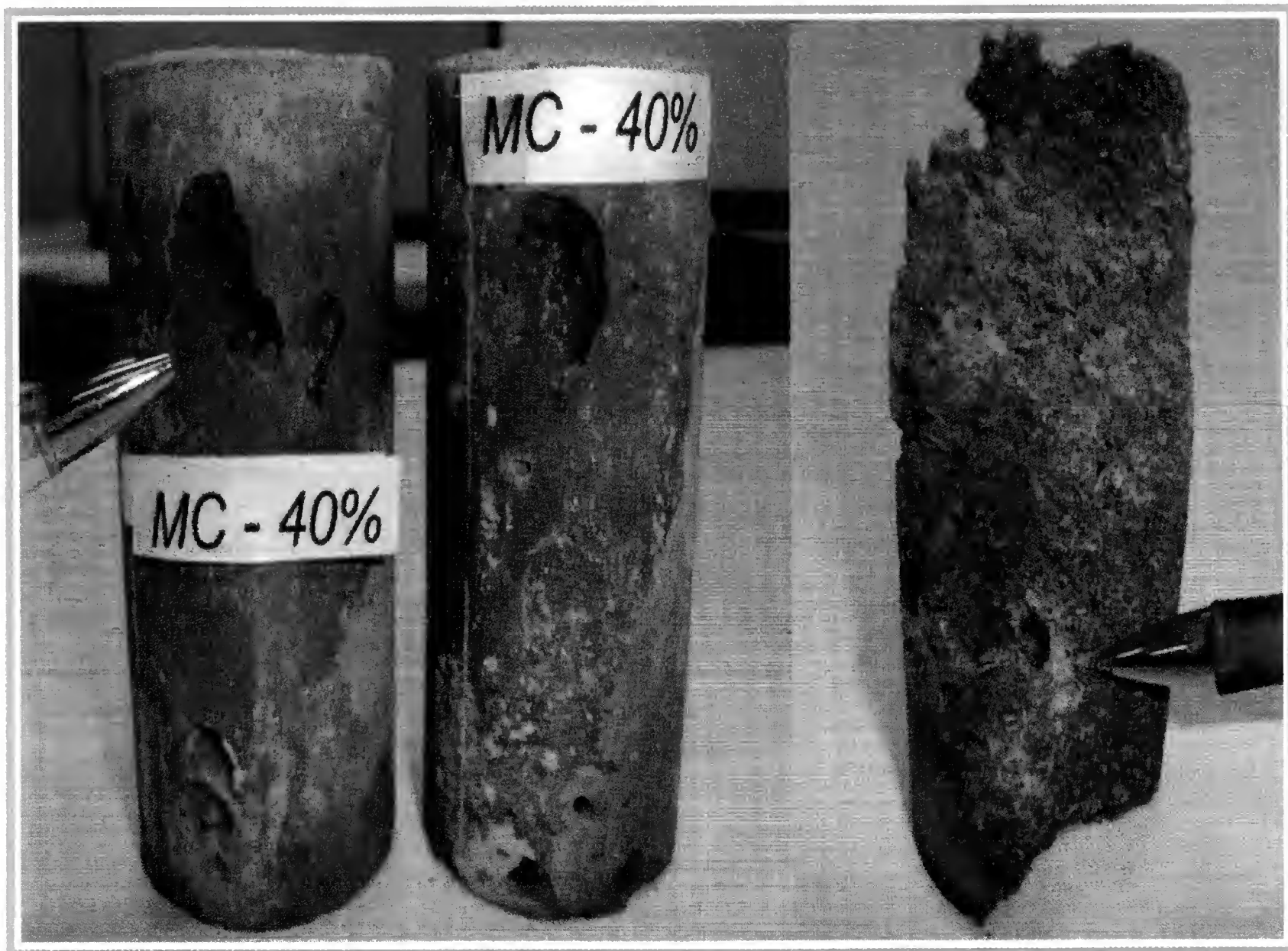


Madera y Bosques



INSTITUTO DE ECOLOGIA, A.C.

