t/ha/año de materia seca, bajo condiciones de riego y fertilización (Woods, 2008). En plantaciones de corta rotación, con ciclos de 3 años, se puede obtener rendimientos entre 30 y 45 t/ha/año (Zhang et al., 2010).

2.6 Daños bióticos y abióticos

Los árboles de *Paulownia* son resistentes al ataque de plagas y enfermedades. Sin embargo, se han reportado daños por hongos patógenos, herbívoros y bajas temperaturas. Los hongos que afectan los árboles de *Paulownia*, que aunque no son muy comunes y no causan mayores daños, son: *Cercospora paulowniae*, *Mycosphaerella corylea*, *Phyllactinia imperialis*, *Septobasidium tanakae*, *Uncinula clintonii* y *Valsa paulowniae*.

Paulownia también es atacada por diferentes tipos de insectos, entre los que se encuentran: los lepidópteros *Agrotis ipsilon*, *A. toxionis*, *A. segetum*, *Psilogramma menephron*; los coleópteros *Maladera orientalis*, *Anomala corpulenta*, *Holotrichia diomaphalia*; los ortópteros *Gryllotalpa unispina*, *G. africana*, el homóptero *Empoasca flavescens* y

el hemíptero *Cicadella viridis*, entre otros. Los daños producidos por estos insectos varían en intensidad y magnitud en diferentes localidades. En Estados Unidos, los árboles son atacados por ciervos, topillos y marmotas. En España, los principales daños por herbivoría son ocasionados por conejos y ratones (Figura 4).



Figura 4. Daño por herbivoría en árboles jóvenes de *Paulownia* en plantaciones establecidas en Chile.

Paulownia varía en la capacidad de resistencia al frío. Algunas especies son capaces de soportar temperaturas de hasta -20°C cuando están completamente inactivas. Heladas primaverales fuertes pueden dañar brotes jóvenes en crecimiento o tallos de árboles, afectando severamente el crecimiento y la forma de árbol (Figura 5).



Figura 5. Daño causado por bajas temperaturas en árboles jóvenes de *Paulownia* en plantaciones establecidas en Chile.

Se ha observado que vientos persistentes pueden causar curvaturas permanentes en los troncos de los árboles, que los hace inadecuados para su uso maderero. Vientos fuertes pueden dañar o incluso romper árboles establecidos. Las plántulas jóvenes tienen excepcionalmente grandes hojas que son más susceptibles a los daños de heladas, viento y granizo. En algunos casos, las plantas no superan las condiciones de extrema sequía, cuando son establecidas en sitios de alta temperatura y expuestos al viento permanente (Bhat et al., 1998).

2.7 Propiedades y usos de la madera

La madera de *Paulownia* es de color amarillo claro con algunas tonalidades rosadas en su duramen. Su textura es fina con porosidad gradualmente difusa. Posee buenas propiedades estructurales y es fácil de cortar, aserrar, pulir y tallar, posee excelente estabilidad dimensional, y se seca fácilmente al aire sin sufrir torceduras o alabeos. Puede alcanzar 10% de contenido de humedad en 25 días (Van de Hoef, 2003). Es liviana, su densidad es de 0,24 g/cc. Se puede utilizar en la construcción de elementos no estructurales como marcos, puertas, tableros, techos, molduras, muebles, calzados, y aeromodelismo; también se puede usar para la elaboración de cajas y embalajes. Posee buena resonancia y es usada para la construcción de instrumentos musicales. Presenta una alta resistencia a la pudrición, haciéndola una madera muy deseable para la elaboración de embarcaciones y en la industria del “kitesurf”. Posee alto potencial para la extracción de pulpa para papel. La madera de *Paulownia* posee alta resistencia al fuego, su temperatura de ignición es de 420 a 430°C, lo que la hace atractiva para la construcción de revestimientos, en comparación con otras maderas que se queman a 220°C (Hua et al., 1986).

Objetivos del proyecto / Metodología



3. Objetivos del proyecto

General

Determinar el rendimiento energético de la biomasa de *P. elongata x fortunei*, obtenida en plantaciones establecidas en sitios con características edafoclimáticas contrastantes de la zona centro sur de Chile.

Específicos

- Cuantificar la producción de biomasa de *P. elongata x fortunei*.
- Determinar el poder calorífico de la biomasa de *P. elongata x fortunei*.
- Estimar la cantidad de etanol producido desde la biomasa de *P. elongata x fortunei*.
- Evaluar las propiedades de pélets obtenidos desde la biomasa de *P. elongata x fortunei*.

4. Metodología

4.1 Descripción de los sitios de ensayo

Los ensayos se realizaron en tres sitios, i.e. Fundo La Isla ubicado en Quillón, Fundo Trehualemú ubicado a 13 Km de Buchupureo, Pelluhue y Fundo El Vergel ubicado en Chaimávida, Concepción (Figura 6). Los sitios fueron seleccionados considerando los siguientes criterios: condiciones edafoclimáticas contrastantes, productividad forestal media, suelos de aptitud preferentemente forestal, pendiente inferior a 35 grados, gradiente de precipitación de 600-1400 mm anuales, buena conectividad, propietarios estuvieran dispuestos a ceder el área de ensayo por 3 a 4 años de duración del proyecto.



Fundo El Vergel



Fundo La Isla



Fundo Trehualemú

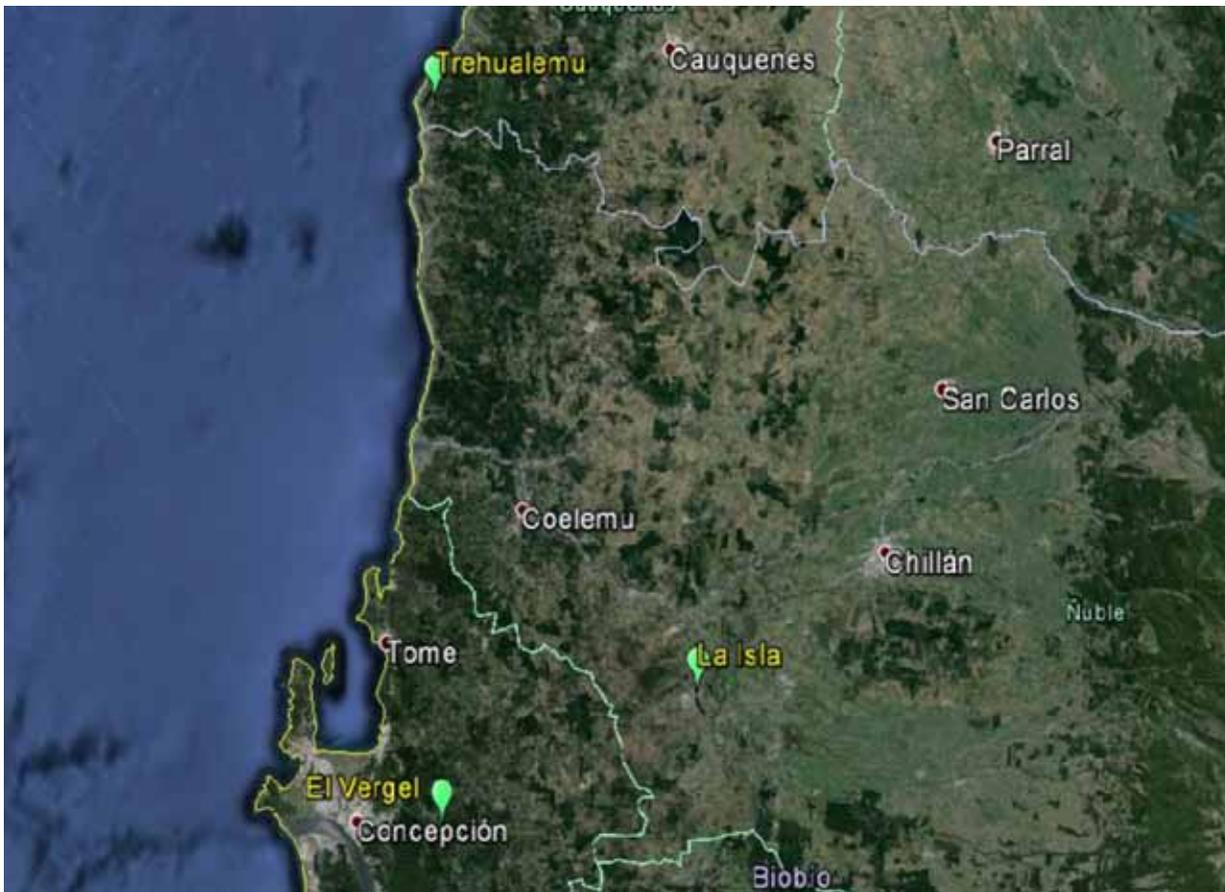


Figura 6. Ubicación de los sitios de ensayo.

Fundo El Vergel

(a) Localización y descripción general. El Vergel se encuentra ubicado en los 36°50'30" latitud sur y 72°54'26" longitud oeste, a una distancia aproximada de 12 Km hacia la cabecera municipal de la Ciudad de Concepción, en la comuna y provincia del mismo nombre y a 2 Km del sector Chaimávida. El sitio de ensayo (Figura 7) se localiza en el fundo El Vergel, propiedad de la empresa Forestal Collague Ltda. Limita al norte con bosque de regeneración natural de la especie *Acacia* de aproximadamente de 15 años de edad, al sur con plantaciones de pino y eucalipto pertenecientes a propietario particular y al oeste con plantaciones de la empresa Bosques Arauco S.A.

(b) Clima. El predio se encuentra ubicado en la cuenca del río Andalién y pertenece a la zona agroclimática del secano costero (Del Pozo y Del Canto, 1999). El clima corresponde a clima templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses anuales y período libre de heladas entre 6 y 7 meses al año. Su régimen térmico es suavizado por la acción moderadora que ejerce la cercanía al mar. Posee una temperatura promedio anual de 12,2°C con máximas y mínimas en el perio-

do estival de 22,3°C y 7,6°C e invernal 13,5°C y 4,7°C, respectivamente. Posee un periodo libre de heladas de aproximadamente 4 meses. La precipitación media anual oscila alrededor de 1196 mm, con máximas en el mes de Junio en 292 mm y mínimas en enero de 15 mm (TIGO, 2011). La mayor parte de las precipitaciones ocurre entre marzo a agosto, y en menor grado de septiembre a noviembre. La humedad relativa oscila alrededor del 85% y la evapotranspiración es de 660 mm anuales, con la máxima pérdida de agua por evaporación en el mes de enero, alcanzando 92 mm mensuales (Del Pozo y Del Canto, 1999).

(c) Geomorfología y suelo. La Cordillera de la Costa al sur del río Itata se transforma en una meseta erosionada que no supera los 500 m.s.n.m. La topografía varía desde lomajes a pendientes muy fuertes, complejas y disectadas por quebradas (Figura 8). Su geomorfología se desarrolla sobre un basamento de formaciones rocosas plutónicas que corresponden al batolito de la Cordillera de la Costa, el cual se destaca por su baja permeabilidad.

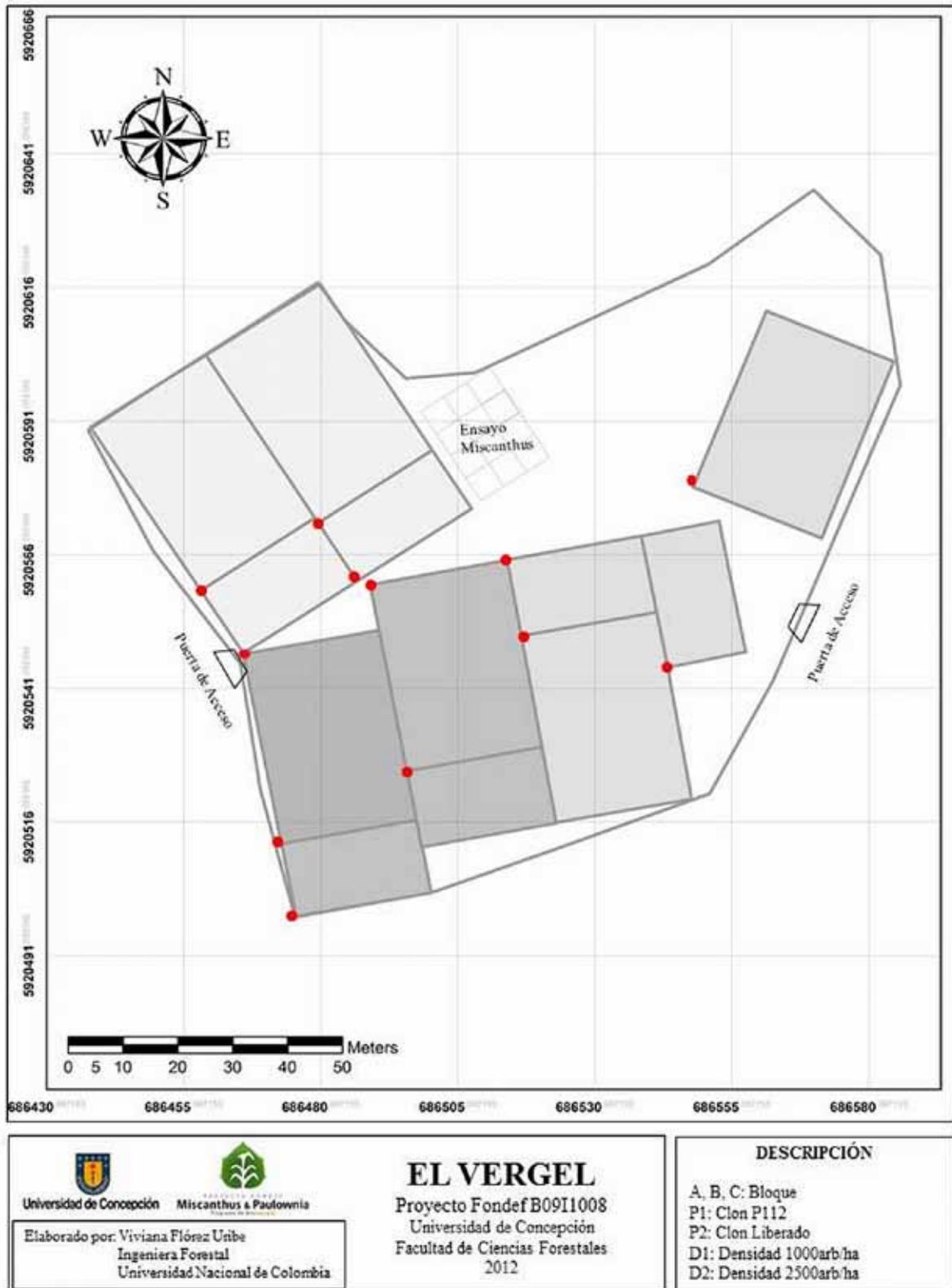


Figura 7. Localización del ensayo en fundo El Vergel.