VERANO

2 0 1 1 17(2)

Xalapa, Ver.

Madera y Bosques, es una publicación del Instituto de Ecología, A.C., que edita la Red de Ambiente y Sustentabilidad. Los trabajos que publica tratan los temas de tecnología de productos forestales y del campo forestal en general, con énfasis en ecología forestal y manejo forestal. Se aceptan trabajos en español, inglés y ocasionalmente en otros idiomas. Su objetivo principal es constituirse en un medio de difusión de la investigación científica. Asimismo, publica contribuciones técnicas y estados del arte que incidan en el medio nacional e internacional. Es una publicación trimestral que aparece en primavera, en verano, en otoño y en invierno. Ocasionalmente se ofrecerá un número especial.

COMITÉ EDITORIAL

Editor, Raymundo Dávalos Sotelo

Dr. Patrick J. Pellicane

Dr. Martín A. Mendoza Briseño

Dr. Ariel Lugo

M.C. Freddy Rojas Rodríguez

Dr. Alejandro Velázquez Martínez

Dr. Juan José Jiménez Zacarías

Producción Editorial:

Aída Pozos Villanueva

Victoria Sáenz Fernández

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Óscar Aguirre Calderón - Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

M. I. Miguel Cerón Cardeña - Universidad Autónoma de Yucatán. México.

M.C. Mario Fuentes Salinas - Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Dr. Rubén F. González Laredo - Instituto Tecnológico de Durango. México.

Dr. Raymond P. Guries - University of Wisconsin. EUA.

Dr. Lázaro R. Sánchez Velázquez - Universidad Veracruzana, México.

Dr. Amador Honorato Salazar - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

Dr. Ezequiel Montes Ruelas - Universidad de Guadalajara. México.

Dr. José Návar Cháidez - Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

Dra. Carmen de la Paz Pérez Olvera - Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa. México.

Dr. Hugo Ramírez Maldonado - Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Dra. María de los Ángeles Rechy de Von Roth - Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

Dr. Víctor L. Barradas Miranda - Instituto de Ecología, UNAM. México.

Madera y Bosques, Vol. 17 Núm. 2 de 2011. Número de Certificado de Reserva otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor: 04-2005-062018152600-102. Número de Certificado de Licitud de Título: 12906. Número de Certificado de Licitud de Contenido: 10479. Domicilio de publicación: Carretera Antigua a Coatepec No. 351. El Haya. 91070 Xalapa, Ver., México. Imprenta: Editorial Cromocolor S.A. de C.V., Miravalles 703. Col. Portales 03300 México, D.F.

La suscripción anual para 2011 es de \$450.00+\$150.00 gastos de envío al interior de la República y \$45.00 USD al extranjero. Precio por ejemplares sueltos \$160.00 y \$15.00 USD, respectivamente. Incluye costos de envío por correo aéreo. Suscripciones en México en International Magazine Subscriptions, Tenochtitlan No. 26 L10 M7, Ampl. Tlacuítlapa, 01650 México, D.F. México, Tel/Fax?55) 5643-2939, ce:mmaximomx@yahoo.com.mx. Donaciones e intercambios, en el Instituto de Ecología, A.C., al c.e:libros@inecol.edu.mx. La reproducción total o parcial de los artículos podrá hacerse con el permiso expreso de los editores. Esta revista forma parte de los índices y portales de difusión ISI Web of Science (Science Citation Index Expanded), Revistas Mexicanas de Investigación en Ciencia y Tecnología (IRMICyT) del CONACYT, Redalyc, Dialnet, Periódica, Índice Iberoamericano de Información en Ciencia y Tecnología, SCOPUS, Actualidad Iberoamericana, CAB Forest Products Abstracts, Latindex y Serianam.