Figura 8. Sitio de ensayo El Vergel. A) Sector norte. B) Sector sur.

El suelo pertenece a la serie de suelos Trehuaco (TG), suelo profundo bien evolucionado y formado a partir de rocas metamórficas especialmente micasitas y gneiss muy meteorizados, en todo el perfil. Posee altos contenidos de micas y cuarzo. Dentro de la Cordillera de la Costa estos suelos se presentan principalmente en los sectores más altos y la vertiente este, en contacto con la formación granítica. Son suelos bien estructurados, friables, de abundante porosidad que permiten un buen desarrollo de las raíces (CIREN, 1999; Santis, 2005).

Corresponden a la fase de suelos de textura franco arcillosa limosa, moderadamente profundos y pendiente superior al 30%. Presentan erosión laminar moderada y buen drenaje, el agua es removida del suelo con facilidad, pueden retener altas cantidades de humedad para el crecimiento de las plantas después de eventos de lluvia o adiciones de agua por sistemas de riego (Tabla 2).

Tabla 2. Características físico – químicas de los suelos de la región agroclimática secano costero (Fuente: Proyecto FONDEF B09I 1008).

FÍSICAS		QUÍMICAS		
		Profundidad	0 -20 cm	20-40 cm
Cantidad de Arcilla (%)	45,5	Materia orgánica (%)	4,76	3,33
		pH	5,72	5,61
Cantidad de Limo (%)	19	N (ppm)	15,01	11,76
		P (ppm)	2,00	1,70
Cantidad de Arena (%)	35,5	K (cmol (+)/kg)	0,57	0,54
		Ca (cmol (+)/kg)	3,18	2,63
Densidad aparente (g/cc)	1,30 - 1,44	Mg (cmol (+)/kg)	1,04	0,99
		Boro (ppm)	0,10	0,12
Capacidad de campo (%)	26,08	Zn (ppm)	0,52	0,17
		Fe (ppm)	33,37	17,91
Marchitez permanente (%)	11,87	Cu (ppm)	23	0,17
		Mn (ppm)	38	24,47
Agua aprovechable (%)	14,21	S (ppm)	16,14	24,54
		C (%)	2,76	1,93

Sitio La Isla

(a) Localización y descripción general. El área de ensayo se ubica en 36°44'12" latitud sur y 72°26'49" longitud este, en la comuna de Quillón, provincia de Ñuble, Región del Biobío. El sitio de ensayo (Figura 9) y se localiza en el fundo La Isla, el cual es administrado por la empresa Agrícola y Forestal La Montaña Ltda. Al sitio se accede por la Ruta 148, saliendo desde Quillón con dirección a Bulnes, frente a Laguna Avendaño.

(b) Clima. El clima está influenciado por sus características geográficas. Se ubica en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa donde el relieve atenúa la influencia marítima, se encuentra bajo el régimen hidrológico del río Itata y la Laguna Avendaño. Corresponde a las características típicas de clima mediterráneo templado cálido, el cual comprende la mayor parte de la Región del Biobío. La temperatura media anual oscila entre los 13,3°C y 15,6°C, con una amplitud térmica anual (T° máxima en enero – T° mínima en julio) que supera los 22°C. Puede presentar de 4 a 5 meses secos al año. En la época invernal la temperatura oscila alrededor de los 10°C, con mínimas entre 3,9°C y 5,2°C, con heladas durante 5 a 6 meses (Del Pozo y Del Canto, 1999).

La precipitación media anual es de 1025 mm. El 80% se concentra entre abril y agosto, donde alcanza la mayor disponibilidad de agua en el suelo para el establecimiento de cultivos. La evapotranspiración potencial está entre 1100 mm y 1200 mm al año. El déficit hídrico equivale a 280 mm anuales.

(c) Geomorfología y suelo. La topografía dominante dentro de la comuna es ondulada a plana. Se distinguen paisajes con llanos y lomas bajas. La morfología y relieve están determinados por modelos de erosión y sedimentación de material proveniente tanto de la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, también llamada Depresión Central, como por restos de piroclastos de erupciones volcánicas del Antuco, que fueron arrastrados hacia la parte inferior del valle fluvial del río Itata.

A nivel regional, el secano interior se caracteriza por tener suelos derivados de rocas metamórficas, rocas graníticas y suelos argílicos provenientes de sedimentos lacustres. Con textura franco – arcillo - arenosa, con bajos contenidos de fósforo, nitrógeno y materia orgánica. El pH varía entre 6,5 y 6,7, con bajos contenidos de calcio y azufre no recomendables para la agricultura, pero sí para la actividad forestal (Tabla 3).

El suelo del sitio del ensayo pertenece a la serie de suelos Llahuecuy (LHY), familia mixta de los Typic Xeropsamments (Entisol). Los suelos aluviales, formados en las terrazas altas del río Itata, pertenecen a la clase textural Arenosa, con rápida permeabilidad y excelente drenaje. Son suelos profundos, ligeramente inclinados con pendiente entre el 0 y 3%. Se clasifican dentro de los suelos con capacidad de uso IIs0, IIle1 y IVe1, con limitaciones de nutrientes, contenido de humedad, y clima desfavorable para el establecimiento y desarrollo de algunos cultivos agrícolas (Figura 10).



Figura 10. Sitio de ensayo La Isla. A) Sector norte. B) Sector sur.

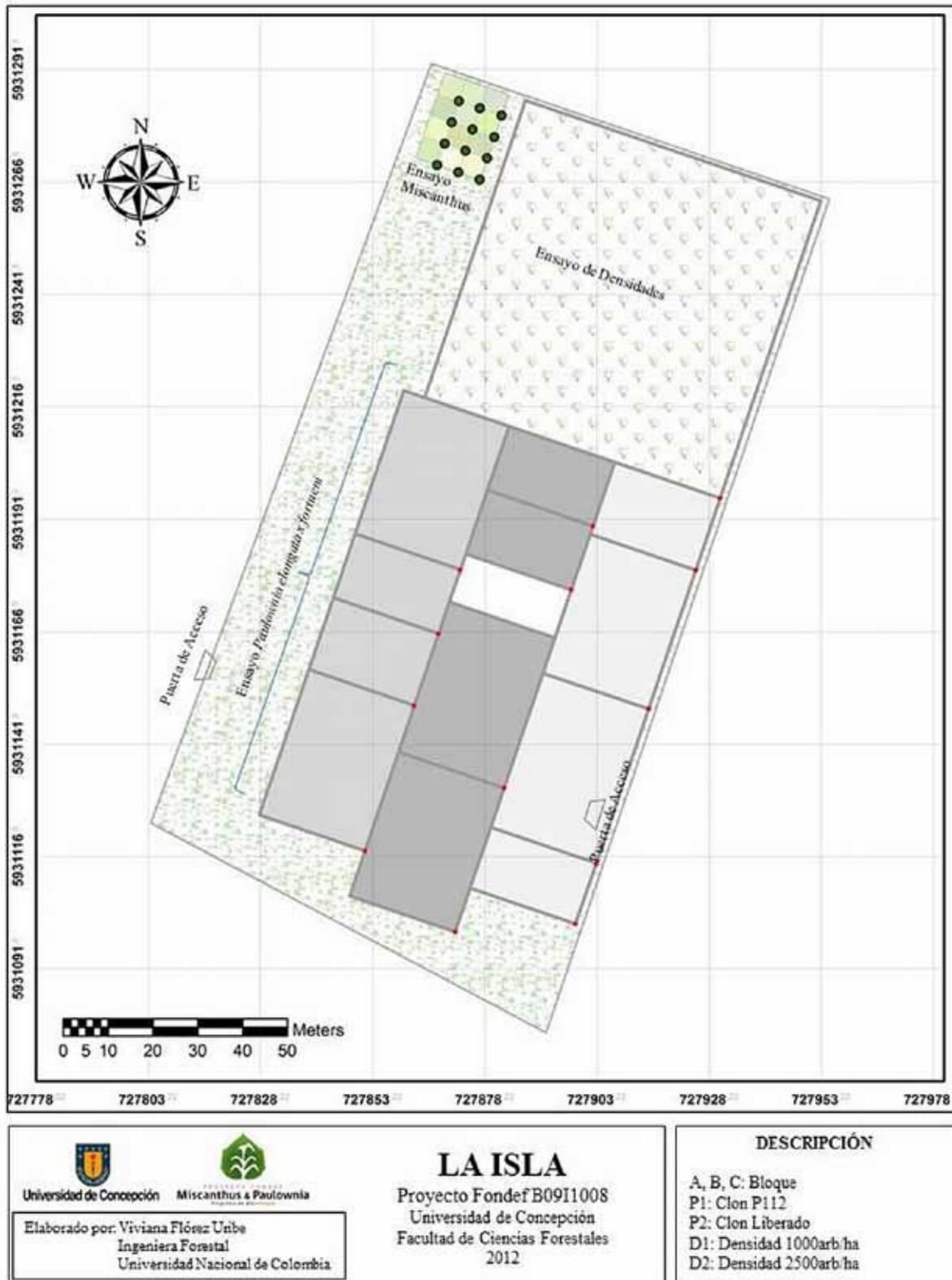


Figura 9. Área de ensayo La Isla.

Tabla 3. Características físico – químicas de los suelos de la región agroclimática seco interior (Fuente: Proyecto FONDEF B09I 1008)

FÍSICAS		QUÍMICAS		
		Profundidad	0 -20 cm	20-40 cm
Cantidad de Arcilla (%)	2,1	Materia orgánica (%)	2,11	1,11
		pH	6,54	6,70
Cantidad de Limo (%)	4,8	N (ppm)	5,92	4,03
		P (ppm)	4,17	3,19
Cantidad de Arena (%)	93,1	K (cmol (+)/kg)	0,19	0,21
		Ca (cmol (+)/kg)	1,55	1,43
Densidad aparente (g/cc)	1,49 - 1,54	Mg (cmol (+)/kg)	1,34	1,41
		Boro (ppm)	0,12	0,11
Capacidad de campo (%)	11,68	Zn (ppm)	0,14	0,10
		Fe (ppm)	35,84	28,83
Marchitez permanente (%)	2,03	Cu (ppm)	0,36	0,41
		Mn (ppm)	1,98	1,95
Agua aprovechable (%)	9,65	Cu (ppm)	3,18	2,93
		Mn (ppm)	1,22	0,64

Fundo Trehualemu

(a) Localización y descripción general. El fundo se ubica en la localidad de Trehualemu, perteneciente a la comuna de Pelluhue, en la Región del Maule, en los 35°58'29" latitud sur y 72°45'8" longitud oeste. El sitio de ensayo (Figura 11) se localiza en el fundo Trehualemu, propiedad de la empresa MASISA S.A. Corresponde a la franja costera ubicada entre la vertiente occidental de la costa y el Océano Pacífico. El predio se encuentra a 14 km de Buchupureo en la Región del Maule y se accede por la Ruta N – 102 con dirección a Pelluhue.

b) Clima. El área de estudio se encuentra en la zona agroclimática del seco costero. A nivel local, el área de ensayo se ubica dentro del régimen hidrológico de las cuencas costeras de los esteros Trehualemu y Pullay. Presenta un tipo de clima templado cálido que se extiende desde el río Mataquito por el norte, hasta el río Itata por el sur. En este sector, las lluvias son frontales y más abundantes en invierno, precipitándose más del 70% de las lluvias entre mayo y agosto. La estación seca se prolonga de 4 a 6 meses entre octubre y marzo. En el área de ensayo, la precipitación media anual es de 898 mm, con máximas en el período invernal de 200 mm y mínimas en el período estival de 9 mm. La evapotranspiración total anual alcanza los 720 mm, con el mayor déficit hídrico en el mes de enero donde alcanza 109 mm.

Los vientos del frente litoral predominan en la época de otoño e invierno y bajan la temperatura más del promedio correspondiente a la misma

latitud. La temperatura varía en un rango medio anual entre 8,9°C y 19,2°C, teniendo una oscilación térmica diaria desigual, con cambios hasta de 11°C entre la mínima y la máxima. La temperatura promedio anual es de 14,1°C, posee mínimas y máximas en la estación invernal de 6,0°C y 14,6°C y estival de 11,2°C y 24,4°C, respectivamente. Cuenta con un período libre de heladas de hasta 9 meses, y se considera un período de crecimiento para cultivos agrícolas y forestales (Del Pozo y Del Canto, 1999).

(c) Geomorfología y suelo. La morfología a nivel comunal se caracteriza por un patrón orográfico transversal desde el oeste hacia el este, con la planicie litoral del Océano Pacífico que incluye acantilados y playas, y la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa sobre la cual se localiza el fundo. Su topografía dominante son lomas con pendientes moderadamente inclinadas, susceptibles a la erosión, proceso que no ha afectado la productividad del suelo.

El suelo es formado presumiblemente con el asentamiento de cenizas volcánicas, sobre terrazas marinas que se levantan entre los 30 y 200 m.s.n.m, son fértiles con base en rocas metamórficas. Pertenecen a las series de suelos Cobquecura (CBC), miembro de la familia limosa fina mixta métrica de los Umbric Dystrochrepts (Inceptisol) (Tabla 4).

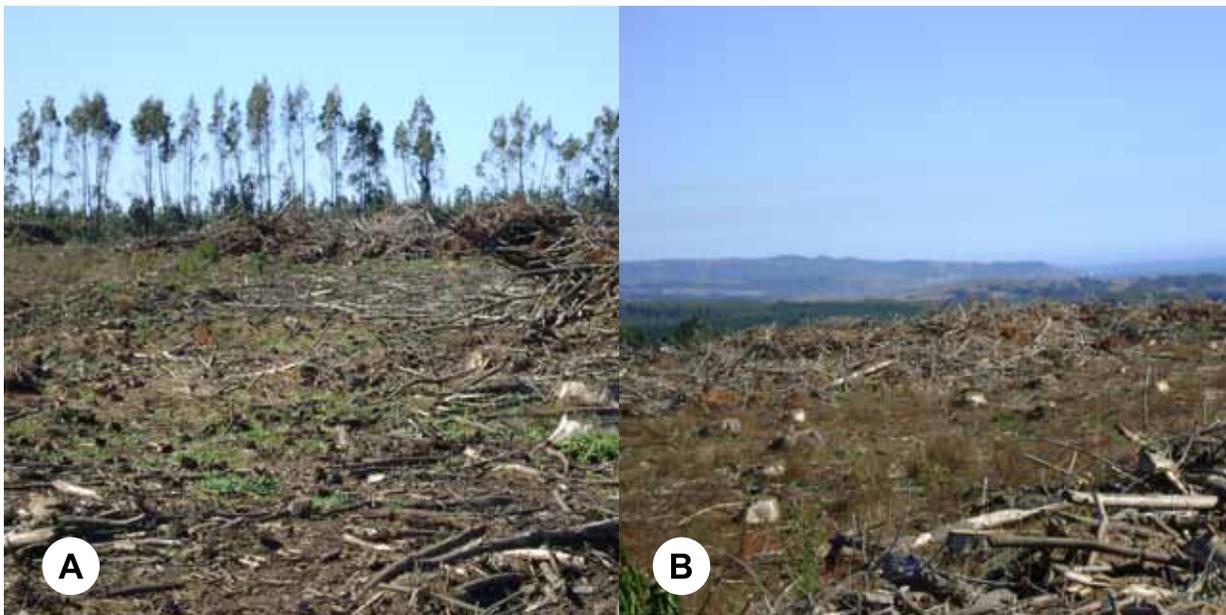


Figura 12. Sitio de ensayo Trehualemu. A) Sector norte. B) Sector sur.

Estos suelos presentan textura superficial franco arcillo limosa. Son suelos profundos, suavemente ondulados, con 5 a 8% de pendiente. Suelo de permeabilidad lenta a moderada, con buena capacidad de retención de humedad, buena estructura y con alta actividad biológica. Posee capacidad de uso tipo IVs1 con limitaciones de uso agrícola propias del suelo susceptible a la erosión por agua y por viento.

La construcción de caminos forestales y la utilización de maquinarias asociadas al aprovechamiento y cosecha forestal han aumentado el nivel

de erosión. De acuerdo con el SINIA (Sistema Nacional de Información Ambiental), la zona de estudio posee un potencial de erosión bajo en comparación con los sectores más altos de la vertiente cordillerana. Presentan limitaciones para la actividad forestal debido a la compactación de los horizontes inferiores del suelo y a la escasa profundidad efectiva (Carrasco y Millán, 1990). Además poseen bajo contenido de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en los primeros horizontes, disminuyendo hacia los horizontes más profundos, generando una limitación para algunas actividades agrícolas y forestales (Figura 12).

Tabla 4. Características físico – químicas de los suelos de la región agroclimática seco costero (Fuente: Proyecto FONDEF B09I 1008).

FÍSICAS		QUÍMICAS		
		Profundidad	0 -20 cm	20-40 cm
Cantidad de Arcilla (%)	41,3	Materia orgánica (%)	10,55	9,12
		pH	5,36	5,35
Cantidad de Limo (%)	45,9	N (ppm)	18,24	15,11
		P (ppm)	7,54	5,22
Cantidad de Arena (%)	12,9	K (cmol (+)/kg)	0,75	0,54
		Ca (cmol (+)/kg)	3,81	3,79
Densidad aparente (g/cc)	1,07 - 1,35	Mg (cmol (+)/kg)	1,83	1,60
		Boro (ppm)	0,29	0,27
Capacidad de campo (%)	41,07	Zn (ppm)	1,03	0,63
		Fe (ppm)	112,41	97,12
Marchitez permanente (%)	16,64	Cu (ppm)	0,64	0,45
		Mn (ppm)	28,72	19,41
Agua aprovechable (%)	24,43	Cu (ppm)	13,00	12,46
		Mn (ppm)	6,12	5,29

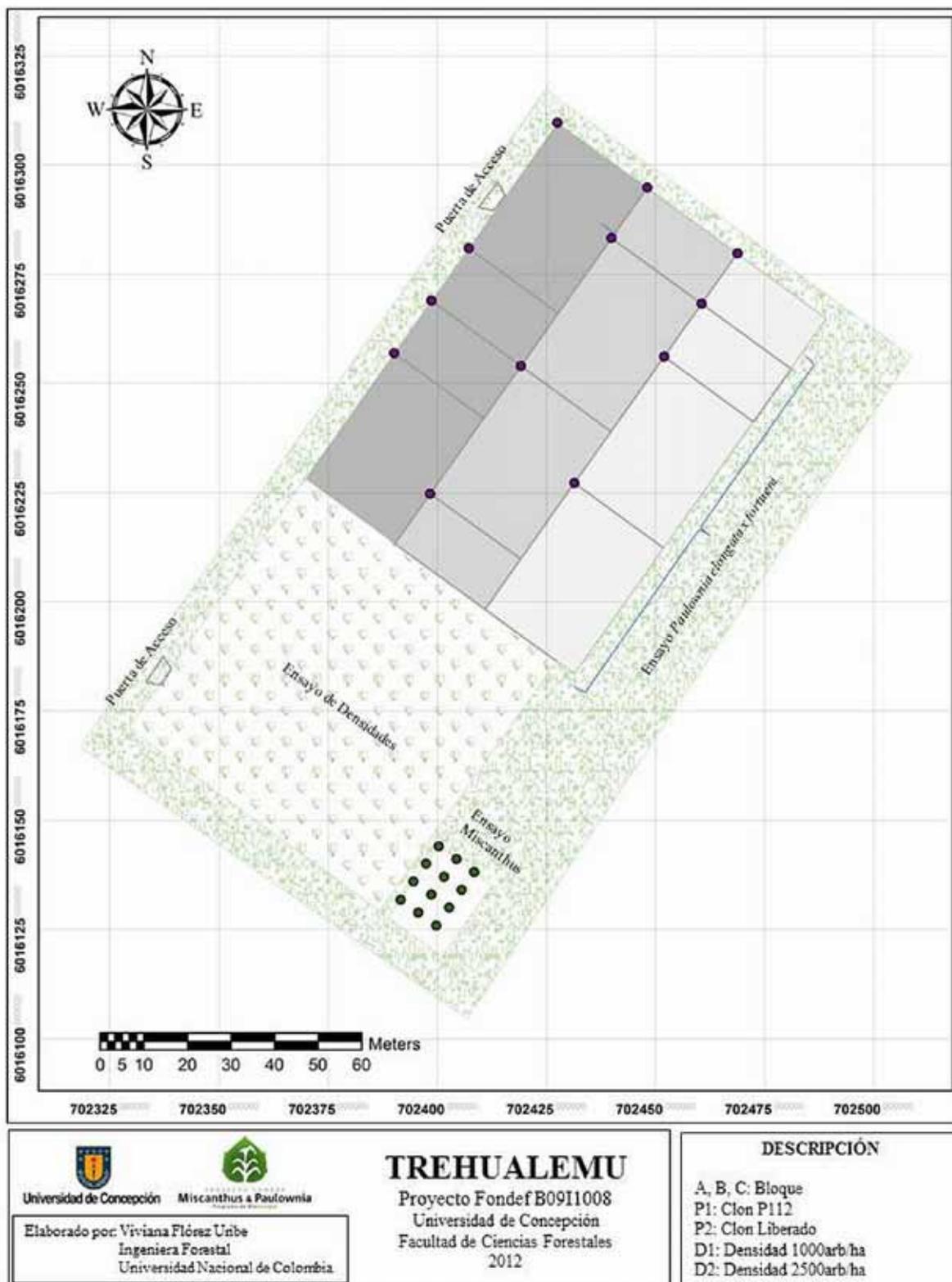


Figura 11. Localización del ensayo en fundo Trehualemu.

4.2 Multiplicación del material genético utilizado

La internación de material genético de *P. elongata x fortunei* se realizó sin inconvenientes, ya que se contaba con la documentación necesaria (resolución exenta de internación de material vegetal in vitro del Servicio Agrícola Ganadero (SAG) y certificado fitosanitario de origen, emitido por la autoridad sanitaria correspondiente), documentos esenciales para la internación.

Para el proyecto se utilizó el material genético de dos clones de *P. elongata x fortunei*, el clon 112® y el clon libre. El germoplasma para ambos clones corresponde a plantas in vitro. El clon 112® fue introducido y multiplicado por la empresa Bioagrotec E.I.R.L. ubicada en Chillán (Figura 13 a). El clon libre lo introdujo la empresa española Planta S.A. y su multiplicación fue realizada por la empresa Agrícola y Forestal Proplantas Ltda. (Figura 13), ubicada en Quinchamalí- Chillán, Provincia de Ñuble (Figura 13 b).

Se elaboró protocolos de multiplicación in vitro y macropropagación de *P. elongata x fortunei* utilizando el clon libre. Adicionalmente se viverizó semillas de *Paulownia sp.* recolectadas desde árboles ubicados en el campus Chillán de la Universidad de Concepción. La multiplicación in vitro fue realizada en el Laboratorio de Cultivos de Tejidos del Centro de Biotecnología de la Universidad de Concepción y la macropropagación se realizó en el vivero experimental de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción.



Figura 13. Producción de plantas de *P. elongata x fortunei* vía cultivo in vitro. A) Plantas clon 112® producido por Bioagrotec E.I.R.L., Chillán. B) Plantas clon liberado producido por vivero Proplantas, Quinchamalí.

4.3 Preparación de sitio

Roce y manejo desechos

Este procedimiento consistió en el ordenamiento y/o eliminación de la vegetación existente y el manejo de los desechos que se originan en la faena de roce, para dar lugar a la plantación de *Paulownia* y facilitar las posteriores actividades.

(a) Sitio El Vergel (Figura 14- a3): Se realizó roce manual, con herramientas de corte y rozadora, y mecanizado, mediante el uso de bulldozer. Se extrajeron los residuos fuera del área de estudio con fines de aprovechamiento, el resto de los residuos fueron quemados mediante quema controlada.

(b) Sitio Trehualemu (Figura 14- a1): Se realizó un ordenamiento de los desechos de cosecha de la plantación de pino insigne que existía en el área. El ordenamiento se efectuó fuera del área de estudio con bulldozer. No fue necesario realizar roce debido a la escasa vegetación en pie que quedó luego de la cosecha de la plantación.

(c) Sitio La Isla (Figura 14- a2): Se eliminó la vegetación en pie, principalmente arbustos, mediante el uso de bulldozer. Los desechos generados fueron distribuidos homogéneamente en el área de estudio.

Subsolado

En los tres sitios se realizó subsolado mecanizado que consistió en el fraccionamiento del suelo hasta una profundidad de 80 cm (Figura 14- b1, b2 y b3). Simultáneamente y con la ayuda de discos se formó un camellón, de ancho aproximado de 1 m, donde se establecieron las plantas. El espaciamiento entre las líneas de subsolado fue de 2 m (Figura 15). En el sitio El Vergel se procuró que el subsolado siguiera las curvas de nivel.

Construcción de cerco para los sitios de ensayo

Se construyó un cerco perimetral para asegurar la exclusión de animales domésticos y lagomorfos (conejos y liebres), durante toda la etapa de evaluación del ensayo (aproximadamente 4 años).

En los sitios El Vergel y La Isla (Figura 14- c2 y c3), se colocaron polines de 2,2 m de largo y 4" de diámetro cada 2,5 m, malla de alambre de 1 m de altura y sobre la malla cuatro hileras de alambre de púa hasta una altura de 1,45 m (distancia entre hebras de 15 cm). Adicionalmente se construyó

dos puertas de acceso de 1 m de ancho en dos lados opuestos del cerco.

En el sitio Trehualemu (Figura 14-c1) el cercado se realizó utilizando polines cada 2,5 m de distancia y cuatro hileras de alambre de púa a una distancia en altura de 35 cm, siendo la última hebra colocada a una altura de 1,45 m. Adicionalmente se construyó dos puertas de acceso de 1 m de ancho en dos lados opuestos del cerco.

Control de maleza

La eliminación de malezas pre-plantación se realizó mediante control químico en los tres sitios de ensayo. También se realizaron controles de maleza mecánico post-plantación. Este proceso se realizó ya que no se conoce experiencias de aplicación de herbicidas luego de establecida la plantación con *Paulownia*.

(a) Control químico. Consistió en la eliminación de la maleza (herbácea y arbustiva) mediante la utilización de mezcla de productos químicos. El control de maleza se efectuó en toda la superficie del ensayo, utilizando bombas de espalda y boquilla antideriva. La faena se realizó antes de iniciar la plantación (Figura 14-d1, d2 y d3).

Los productos químicos utilizados, así como su dosificación fue diferente para cada sitio. En sitio El Vergel se utilizó una mezcla de Panzer Gold (3,0 L/ha) y Garlon 4 (0,7 L/ha). En sitio Trehualemu se utilizó Roundup Full (4 L/ha, 66,2%), con surfactante incorporado (200 L/ha al 100%). En sitio La Isla se utilizó Panzer Gold (3,0 L/ha) y Starane (0,5 L/ha). Se efectuó un control en sitio El Vergel y La Isla, y dos en Trehualemu.