MADERA Y BOSQUES

Vol.17 Núm. 2

Verano de 2011

CONTENIDO

Editorial _____ **3**

Forum

Conservation and restoration of Mexican forests in the global change scenario: a shared responsibility with multiple benefits

Ernesto I. Badano _____ **7**

Artículos de investigación

Análisis de la abundancia e infección por muérdago en Sierra Fría, Aguascalientes, México

Ricardo Clark-Tapia, Brenda Torres-Bautista, Cecilia Alfonso-Corrado, Juan Valdez-Hernández, Gabriel González-Adame, Jorge Bretado-Velázquez y Jorge Campos-Contreras _____ **19**

Proliferación de embriones somáticos de *Nothofagus alpina*: efecto de la fuente de nitrógeno orgánico exógena

Hermes Castellanos, Darcy Ríos, Manuel Sánchez-Olate, Christian Wehenkel y Javier Corral _____ **35**

Utilização de resíduos de *Pinus* spp., metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira

Adauto José Miranda de Lima, Setsuo Iwakiri y María Guadalupe Lomelí-Ramírez _____ **47**

Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México

Salvador Balderrama-Castañeda, Concepción Luján-Álvarez, David K. Lewis, Juan A. Ortega-Gutiérrez, Ben H.J. de Jong y Tonatiuh Nájera-Ruiz _____ **67**

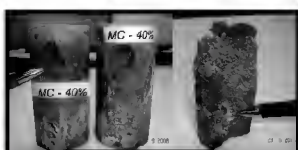
Properties of laminated curves manufactured with steamed veneers from fast-growth tropical wood in Costa Rica

Mahyar Shirazinia, Róger Moya y Freddy Muñoz _____ **85**

Guía de autores

Nuestra portada: Cilindros de concreto con agregados de meta-caolín con super-plastificante.

Autores: Adauto José Miranda de Lima, Setsuo Iwakiri y María Guadalupe Lomelí Ramírez.



MADERA Y BOSQUES

Vol.17 Num. 2

Summer 2011

TABLE OF CONTENTS

Editorial _____ **3**

Forum

Conservación y restauración de bosques mexicanos en el escenario del cambio global: una responsabilidad compartida con beneficios múltiples

Ernesto I. Badano _____ **7**

Research papers

Analysis of the abundance and mistletoe infection

in Sierra Fría Aguascalientes, México

Ricardo Clark-Tapia, Brenda Torres-Bautista, Cecilia Alfonso-Corrado, Juan Valdez-Hernández, Gabriel González-Adame,

Jorge Bretado-Velázquez y Jorge Campos-Contreras _____ **19**

Proliferation of somatic embryos of *Nothofagus alpina*:

effect of an exogen source of organic nitrogen

Hermes Castellanos, Darcy Ríos, Manuel Sánchez-Olate,

Christian Wehenkel y Javier Corral _____ **35**

Use the residue of *Pinus* spp, high reactivity metakaolin and residue of ceramic calcined in wood-cement composites

Adauto José Miranda de Lima, Setsuo Iwakiri y

María Guadalupe Lomelí-Ramírez _____ **47**

Feasibility of generating electricity through gasification of sawmill residues in the North of Mexico

Salvador Balderrama-Castañeda, Concepción Luján-Álvarez,

David K. Lewis, Juan A. Ortega-Gutiérrez, Ben H. J. de Jong

y Tonatiuh Nájera-Ruiz _____ **67**

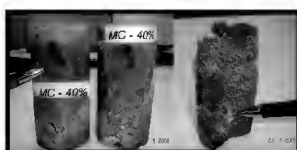
Propiedades de las curvas laminadas manufacturadas con chapas cocidas al vapor de madera tropical de rápido crecimiento en Costa Rica

Mahyar Shirazinia, Róger Moya y Freddy Muñoz _____ **85**

Author's guide

Our cover: Concrete cylinders with metakaolin aggregates with super-plastifier.

Authors: Adauto José Miranda de Lima, Setsuo Iwakiri y María Guadalupe Lomelí Ramírez.