(b) Control mecánico. El control de maleza mecánico consistió en la eliminación de la vegetación mediante azadones y/o rozón en una área de alrededor de 50 cm de cada planta de *Paulownia*. También se extrajo la maleza entre las líneas de la plantación y sobre las líneas plantadas. Todo el material vegetal extraído se dejó en el lugar. Este

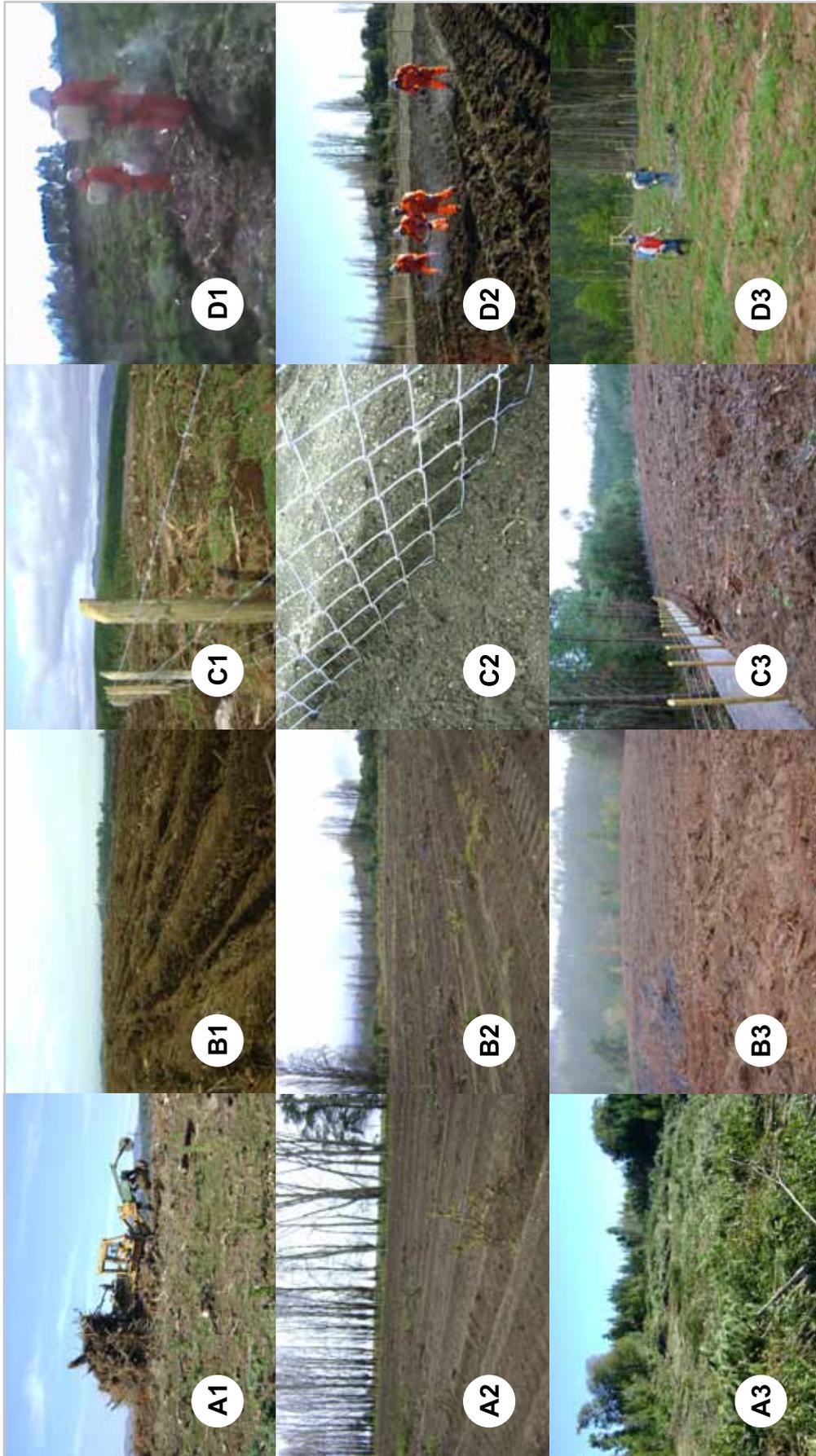


Figura 14. Fotografías de roce (a), subsolado (b), cercado (c) y control de malezas químico (d). El número (1) corresponde al sitio Trehualemu, (2) sitio La Isla y (3) sitio El Vergel.

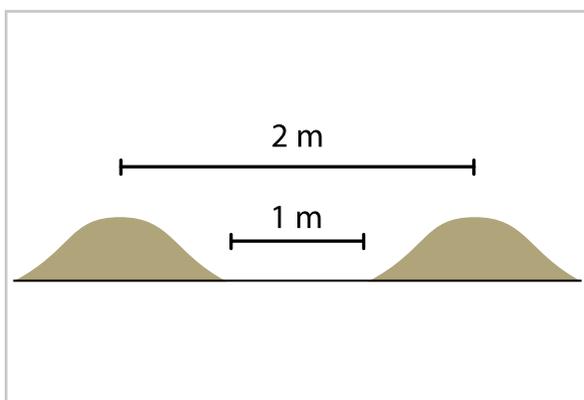


Figura 15. Descripción de subsolado realizado.

tipo de control se realizó dos veces en sitio El Vergel y La Isla, y una vez en Trehualemú.

4.4 Plantación y establecimiento de *Paulownia elongata x fortunei*

Plantación

La metodología de plantación fue la misma para ambos materiales genéticos (clon libre y clon 112®). En cada sitio se plantó dos densidades (1000 y 2500 plantas/ha) distribuidas en 12 distintas parcelas. La ubicación de cada planta estaba previamente establecida y señalada con una varilla. La casilla de plantación fue confeccionada con pala plantadora.

Toda la plantación se efectuó sobre camellones establecidos (distancia entre camellones de 2 m), variando la distancia entre plantas de acuerdo a la densidad de estudio (1000 y 2500 plantas/ha) y considerando plantación en tres bolillos. Al momento de plantar se aplicó en la casilla de plantación gel hidrocapturador mezclándolo con suelo y aplicando 1 L de agua distribuido antes y después de introducir la planta en la casilla (Figura 16).

En el sitio La Isla y en un sector del sitio El Vergel se incluyó el establecimiento de una cortina de plantas de *Pinus radiata*, distribuida en dos líneas de plantación que rodeaba la plantación de

Paulownia para ambos tipos de material genético. En total en los tres sitios se plantaron 1515 plantas de *P. elongata x fortunei* clon libre y 1515 plantas de clon 112® (Figura 17) y 600 de *P. radiata*.

Fertilización

De acuerdo a los análisis químicos realizados en los distintos sitios de ensayo se determinó aplicar los siguientes fertilizantes en mezcla (plantación de *Paulownia*): Fosfato Diamónico (DAP) que contiene nitrógeno (N) y fósforo en la forma (P_2O_5), Sulpomag que contiene azufre, potasio y magnesio, y Boronatrocálcita que contiene boro en la forma (B_2O_3) y calcio. La dosificación por planta para cada sitio de ensayo fue la siguiente (Tabla 5).

La aplicación se realizó en una pequeña zanja de 10-15 cm de profundidad alrededor de la planta a una distancia entre 30-40 cm. Fue realizada en todos los sitios de ensayo a fines de septiembre del 2012 (Figura 18).



Figura 18. Fertilización en ensayos de *P. elongata x fortunei* clon libre y clon 112®.

Tabla 5. Dosificación de fertilizantes para cada sitio de ensayo en plantación de *P. elongata x fortunei* clon libre y clon 112®.

SITIO	DAP, g	SULPOMAG, g	BORONATROCALCITA, g
La Isla	350	50	25
Trehualemú	150	50	25
El Vergel	150	50	25



Figura 16. Secuencia de plantación de *Paulownia* en sitios de ensayo. A) Confección de casilla. B) Riego y aplicación de gel hidrocapturador en casilla. C) Plantación en casilla. D) Riego luego de establecer la planta.

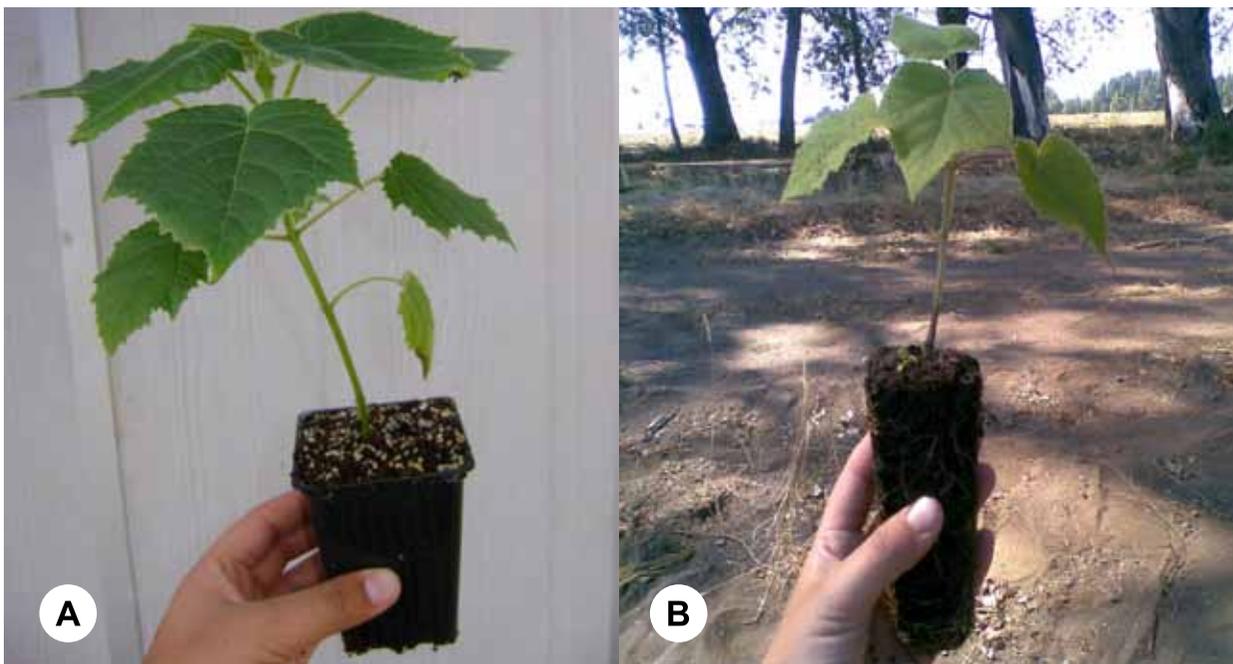


Figura 17. Característica de la planta establecida. A) Clon 112®. B) Clon libre.

4.5 Diseño experimental en plantación

El diseño experimental utilizado fue en bloques completos al azar con arreglo factorial, con cada factor, i.e. genotipo (clones) y densidad de plantación, en dos niveles y tres repeticiones. Así, el experimento presenta 4 tratamientos en cada sitio con un total de 36 parcelas. Se evaluó el efecto de marcos de plantación de 1000 y 2500 árboles por hectárea (denominados D1 y D2, respectivamente), i.e. 2 x 5 m; 2 x 2 m, respectivamente, y el efecto de dos clones de la misma variedad de *Paulownia*, i.e. clon 112® y clon libre (denominados P1 y P2, respectivamente). La superficie para el experimento fue de 0,75 ha por sitio de estudio (La Isla, Trehualemu, El Vergel).

Diseño de establecimiento

El diseño consideró un número fijo de árboles dentro de cada parcela de tratamiento, y cada parcela de medición, para ambas densidades de plantación, i.e. 80 árboles por parcela de tratamiento y 25 árboles por parcela de medición. De este modo, se establecieron parcelas de tratamiento con tamaño final de 800 m² para la densidad D1 (25 m de ancho x 32 m de largo), y 350 m² para la densidad D2 (25 m de ancho x 14 m de largo). Las parcelas de medición estaban ubicadas en el centro de cada parcela del tratamiento y delimitadas por un área de borde equivalente a dos líneas de plantación a cada lado de la parcela. Las parcelas de medición presentaban un área equivalente a 250 m² para la densidad D1 y 100 m² para la densidad D2.

Manejo de la plantación

Durante el mes de octubre del 2010 (aproximadamente a la edad de 10 meses) se realizó corta basal de todos los árboles ubicados en el sitio El Vergel y La Isla (Figura 19).



Figura 19. Corte basal de individuos de *P. elongata x fortunei* ubicados en sitio La Isla.

4.6 Mediciones realizadas

Se realizaron varias mediciones en función de los elementos a evaluar: crecimiento, biomasa, calorimetría, etanol y pélets. Las mediciones se realizaron para ambos clones.

Crecimiento

El crecimiento y desarrollo de las plantaciones se evaluó a través de la medición quincenal de variables durante los primeros tres meses y a partir del cuarto mes, mediciones mensuales hasta la cosecha de la primera rotación (2012-2013) y bimensuales hasta la temporada 2013-2014. Las variables medidas son el número de vástagos o brotes por planta; además para cada brote se midió el diámetro a la altura del cuello (DAC), el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (H) y la altura desde la base de la planta hasta donde nace el brote más alto (h) (Figura 20).

Biomasa y densidad básica de la madera

La determinación de la biomasa consistió en un muestreo destructivo en cada una de las unidades experimentales. Las determinaciones se realizaron con biomasa obtenida al término del periodo 2012-2013 (julio del 2013). A los árboles cortados se les midió el DAP, altura total y longitud y diámetro basal de todas las ramas y/o brotes laterales al árbol.