En este año en que ha nacido el habitante de la tierra número 7 mil millones (una cantidad que se escribe con un número siete seguido de nueve ceros), el uso de los recursos se vuelve una situación crítica, debido a la enorme demanda de recursos por parte de la población. Esta gran necesidad de insumos nos obliga a buscar soluciones a la problemática socioambiental de la manera más inteligente para optimizar el uso de los recursos, atender los requerimientos de la humanidad y así mejorar la calidad de vida de la gente. El uso indiscriminado de los recursos, muchas veces irracional, ha creado condiciones inéditas en la vida del planeta, derivadas de las acciones humanas, como la incesante emisión de gases de efecto invernadero que propician cambios indeseables y potencialmente trágicos en el clima del planeta y en el ambiente, en general.

En este número nos complace publicar un artículo que aborda de manera muy clara el problema del fuerte cambio inducido por las actividades humanas, el cual usualmente se denomina Cambio Global. Como podemos leer en el manuscrito, la creciente preocupación sobre las consecuencias socioeconómicas de este fenómeno dio lugar a varios compromisos internacionales que apuntan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales se resumen en el Protocolo de Kioto de las Naciones Unidas. Este protocolo establece una serie de estrategias para mitigar y reducir el impacto atmosférico de las emisiones de CO₂, lo que originó la creación del mercado internacional del carbono. Las extensas áreas forestales de México pueden situar a este país en el mercado del carbono como un importante proveedor de servicios ambientales. La conservación y la restauración de bosques pueden verse como una potencial oportunidad de negocios, lo cual contribuiría al desarrollo socioeconómico del país. Para alcanzar estos objetivos se requiere la acción conjunta de diferentes sectores de la sociedad, incluidos gobiernos, empresas privadas, comunidad científica y población en general.

Otro tema de la mayor importancia ecológica se refiere a una plaga forestal que está teniendo efectos devastadores en una parte importante de los bosques mexicanos y de otros países. Se trata de los muérdagos, plantas hemi-parasíticas, que son el segundo agente de destrucción de los bosques mexicanos después del insecto descortezador. En el estudio aquí publicado se evaluó la infestación por muérdago en poblaciones forestales de Sierra Fría, Aguascalientes, con la finalidad de conocer los factores que influyen en la abundancia de muérdago, determinar el grado de infestación que presentan las especies hospederas e identificar si existe especificidad del muérdago por especie y tamaño del hospedero y/o por hábitat. Los resultados indican que el grado de infección por muérdago muestra asociación positiva con la altitud y orientación y una asociación negativa con la perturbación. Al aumentar en tamaño la altura y el diámetro, se incrementa el grado de infección. Los autores de este trabajo recomiendan realizar estudios futuros que permitan comprender los factores que dan forma a la distribución e interacción hemiparásito-hospedero dentro y entre poblaciones, con la finalidad de evaluar los daños reales o futuros.

*En el tercer estudio de este número, se estudió efecto de la fuente de nitrógeno orgánico exógena sobre la proliferación de embriones somáticos de *Nothofagus alpina*, una especie que crece en Sudamérica, particularmente en Chile y es considerada la especie nativa del bosque chileno con mayor potencial productivo. Este trabajo tiene una*

relevancia significativa para incrementar la regeneración de esta especie con fines productivos, así como para aprovechar a cabalidad el acervo genético de la especie para fines productivos y de conservación. Para esto, se probó el efecto de algunas fuentes de nitrógeno orgánico como caseína hidrolizada y los aminoácidos L-Glutamina y L-Serina en el proceso de embriogénesis somática secundaria directa, empleando como explantes embriones somáticos de *Nothofagus alpina* inducidos desde cotiledones aislados de semillas maduras.

En temas de tecnología de productos forestales, un artículo presenta los resultados de un estudio enfocado a la utilización de residuos de *Pinus spp.*, metacaolín de alta reactividad y residuo de cerámica calcinada en compuestos madera-cemento. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el uso potencial del residuo de aserrío de trozas de *Pinus spp.* y de sustituciones parciales de cemento Portland por metacaolín de alta reactividad y residuo de cerámica calcinada, en compuestos cemento-madera. Los resultados demostraron viabilidad técnica de la utilización del residuo de *Pinus spp.* y de las sustituciones del cemento Portland en el compuesto. En otro importante trabajo, se evaluó la factibilidad de generar energía eléctrica a partir del uso de residuos del aserrío mediante la tecnología de gasificación en dos aserraderos ejidales, en el estado de Chihuahua, México. La vegetación está constituida por bosque de pino y pino-encino. Se seleccionó la tecnología de gasificación de cama fija con flujo hacia abajo con costos y especificaciones de un proveedor de China. Se evaluó la viabilidad financiera de sistemas con capacidades variables bajo tres escenarios: base, optimista y pesimista. Se valoró el efecto de ingresos adicionales por venta de bonos de carbono en el mercado voluntario. La tasa interna de retorno (TIR) se incrementó consistentemente con la capacidad del sistema. Sin bonos de carbono, la rentabilidad privada solo resulta aceptable en el sistema con mayor capacidad en un escenario optimista. Se determinó que, bajo las condiciones del estudio, los sistemas evaluados reunirían los requisitos de adicionalidad que demanda el mercado del carbono.

El último trabajo publicado aquí se refiere a las curvas laminadas fabricadas con chapas vaporizadas. El uso de estas curvas permite obtener elementos con radios de curvatura más pequeños que cuando no se aplica este proceso. En este estudio, se presenta el comportamiento de madera de seis especies que crecen en Costa Rica, proveniente de plantaciones de rápido crecimiento, en la fabricación de curvaturas con diferentes radios. En la mayoría de los casos fue posible obtener radios de curvaturas pequeños. El proceso de vaporizado aumentó el contenido de humedad de la chapa. El uso de adhesivos permite que el radio de la curva fabricada se mantenga en radios menores a 10 cm para todas las especies. La resistencia al cortante (cizallamiento) no se alteró al someter a pruebas de envejecimiento, pero hay una mayor delaminación en todas las especies.

Estamos seguros que esta clase de estudios aportan información muy valiosa para los usuarios del recurso forestal en América Latina y probablemente en otros continentes también. Esperamos que estas contribuciones al estado del conocimiento de los recursos forestales de América Latina y su procesamiento para conversión en bienes de consumo ayuden en alguna medida en la importante tarea de alcanzar un uso y conservación equilibrada y racional de los recursos naturales de la región.

Raymundo Dávalos Sotelo
Editor

In this year in which the inhabitant number 7 billion (one seven followed by nine zeros) has been born, the use of resources becomes a critical issue due to the huge amounts of them that the growing population demands. This need for resources forces us to look for solutions to the supply problem that are intelligent and friendly with the social and environmental constraints, in order to optimize the use of such resources to tend to the needs of people and allow them to improve their standard of living. The irrational use of resources by the people without regard to the consequences has led mankind to the complicated current situation, never before faced by the world population; paramount among these antropogenic actions is the emission of greenhouse gases that are presumed to produce undesirable and potentially tragic changes in the planet's climate and in the environment, in general.

In this number we are pleased to publish a paper that approaches this subject in a very clear way. It stresses that these harsh changes, which are usually referred to as Global Change, create concern about the socioeconomic consequences of the phenomenon; these concerns have led to several international commitments for reducing the emissions of greenhouse gasses, summarized in the Kyoto Protocol of the United Nations. The Protocol established a number of strategies to mitigate and reduce the atmospheric impacts of CO₂ emissions, which led to the creation of the international carbon market. The extensive forested areas of Mexico may position this country in the carbon market as an important provider of environmental services. Therefore, conservation and restoration of Mexican forests can be viewed as a potential business opportunity that would contribute to the economic and social development of the country. However, reaching these goals requires the joint action of different social sectors, including governments, private companies, the scientific community and the general population.

A second paper deals with mistletoe, a hemiparasitic plant, which is the second most destructive agent for Mexican forests after the bark beetle. For this reason, in the study published here, its infestation in the forest populations of Sierra Fría, Aguascalientes was examined in order to: a) understand the factors that influence the abundance of mistletoe; (b) determine the infestation level present in host species and (c) identify if there exists specific types of mistletoe that correspond to different species and sizes of the host and / or habitat. The results indicate that the level of mistletoe infection shows positive association with altitude and orientation and a negative association with disturbance. It was found that as the size of dasometric attributes (height, diameter) increases so too does the degree of infection. The authors of this paper recommend that future studies be undertaken that allow for the understanding of the factors that shape the distribution and hemiparasitic-host interaction within and between populations, in order to assess real or future damage and to evaluate the selectivity towards certain host species and chemical changes from which trees suffer as a result of infection.