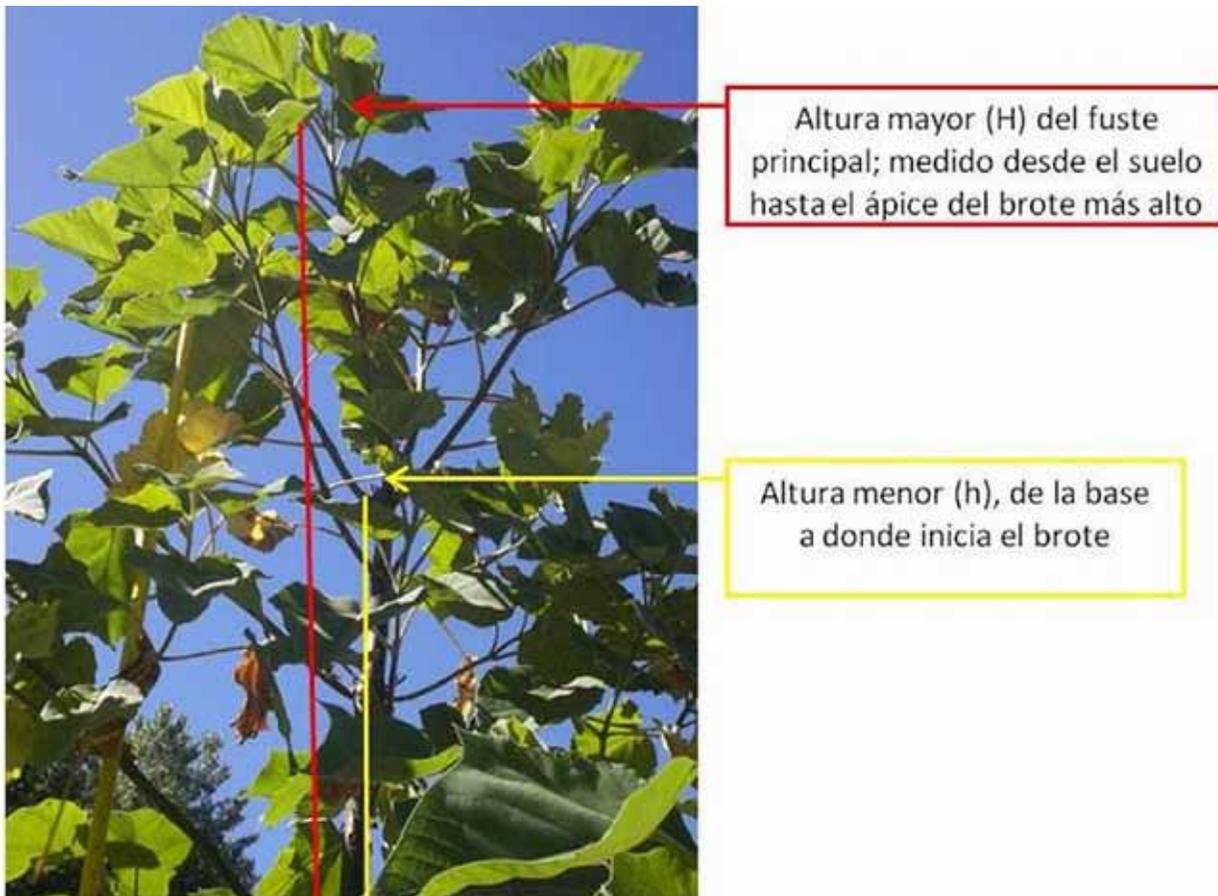


Figura 20. Mediciones de altura realizadas a las plantas de *P. elongata x fortunei*.

Las muestras para determinar la biomasa fustal y densidad básica de la madera, se extrajeron de la parte inferior, media y superior del árbol. Para esto, se tomaron tres muestras de cada uno de las secciones (inferior, media y superior) del fuste. La determinación de la biomasa se realizó mediante la relación entre el peso seco y peso húmedo de las muestras.

La densidad básica de la madera se obtuvo mediante la relación entre el peso seco y el volumen de cada una de las muestras. El volumen se obtuvo mediante el método de desplazamiento de líquidos.

Caracterización energética

Contenido de humedad

Para conocer las características energéticas se calculó el contenido de humedad en base húmeda y base seca. El método empleado se basó en las normas experimentales españolas UNE-EN 14774 - 1 (Julio 2010) y UNE-EN 14774-3 (Julio 2010). La humedad fue determinada en estufa con muestras de 100 g cada una, por unidad experimental, muestras que fueron molidas, trituradas y comprimidas antes de secarse.

Contenido de cenizas

Se determinó el contenido de cenizas en 10 submuestras de 1 g de biomasa de fuste y ramas sometidas a 550°C en horno hasta ser calcinadas. Las submuestras se obtuvieron de tres muestras de biomasa de 100 g cada una por unidad experimental, las cuales se secaron en horno hasta peso constante y se trituraron en un molino.

Análisis elemental y poder calorífico

Se tomaron tres muestras de biomasa de fuste y ramas, por unidad experimental, de 100 g cada una, las cuales se trituraron en un molino. Se tomó tres muestras de polvo, de 10 g cada una (10 submuestras por muestra, de 1 g cada una), por unidad experimental y se cuantificó el poder calorífico y el contenido total de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S).

Se determinó el poder calorífico en una bomba calorimétrica, modelo PARR 6400, obteniendo el poder calorífico superior a volumen constante de la muestra de ensayo en base húmeda (PCSv,b.h.), corregido a base seca (PCSv,b.s) con el valor de contenido de humedad de la muestra.

Las determinaciones del contenido de C, H, y N se realizaron siguiendo la norma experimental UNE CEN/TS 15104 EX (Diciembre 2008). El contenido en S se determinó siguiendo la norma experimental CEN/TS 15289 (Abril 2006).

Etanol

Se tomaron dos muestras de biomasa de fuste y ramas por unidad experimental, las cuales se secaron a temperatura ambiente, y luego se trituraron en un molino hasta obtener un polvo de partículas de 0,2 mm de diámetro. Se realizó la caracterización química de la biomasa, determinando contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y grupos acetilo. A partir de la cantidad de azúcares se estimó el rendimiento teórico de etanol, a través del software Theoretical Etanol Yield Calculator del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL).

Pélets

Preparación de las muestras de ensayo

El análisis de pélets consistió en la evaluación de sus principales propiedades. Para esto, se tomó una muestra de biomasa de tallo y ramas de 2000 g, secada a temperatura ambiente, luego molida



Figura 22. Pélets de *P. elongata x fortunei*.

hasta obtener partículas de 6 y 2 mm de diámetro. Los pélets se elaboraron usando una máquina peletizadora que presenta los siguientes parámetros: 6 mm de diámetro de la matriz, 40% de alimentación, 60°C temperatura de proceso y 40 amp de esfuerzo (Figura 21).

Propiedades de los pélets

A cada muestra de pélets (Figura 22) se le realizaron pruebas de contenido de humedad (DIN 51718), largo, diámetro, densidad sólida (DIN 52182), densidad aparente (DIN 52182) y durabilidad (CEN/TS 15210-1). Los resultados obtenidos fueron comparados con las norma DIN plus, lo cual permite determinar la calidad del pélets.



Figura 21. Secuencia de preparación de pélets de *P. elongata x fortunei*. A) Astillado de material. B) Vaciado de material al molino. C) Molienda al interior del molino. D) Material molido final.

Resultados



5. Resultados

5.1 Protocolos de propagación de material genético

Micropropagación mediante Cultivo in vitro

(a) *Multiplicación.* El material vegetal inicial fue recolectado desde plantaciones experimentales de 2 años de edad, clon liberado, localizadas en el sitio El Vergel. Para la multiplicación se utilizó ramas laterales de las plantas de 10, 20 y 30 cm de longitud. El proceso de multiplicación se efectuó en el Laboratorio de Cultivos de Tejidos del Centro de Biotecnología de la Universidad de Concepción.

Cada explanto (vareta) fue lavado para eliminar residuos, luego se procedió a cortar las hojas, dejando 1 cm de peciolo para realizar la desinfección y después trasladado a cámaras de flujo laminar de tipo horizontal. Posteriormente se realizó un nuevo lavado y las varetas fueron introducidas en frascos de 200 y 300 ml con agua destilada estéril, cada vareta se cubrió con una bolsa plástica de nylon (Figura 23) y se incubaron en cámara de crecimiento durante 2 a 3 semanas.

Después de incubadas las varetas, se obtuvieron brotes de yemas axilares de 2 a 3 cm de longitud. Bajo cámara de flujo laminar los brotes fueron escindidos de las varetas con bisturí, se cortaron las hojas y se dejó el tallo con una porción de peciolo para efectuar la asepsia superficial. Los brotes se seccionaron en diferentes segmentos nodales de 1 a 2 cm de longitud, los cuales contenían de uno a dos nudos, se cortaron los peciolos eliminando los extremos dañados (Figura 24).

Los explantos se dejaron en incubación por 15 días para observar avances en el crecimiento de las yemas laterales. Al obtener yemas de alrededor de 1 cm de longitud se procedió a cortarlas de los segmentos nodales y se trasladaron a frascos de 20 ml con medio Murashige Skoog (MS). Medio que contiene sacarosa, hormonas como citoquinina, 6-Bencilaminopurina (BAP) y auxina, ácido naftalenacético (ANA), y vitrofural, para evitar la contaminación de hongos y bacterias en el medio.



Figura 23. Procedimiento de asepsia. A) Cámara flujo laminar. B) Vareta después de la primera asepsia para llevar a incubación de material in vitro, Centro de Biotecnología de la Universidad de Concepción.

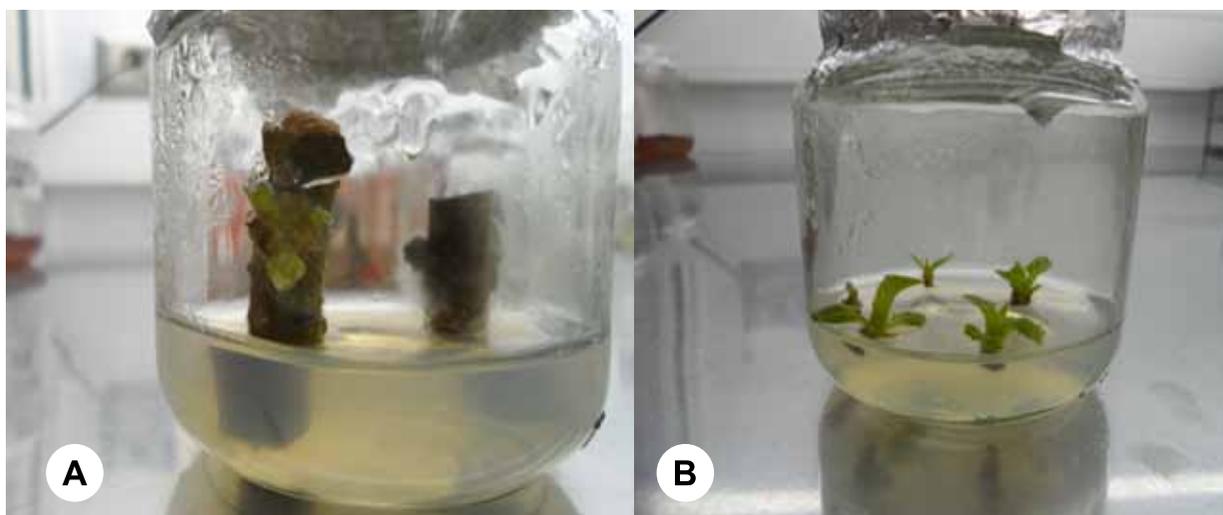


Figura 24. A) Crecimiento de yemas laterales. B) Segmentos nodales en cámara de crecimiento.

Los segmentos nodales se incubaron en cámara de crecimiento aclimatada (temperatura de 25°C, humedad relativa de 70% y fotoperiodo de 16 horas), durante 15 días. Al cabo de 15 días se observó los primeros brotes, los cuales permanecieron por otros 30 días para elongación en cámara de crecimiento.

Luego de obtener plántulas de mínimo 4 cm de altura se procedió a enraizarlas. Las plántulas se incubaron por tres semanas, revisando la formación de raíces (Figura 25). Al observar un incremento en la formación de raíces (en cantidad y tamaño) las plántulas se trasladaron a invernadero para aclimatación.

b) *Producción*. La etapa siguiente a la multiplicación in vitro comprende dos fases fundamentales que son la aclimatación y endurecimiento de las



Figura 25. Formación de radícula desde segmentos nodales.

plantas. La aclimatación se realizó por alrededor de 60 días en el invernadero, período en cual se desarrolla la radícula y ocurre la formación de hojas. El endurecimiento de la planta consistió en dejar las plantas bajo sombra o directo al sol para fortalecer las hojas y tejidos blandos; este proceso se desarrolló por 45 días.

Macropropagación por esquejes de raíz

Esta metodología tiene como fin multiplicar el material a menores costos que la multiplicación in vitro. Esta es una alternativa para pequeños y medianos propietarios forestales.

(a) *Extracción de raíces*. El material utilizado para el ensayo fue colectado desde plantaciones experimentales de *P. elongata x fortunei*, clon libre, localizadas en el sitio La Isla de un año de edad, durante el mes de diciembre del año 2012. La obtención de los esquejes se realizó desde el sistema radicular de plantas seleccionadas aleatoriamente, a una distancia mayor a 5 cm del cuello radicular. El corte de los esquejes se realizó verticalmente con una pala cuadrada de borde afilado. El material obtenido se trasladó a laboratorio envuelto en papel húmedo dentro de cajas plásticas. El ensayo de multiplicación se realizó en el vivero experimental de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción.

(b) *Ensayo*: Los esquejes de raíz fueron clasificadas en el laboratorio según tres rangos de diámetro, D1: diámetros pequeños (0,65 – 0,79 cm), D2: diámetros medios (0,80 – 0,99 cm) y D3: diámetros superior (1,0 – 1,50 cm). Se procedió a cortar los esquejes en segmentos de 5 cm de longitud (Figura 26).



Fotografía 26. A) Vista general de los esquejes utilizados. B) Corte Transversal de esqueje de *Paulownia*.

Los esquejes fueron plantados en cajas metálicas (Figura 27), con sustrato de compost y perlita (relación 3:1) (S1) y arena (S2). Cada caja fue dividida en 18 partes iguales (unidades experimentales de cinco esquejes), que contiene la combinación de los dos niveles de hormona (sin hormona y solución 6-bencil aminopurina (BAP)/ácido indolbutírico (AIB)), los tres tamaños de esquejes (grande, mediano y pequeño) y tres repeticiones. La aplicación de la hormona consistió en una inmersión por 5 segundos en una solución de BAP 1000 ppm/ IBA 500 ppm. Los esquejes fueron plantados a 5 cm de profundidad con separación entre esquejes de 3 cm, se regaron dos veces al día, con excepción de los días de lluvia y fueron protegidas con una malla Raschel negra de 50% de cobertura.



Figura 27. Vista general del envase y sustrato del ensayo de macropropagación de *Paulownia*.

c) *Traspaso de esquejes*. Los esquejes que presentaron emergencia de brotes y una elongación superior a 5 cm de altura fueron trasladados a bolsas plásticas con sustrato de compost y perlita en la relación 3:1 (Figura 28).