In the third article, the effect of some sources of organic nitrogen were tested in the process of direct secondary somatic embryogenesis, in which somatic embryos of *Nothofagus alpina* -induced from isolated cotyledons of mature seeds- were used as explants. This species grows in South America, particularly in Chile and is considered the species

*of the Chilean forest lands with the highest productive potential. This study is of the great significance and relevance in order to increase this species' regeneration for productive purposes as well as to exploit to the fullest the genetic qualities of the species for reproduction and conservation. In order to achieve this, the effect of some sources of organic nitrogen, such as hydrolyzed casein and the amino-acids L-Glutamine and L-Serine, in the process of direct secondary somatic embryogenesis was evaluated, using as explants somatic *Nothofagus alpina* embryos induced from isolated cotyledons of mature seeds.*

*In a paper on the forest products technology subject, a research project is presented, developed with the objective to evaluate the potential use of residues of the production of sawn *Pinus spp* wood and partial substitutions of Portland cement for high performance metakaolin and residue of calcined ceramic in cement-wood composites. The evaluation of the physical characteristics (specific mass, porosity and water absorption) and mechanical characteristics (compression and traction strength) of the composites was obtained in agreement with the ABNT standards. The results demonstrated the technical viability to the use the residue of *Pinus spp* and the substitutions of the cement Portland in the composite. Another article deals with the feasibility of converting sawmill residues in electricity through gasification was evaluated in two sawmills of Chihuahua State. The tree cover is dominated by pine and pine-oak communities. The residues flow was estimated and its chemical composition and heating value characterized. The selected technology was the fixed bed downdraft gasifier; the costs and specifications data were provided by a Chinese supplier. The financial viability was evaluated with different plant configurations and three scenarios: base, optimistic and pessimistic. The effect of additional revenues from carbon credits sold at the voluntary market was assessed. The internal rate of return (IRR) increased consistently with increasing systems' capacity with the 800kW being the most economically attractive. In the context of the study, the systems evaluated would satisfy the additionality criteria required by the carbon market.*

*The last paper is a study on laminated curves (LC) made with steamed veneers. These curves make possible to obtain smaller curvature radius (RC) than when this process is not applied. This research shows the behavior of six species growing in Costa Rica, all originated from fast growth plantations, in the manufacture of laminated curves with different radius. The results show that it was possible to reach small RC values in all species except for *T. grandis*. The adhesive makes possible that bondline for small values of RC do not open. The aging test of adhesive did not alter significantly the shear stress, but delaminating due to the failure of the bondline increased in all species.*

We are confident that this kind of studies provides valuable information for users of forest resources in Latin America and probably in other continents as well. We hope that these contributions to the state of knowledge of forest resources in Latin America and its processing for conversion into consumer goods will help to some extent in the important task of achieving a balanced and rational use and conservation of the natural resources of the region.

Raymundo Dávalos Sotelo
Editor

Conservation and restoration of Mexican forests in the global change scenario: a shared responsibility with multiple benefits

Conservación y restauración de bosques mexicanos en el escenario del cambio global: una responsabilidad compartida con beneficios múltiples

Ernesto I. Badano¹

ABSTRACT

Our planet is facing a strong change induced by human activities, which is usually referred as Global Change. Concern about the socioeconomic consequences of this phenomenon has led to several international commitments for reducing the emissions of greenhouse gasses, which were summarized in the Kyoto Protocol of the United Nations. The Protocol established a number of strategies to mitigate and reduce the atmospheric impacts of CO₂ emissions, which led to the creation of the international carbon market. The extensive forested areas of Mexico may position this country in the carbon market as an important provider of environmental services. Therefore, conservation and restoration of Mexican forests can be viewed as a potential business opportunity that would contribute to the economic and social development of the country. However, reaching these goals requires the joint action of different social sectors, including governments, private companies, the scientific community and the general population. This article illustrates how this interaction can be articulated and how it can provide multiple benefits for contributing parties.