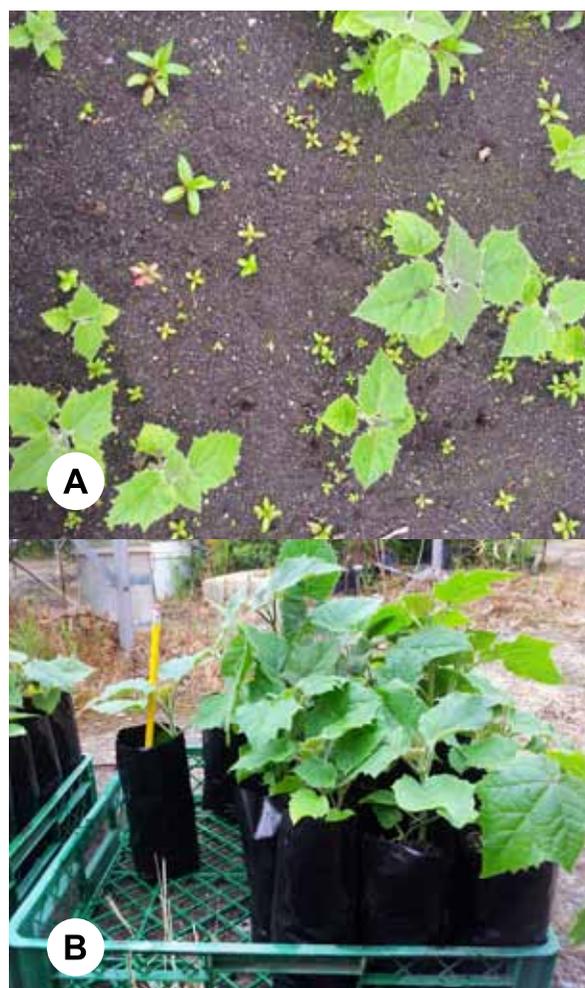


Figura 28. Producción de plantas desde esquejes. A) Emergencia de las plantas. B) Traspaso de plantas a bolsas.

(d) *Resultados del ensayo.* El mejor resultado se obtuvo con esquejes de diámetro pequeño (0,65 - 0,79 cm), plantados en compost:perlita y no tratados con hormonas, generando plantas de 9,44 cm de altura con abundantes raíces en un periodo de 50 días. Se concluye que para generar plántulas de *Paulownia*, la propagación vegetativa mediante el uso de esquejes de raíz de árboles de un año de edad es una opción viable y de bajo costo (Figura 29).



Figura 29. Plantas de *P. elongata x fortunei* producidas desde esquejes de raíz. A) Desarrollo inicial de la planta. B) Planta antes del traspaso a bolsa.

Colecta de semilla de *Paulownia sp.* en Chile y obtención de plantas.

En Chile existen en parques y calles ejemplares de *Paulownia*, aunque no se conoce con claridad la identificación de la especie. Considerando esto, se realizó colecta de semilla de *Paulownia sp.*

desde árboles adultos ubicados en el parque del Campus Chillán de la Universidad de Concepción. Las semillas fueron viverizadas en las instalaciones del vivero Proplantas (Figura 30). Un total de 250 plantas fueron establecidas en el sitio Trehuallemu (Figura 31)



Figura 30. Germinación de semillas de *Paulownia sp.* colectadas en Campus de la Universidad de Concepción, Chillán.



Figura 31. A) Plantas de *Paulownia sp.*, producidas desde semillas, establecidas en sitio Trehualemu. B) Biomasa recolectada para análisis desde sitio Trehualemu.

5.2 Evaluación del crecimiento del cultivo

Medición de diámetro

De los tres sitios, El Vergel presentó los mejores incrementos en diámetro, tanto a nivel del cuello (DAC) como a la altura pecho (DAP) (Tabla 6, Figura 32), medidos a los 18 meses de crecimiento (abril 2014). En las Figuras 33 y 34 se aprecian las actividades de medición.

Tabla 6. Diámetro altura de cuello (DAC) del vástago principal, diámetro altura pecho (DAP) y número de vástagos de plantaciones de *P. elongata x fortunei*. a los 18 meses de crecimiento (abril 2014).

Sitio	Clon	Código	DAC (1) cm	DAC (2) cm	DAP (1) cm	DAP (2) cm	Vástagos (1) N/arb
El Vergel	112®	VP1	8,2	9,5	4,8	5,4	3,5
	Liberado	VP2	7,8	9,5	4,9	6,0	3,5
La Isla	112®	IP1	4,4	4,5	1,8	1,4	2,0
	Liberado	IP2	5,8	7,6	2,6	3,7	2,0
Trehualemu	112®	TP1	6,9	7,9	2,8	3,2	2,0
	Liberado	TP2	8,0	10,7	3,4	4,3	2,0

(1) Promedio entre densidad 1000 arb/ha y 2500 arb/ha. (2) Diámetro densidad 1000 arb/ha.

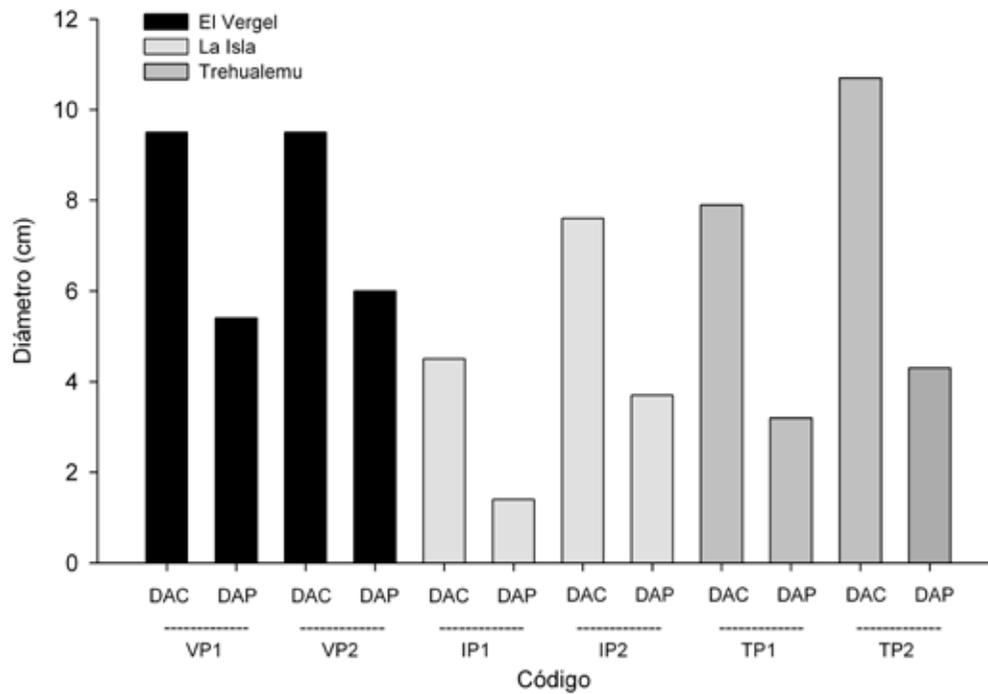


Figura 32. Diámetro altura de cuello (DAC) y diámetro altura pecho (DAP) de plantaciones de *P. elongata x fortunei* medido a los 18 meses de crecimiento (abril 2014) (Diámetros para la densidad 1000 arb/ha). Detalle de los códigos en Tabla 6.



Figura 33. Medición de diámetro altura cuello (DAC). A) y diámetro altura pecho (DAP). B) en sitio La Isla (Diciembre 2013).



Figura 34. A) Medición de tamaño de hojas. B) Identificación de los árboles que se miden.

Medición de altura

De los tres sitios, El Vergel presentó los mejores incrementos en altura (Tabla 7, Figura 35), medidos a los 18 meses de crecimiento (abril 2014). En las Figuras 36 y 37 se aprecian las actividades de medición.

Tabla 7. Altura total (cm) del vástago principal de plantaciones de *P. elongata x fortunei* medido a los 18 meses de crecimiento (abril 2014).

Sitio	Clon	Código	Altura (1) cm	Altura (2) cm
El Vergel	112®	VP1	310,3	351,8
	Liberado	VP2	305,1	313,1
La Isla	112®	IP1	155,6	165,0
	Liberado	IP2	178,0	246,9
Trehualemú	112®	TP1	179,6	198,4
	Liberado	TP2	168,6	216,1

(1) Promedio entre densidad 1000 arb/ha y 2500 arb/ha. (2) Altura densidad 1000 arb/ha.

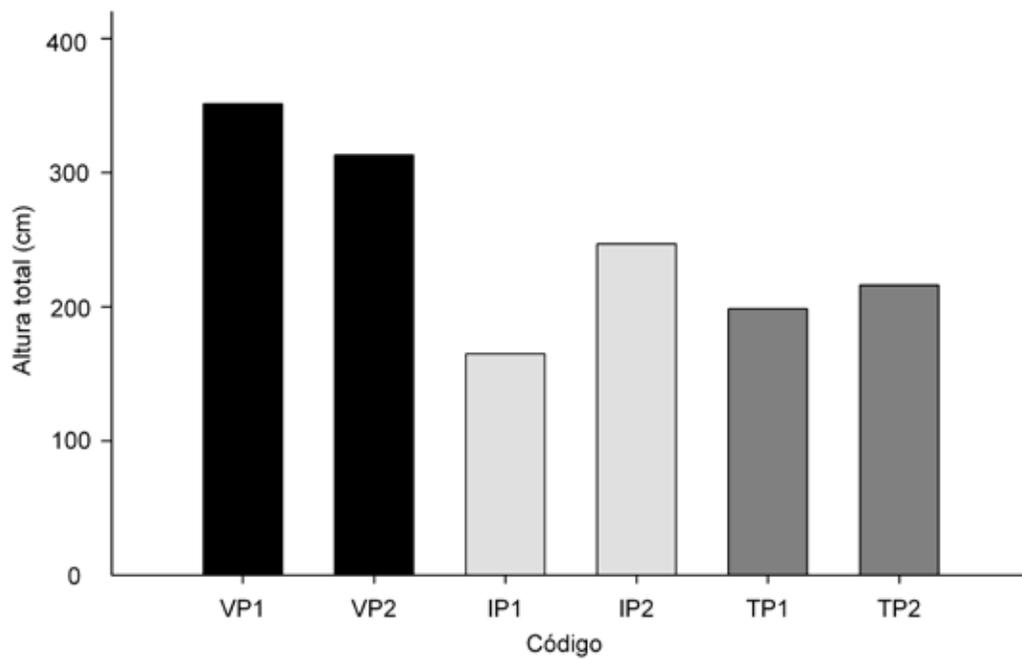


Figura 35. Altura total (cm) de plantaciones de *P. elongata x fortunei* medida a los 18 meses de crecimiento (abril 2014) (Alturas para la densidad 1000 arb/ha). Detalle de los códigos en Tabla 7.



Figura 36. Medición de altura con vara telescópica en sitio La Isla, diciembre 2013



Figura 37. Medición de altura con huincha en sitio Trehualemu, diciembre 2013.

5.3 Rendimiento de biomasa

El rendimiento de biomasa del cultivo fue mayor en el sitio El Vergel, proyectada a los 18 meses de crecimiento (abril 2014) (Tabla 8, Figura 38). En las Figuras 39, 40 y 41 se aprecian las actividades de medición.

Tabla 8. Biomasa fustal (ts/ha) y densidad de la madera (kg/m³) de plantaciones de *P. elongata x fortunei*, a los 18 meses de crecimiento (abril 2014).

Sitio	Clon	Código	Biomasa (1) ts/ha	Biomasa (2) ts/ha	Densidad madera (1) kg/m ³
El Vergel	112®	VP1	4,60	5,50	252,9
	Liberado	VP2	3,75	3,18	240,8
La Isla	112®	IP1	0,32	0,52	282,5
	Liberado	IP2	0,84	1,57	256,1
Trehualemú	112®	TP1	1,37	1,43	231,3
	Liberado	TP2	1,58	2,28	244,9

(1) Promedio entre densidad 1000 arb/ha y 2500 arb/ha. (2) Biomasa fustal densidad 1000 arb/ha. En ambos casos la biomasa fustal fue determinada en julio de 2013 y proyectado su valor a abril de 2014.

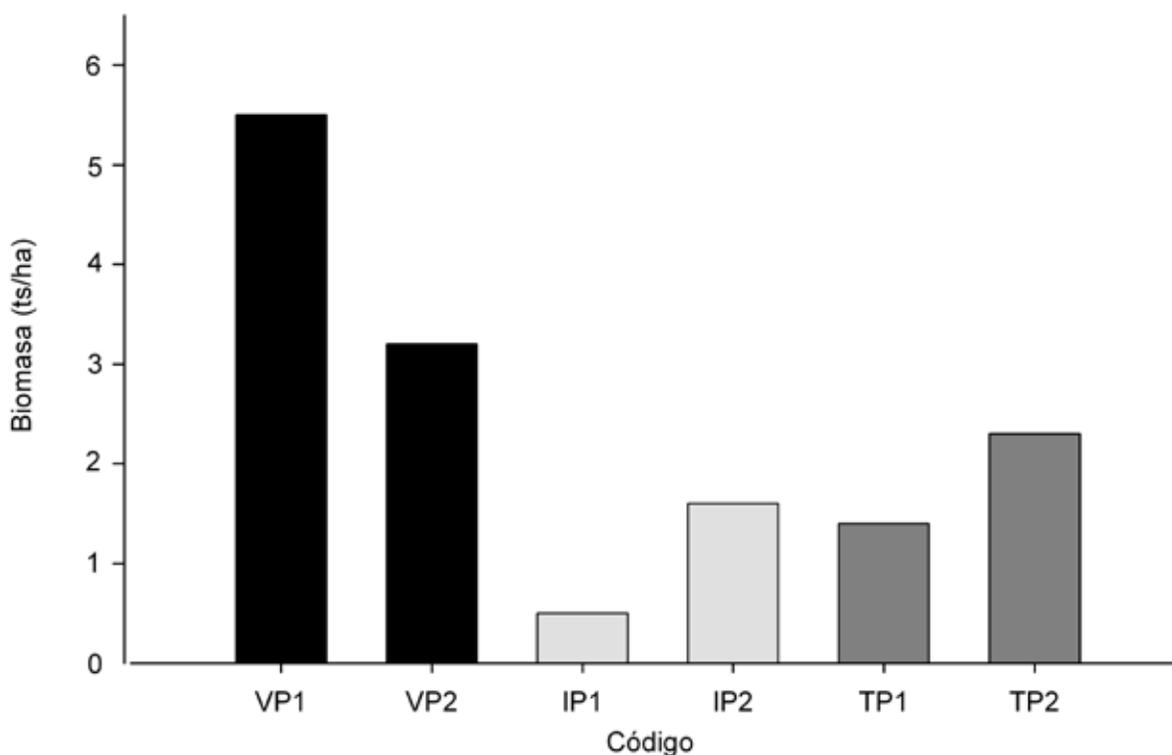


Figura 38. Biomasa (ts/ha) del cultivo de *P. elongata x fortunei*, proyectada a los 18 meses de crecimiento (abril 2014). Detalle de los códigos en Tabla 8.



Figura 39. Cosecha plantación de *P. elongata x fortunei*, julio 2013, en sitio La Isla.



Figura 40. Acopio y transporte de biomasa de *P. elongata x fortunei* en sitio El Vergel.



Figura 41. Determinaciones de variables de la biomasa de *P. elongata x fortunei*. A) Determinación de densidad. B) Secado de la biomasa.

5.4 Caracterización energética

En la Tabla 9 y Figuras 42, 43 y 44 se presentan los parámetros calorimétricos del cultivo de *P. elongata x fortunei*. En las Figura 45 y 46 se aprecian la bomba calorimétrica y material para determinación del poder calorífico de Paulownia.

Tabla 9. Parámetros calorimétricos del cultivo de *P. elongata x fortunei*, para los tratamientos estudiados.

Sitio	Clon	Densidad pl/ha	Código	Contenido humedad %	Cenizas %	Poder calorífico superior kcal/kg
El Vergel	112®	1000	VP1D1	5,6	2,2	4.338,9
	112®	2500	VP1D2	5,8	2,0	4.482,1
	Liberado	1000	VP2D1	5,4	2,1	4.343,7
	Liberado	2500	VP2D2	5,2	2,2	4.391,4
La Isla	112®	1000	IP1D1	6,4	1,6	4.219,6
	112®	2500	IP1D2	4,7	1,8	4.412,9
	Liberado	1000	IP2D1	4,7	1,9	4.324,6
	Liberado	2500	IP2D2	4,6	2,0	4.360,4
Trehualemú	112®	1000	TP1D1	3,5	2,0	4.422,4
	112®	2500	TP1D2	3,9	2,2	4.403,3
	Liberado	1000	TP2D1	4,3	2,0	4.381,9
	Liberado	2500	TP2D2	4,4	1,1	4.398,6

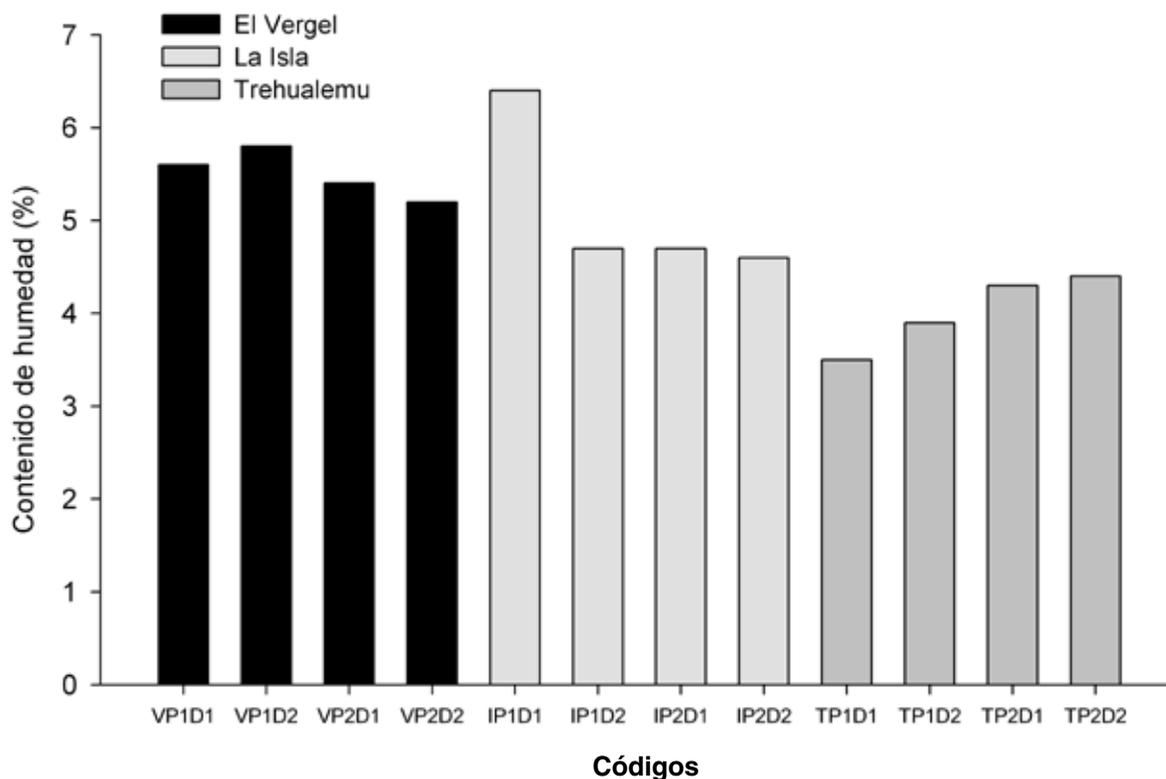


Figura 42. Contenido de humedad (%) del cultivo de *P. elongata x fortunei*, según tratamiento y sitio (detalle de los códigos en Tabla 9).

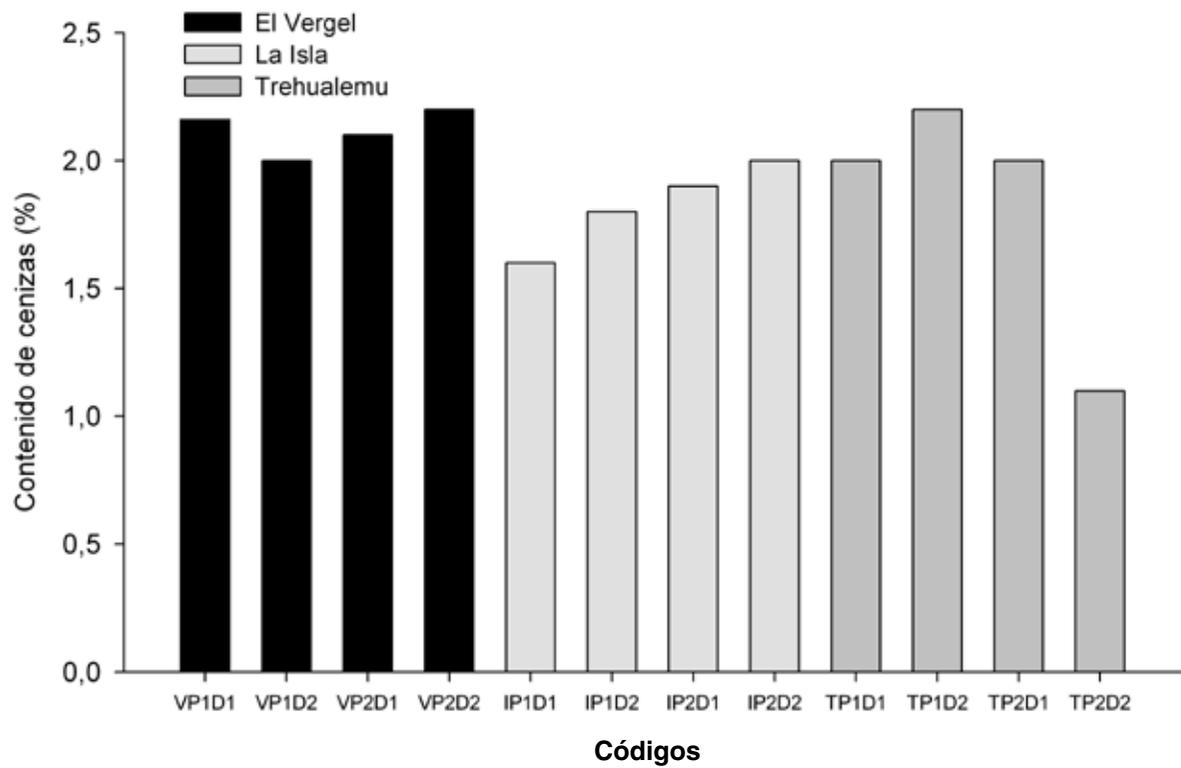


Figura 43. Contenido de cenizas (%) del cultivo de *P. elongata x fortunei*, según tratamiento y sitio (detalle de los códigos en Tabla 9).

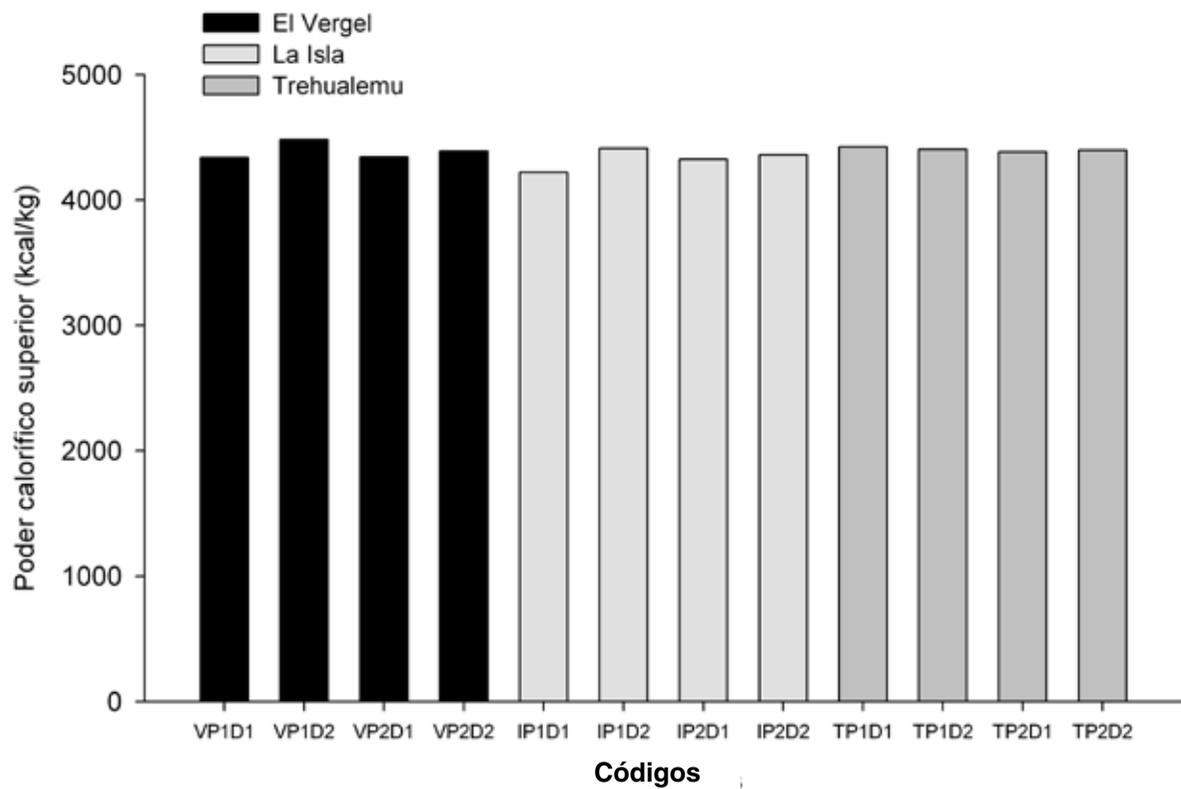


Figura 44. Poder calorífico (Kcal/kg) del cultivo de *P. elongata x fortunei*, según tratamiento y sitio (detalle de los códigos en Tabla 9).



Figura 45. Bomba calorimétrica, modelo PARR 6400, utilizada para la determinación de poder calorífico.



Figura 46. Almacenamiento de material de *Paulownia* para análisis.

Resultado del análisis elemental de la biomasa de *P. elongata x fortunei*

El resultado de análisis elemental de biomasa de *P. elongata x fortunei* obtenida en los diferentes sitios ensayados, se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10. Análisis elemental de la biomasa de *P. elongata x fortunei*, DS: Desviación estándar.

Sitio	Clon (1)	Análisis			
		Resultado % p/p ± % DS			
		Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre
El Vergel	P1	49,4 ± 0,4	6,9 ± 4,0	< 2	< 2
	P2	48,6 ± 0,7	7,3 ± 3,0	< 2	< 2
La Isla	P1	49,3 ± 0,1	6,75 ± 3,4	< 2	< 2
	P2	50,2 ± 0,4	7,20 ± 3,1	< 2	< 2
Trehualemú	P1	48,6 ± 0,3	7,1 ± 2,2	< 2	< 2
	P2	49,0 ± 1,6	7,1 ± 7,8	< 2	< 2
	Nac	50,0 ± 1,5	6,9 ± 6,7	< 2	< 2

(1) P1: Clon 112®, P2: Liberado, Nac: Nacional.

Resultado del análisis de la composición química de la biomasa de *P. elongata x fortunei*

El resultado de análisis de la composición química de la biomasa de *P. elongata x fortunei* obtenida en los diferentes sitios ensayados, se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Composición química de la biomasa de *P. elongata x fortunei* en base a peso seco.

Sitio	Clon (1)	Celulosa %	Hemicelulosa %	Lignina %	Grupos acetilo %	Otros %
El Vergel	P1	33,2	14,6	29,3	3,1	19,8
	P2	32,8	15,1	29,8	3,1	19,2
La Isla	P1	33,2	17,1	33,7	3,2	12,8
	P2	33,1	14,9	31,9	3,3	16,8
Trehualemú	P1	32,8	15,1	27,8	2,7	21,6
	P2	32,4	14,8	27,7	2,7	22,4
	Nac	33,0	16,0	30,0	3,7	17,3

(1) P1: Clon 112®, P2: Liberado, Nac: Nacional

5.5 Etanol

El resultado de la determinación de etanol con biomasa de *P. elongata x fortunei* obtenida en sitio El Vergel, al término del periodo 2012-2013 (julio del 2013), se presenta en la Tabla 12 y Figura 47.

Tabla 12. Estimación del contenido de etanol (l/t) de *P. elongata x fortunei* a partir de la determinación de carbohidratos por hidrólisis ácida.

Sitio	Clon (1)	Código	Hexosas %	Pentosas %	Etanol (hexosas + pentosas)		Etanol (hexosas)	
					l/ton (90%)	l/ton (100%)	l/ton (90%)	l/ton (100%)
El Vergel	P1	VP1	36,9	10,9	283,3	314,8	217,5	241,7
	P2	VP2	36,6	11,3	283,9	315,5	215,8	239,7
La Isla	P1	IP1	38,4	11,9	297,9	331,0	226,1	251,2
	P2	IP2	35,7	12,3	284,5	316,2	210,3	233,7
Trehualemu	P1	TP1	32,8	15,1	284,5	316,1	193,4	214,8
	P2	TP2	41,4	10,2	305,6	339,5	244,0	271,2
	Nac	TNac	36,2	12,8	290,6	322,9	213,4	237,1

(1) P1: Clon 112®, P2: Liberado, Nac: Nacional

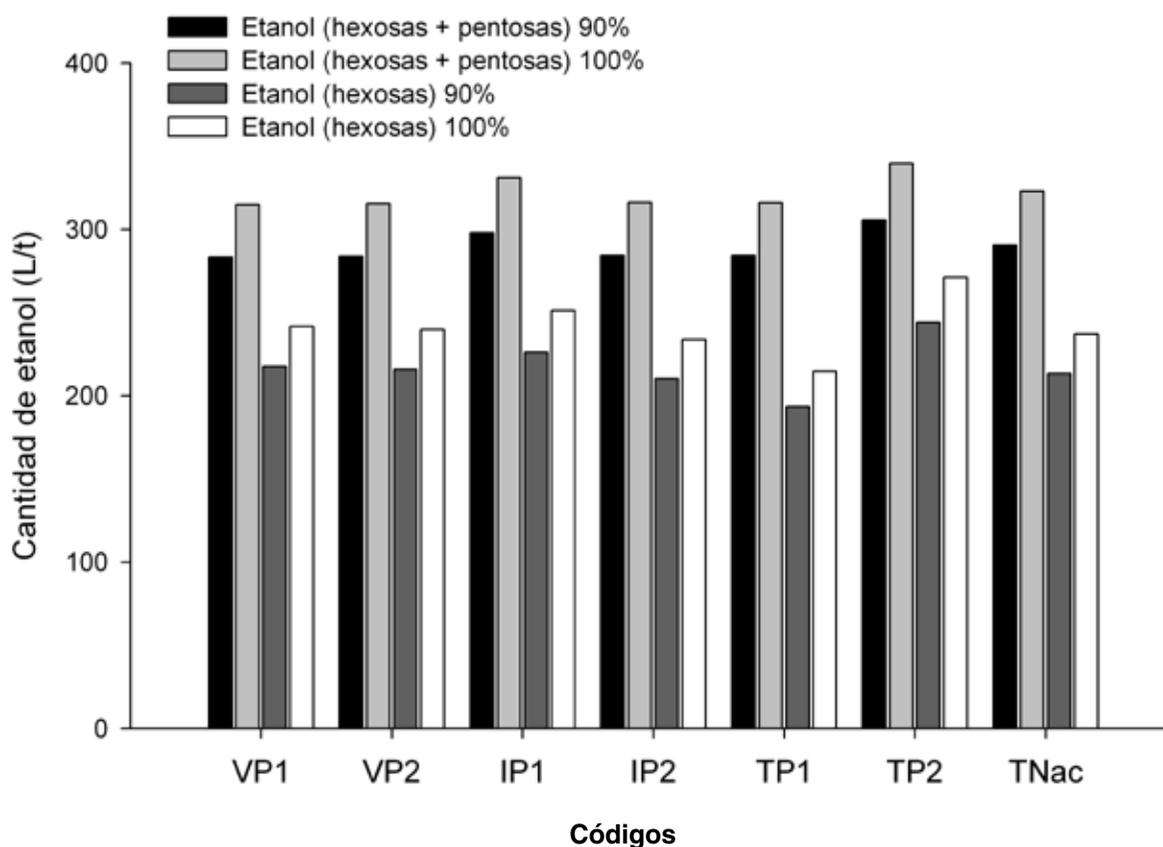


Figura 47. Estimación del contenido de etanol (l/t) de *P. elongata x fortunei*, considerando el 90 y 100% de rendimiento, a partir de la determinación de carbohidratos por el método de hidrólisis ácida (detalle de los códigos en Tabla 12).

5.6 Pélets

Las propiedades de los pélets elaborados con biomasa de *P. elongata x fortunei* obtenida en sitio El Vergel, al término del periodo 2012-2013 (julio del 2013), se presenta en la Tabla 13. En las Figuras 48 y 49 se observa la maquinaria utilizada para el proceso de peletización y los pélets obtenidos.

Tabla 13. Propiedades de pélets de biomasa de *P. elongata x fortunei* recolectada en sitio El Vergel.

Clon	Número de pasadas	Tamaño partícula mm	C.H. %	Largo mm	Diámetro mm	Densidad sólida gr/cc	Durabilidad %
112@	1	6	9,92	7,99	6,79	0,80	3,71
Liberado	1	6	9,42	20,04	6,36	1,03	3,85
112@	2	6	8,13	22,46	6,47	1,00	2,94
Liberado	2	6	8,58	18,54	6,20	1,19	1,61
112@	3	6	9,38	20,88	6,35	1,09	1,62
Liberado	3	6	6,22	21,94	6,15	1,18	1,74
112@	1	2	9,81	19,91	6,45	1,00	2,75
Liberado	1	2	7,58	20,47	6,25	1,12	1,86
Norma pélets DIN Plus			≤ 10	≤ 5 * d	4 ≤ d < 10	≥ 1,12	≤ 2,6

Adicionalmente, se determinó la densidad aparente en una muestra de pélets elaborado con mezcla de biomasa del clon 112@ y liberado, tanto de 6 y 2 mm de tamaño de partícula, el resultado indica 0,566 t/m³.



Figura 48. A) Máquina de molienda y B) máquina peletizadora, Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT) de la Universidad de Concepción.

Conclusiones



6. Conclusiones

El resultado del establecimiento de cultivos dendroenergéticos con *Paulownia elongata x fortunei*, en tres sitios contrastantes de la zona centro sur de Chile, señala que la especie presenta gran variación de rendimiento en biomasa. En sectores costeros, de suelos de textura franco-arcillosa-limosa con capacidad de retención de humedad, se obtuvo los mejores rendimientos y éstos se encuentran en línea con lo reportado por la literatura. De igual manera, los parámetros calorimétricos y obtención de etanol son similares a los obtenidos en otros estudios. El análisis de los pélets elaborados con la biomasa del cultivo determinó que su calidad se ajusta a lo establecido para este tipo de producto.

Durante el desarrollo del proyecto de investigación, se logró conocer y aplicar técnicas de establecimiento de *Paulownia*, determinar su capacidad de crecimiento y evaluar la calidad de la biomasa para su uso en energía. Finalmente, con la información de los sitios ensayados, es posible seleccionar terrenos para establecer cultivos y obtener buenos rendimientos de biomasa para su uso en la generación de energía.

Bibliografía



7. Bibliografía

- Barton I.L., Nicholas I.D., Ecroyd C.E. 2007. *Paulownia*. Forest Research Bulletin No. 231: 1174 - 5096.
- Bergmann B.A. 1998. Propagation method influences first year field survival and growth of *Paulownia*. *New Forests* 16: 251–264.
- Bergmann, B.A. 2003. Five years of *Paulownia* field trials in North Carolina. *New Forests* 25: 185–199, 2003.
- Bergmann B.A., Moon H.K. 1997. In vitro adventitious shoot production in *Paulownia*. *Plant Cell Reports* 16: 315 - 319.
- Bhat N.R., Madouh T.A., Manaie H.A.I., Zalzaleh M.A.I. 1998. Growth performance of *Paulownia* clones in the arid coastal climate of Kuwait. *Research Bulletin. Agricultural Research Center, King Saud University No 78*: 5-16.
- Castellanos O.A., Rodríguez A., Rodríguez J.M., Rodríguez B. 2006. Organogénesis indirecta y enraizamiento in vitro de *Paulownia elongata*. *E-Gnosis [online]* 4 (15): 1 -12.
- Carrasco P. y Millán J. 1990. Proyecto de suelos forestales de la VIII Región. Informe final. Chillán, Chile. Universidad de Concepción, Depto. de Cs. Forestales/Min. de Agricultura. 152 p.
- Castillo C.R., Gutiérrez M.A., Buenrostro M.T., Cetina V.M., Cadena J. 2012. Regeneración de plantas de *Paulownia elongata* Steud. por organogénesis directa. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 3 (10): 41 - 49.
- CIREN, 1999. Estudio Agrológico VIII Región: Descripción de suelos, materiales y símbolos. Instituto de Investigación de Recursos Naturales. Publicación No 121.
- Corredoira E., Ballester A., Vieitez M. 2008. Thidiazuron-induced high-frequency plant regeneration from leaf explants of *Paulownia tomentosa* mature trees. *Plant cell, tissue and organ culture* 95: 197 - 208.
- Corredoira E., Corredoira M., Cernadas M., San José M.C. 2010. Inducción de yemas adventicias en *Paulownia tomentosa*. Estudio anatómico del proceso caulogénico. *Revista Real Academia Gallega de Ciencias*. 29: 5-22.
- Del Pozo y Del Canto, 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Regional de Investigación Quilamapu, Chillán. Ministerio de Agricultura, Chile. 115 p.
- Hong D., Yang Y., Jin C., Fischer M.A., Holmgren N.H., Mill R.R. 1998. *Scrophulariaceae*. *Flora of China*, Vol. 18. Pags. 1-212.
- Hua Z.Z., Ching-Ju C., Xin-Yu L., Yao Gao Z. 1986. *Cultivation and Utilization*, Academy of Forestry, ANFBS and IDRC, Beijing, China.
- Ipekci Z., Gozukirmizi N. 2004 Indirect somatic embryogenesis and plant regeneration from leaf and internode explants of *Paulownia elongata*. *Plant cell, tissue and organ culture* 79: 341–345.
- Kasamaki P. 2007. *La Paulownia sp.* como base de los cultivos energéticos. Consultado en <http://www.vicedex.com/pdf/paulownia.pdf>.
- Longbrake C., McCarthy B. 2001. Biomass allocation and resprouting ability of princess tree (*Paulownia tomentosa*: *Scrophulariaceae*) across a light gradient. *American midland naturalist*. 146 (2): 388-403.
- Martínez, E., Lucas-Borja, M.E., Andrés Abellán, M., López Serrano, F.R., García Morote, A., del Cerro Barja, A., 2010. Aprovechamiento energético de *Paulownia spp.* en el ámbito mediterráneo. *Revista Montes* 102: 5–12.
- Mueller J.P., Luginbuhl J. M., Bergmann B. A. 2001. Establishment and early growth characteristics of six *Paulownia* genotypes for goat browse in Raleigh, NC, USA. *Agroforestry Systems* 52: 63-72.
- Olmstead R.G., DePamphilis C.W., Wolfe A.D., Young N.D., Elison W.J., Reeves P.A. 2001. Disintegration of the *Scrophulariaceae*. *American Journal of Botany*. 88 (2): 348-361.
- Santis, G. 2005. Mapa de reconocimiento de suelos de la región de Biobío (Sector Norte). Memoria de Título, Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile. Santiago – Chile.
- Silvestre A.J.D., Evtuguin D.V., Mendes A.P., Silva A.M. 2005. Lignans from a hybrid *Paulownia* wood. *Biochemical Systematics and Ecology* 33: 1298 – 1302.
- Sosa J.M., Ramos J.G. 2004. Propagación de esquejes axilares y raíces de *Paulownia elongata*: s. & Hu :, en el predio Mérida, municipio de Villaflores, Chiapas. Tesis - Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ciencias Agronómicas - 2004.
- Tigo, 2011. Datos meteorológicos. Observatorio Geodésico Integrado Transportable. Universidad de Concepción - Bundesamt für Kartographie und Geodäsie - Instituto Geográfico Militar (Chile). Disponible en: http://www.tigo.cl/index.php?option=com_tigometeo&Itemid=195&lang=es
- Van de Hoef, L. 2003. *Paulownia*, Agriculture Notes (AGO778). Department of Primary Industries, Box Hill, Melbourne, Australia, ISSN 1329-8062pp. pags. 1–3.
- Wang Q.B., Shogren J.F., 1992. Characteristics of the crop - *Paulownia* system in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 39 (3–4): 145 - 152.
- Woods V.B. 2008. *Paulownia* as a novel biomass crop for Northern Ireland. Ocasional publicación No. 7. Global Research Unit. Agrifood Bioscience Institute.
- Zhang L., Xu C., Champagne P. 2010. Overview of recent advances in thermo chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management* 51: 969 – 982.

Anexo Fotográfico



Producción de plantas



Monumentación de parcelas



Faenas / Roce



Faenas / Subsulado



Faenas / Plantación



Faenas / Control malezas



Faenas / Riego



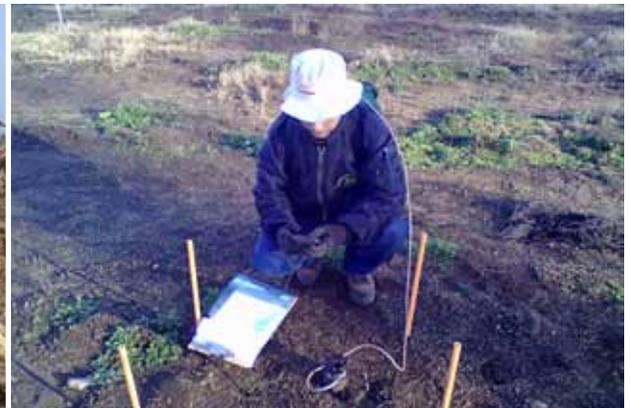
Desarrollo cultivo



Mediciones al cultivo / Muestras para análisis de suelos



Mediciones al cultivo / Medición humedad en el suelo



Mediciones al cultivo / Medición fotosíntesis



Mediciones al cultivo / Medición de crecimiento



Mediciones al cultivo / Medición hojas



Cosecha



Molienda de material



Sanidad



Floración



Presentaciones de resultados