KEYWORDS:

Carbon market, carbon credits, ecosystem services, Kyoto Protocol, sustainable development.

RESUMEN

Nuestro planeta enfrenta hoy un fuerte cambio inducido por las actividades humanas, el cual usualmente se denomina Cambio Global. La creciente preocupación sobre las consecuencias socioeconómicas de este fenómeno dio lugar a varios compromisos internacionales que apuntan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales se resumen en el Protocolo de Kioto de las Naciones Unidas. Este protocolo establece una serie de estrategias para mitigar y reducir el impacto atmosférico de las emisiones de CO₂, lo que dio lugar a la creación del mercado internacional del carbono. Las extensas áreas forestales de México pueden situar a este país en el mercado del carbono como un importante proveedor de servicios ambientales. Por lo tanto, la conservación y la restauración de bosques en México pueden verse como una potencial oportunidad de negocios, lo cual contribuiría al desarrollo socioeconómico del país. Sin embargo, para alcanzar estos objetivos se requiere la acción conjunta de diferentes sectores de la sociedad, incluidos gobiernos, empresas privadas, comunidad científica y población en general. Este artículo provee ejemplos acerca de cómo esta interacción puede ser articulada y cómo puede proporcionar múltiples beneficios para los sectores participantes.

PALABRAS CLAVE:

Mercado de carbono, créditos de carbono, servicios ecosistémicos, Protocolo de Kioto, desarrollo sustentable.

1 División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Camino a la Presa San José 2055, Colonia Lomas 4a. Sección, CP 78216, San Luis Potosí, México. c.e.: ernesto.badano@ipicyt.edu.mx.

INTRODUCTION: THE GLOBAL CHANGE SCENARIO

Species extinctions are common and recurrent events during the natural history of our planet. Five mass species extinctions, known as the “Big Five”, have occurred over the last 400 million years (Raup and Sepkoski, 1982). The causes of these extinction events are not known with certainty, but could be attributed to natural forces that caused strong environmental changes in the planet, such as the continental drift, glaciations, pulses of intense volcanic activity, and the impact of meteorites (Raup and Sepkoski, 1984). The Earth is now facing the sixth mass extinction in its history. Nevertheless, contrary to the previous events, the causes of current extinctions are linked with the environmental changes induced by a single species: *Homo sapiens* (Chapin *et al.*, 1998). Species extinction rates before the appearance of *H. sapiens*, around 200 000 years ago, were 100-1 000 times lower than current extinction rates. Indeed, extinction rates are expected to experience a tenfold increase during the next 100 years (Pimm *et al.*, 1995).

The consequences of human activities on the biosphere are currently summarized as the “Global Change phenomenon” (Chapin *et al.*, 1997). The mass-media information organisms usually link this phenomenon with its most well-known contributing factor: the climate change caused by the greenhouse effect. However, besides climate change, several other factors contribute to Global Change. These factors include: change in land use, habitat loss, habitat fragmentation and biological invasions. Change in land use is the replacement of large areas of natural ecosystems by agricultural, urban or other types of human environments. Inevitably, these changes cause reductions in the amount of habitat that species can use for surviving and repro-

ducing (Brooks *et al.*, 2002). These two factors, land use change and habitat loss, usually lead to fragmented landscapes, where some patches of the original vegetation remain immersed in the human modified matrix (Saunders *et al.*, 1991). These patches may then act as reservoirs of flora and fauna, but their reduced area and the lack of a connection with other patches increase local inbreeding and extinction risks of those species that require large home ranges for survival (Baz and García-Boyeró, 1996; Gilbert *et al.*, 1998). Finally, biological invasions can be broadly defined as the intentional or unintentional expansion of the biogeographic range of a given species because of human activities (Rejmánek *et al.*, 2002). This introduction of exotic species into ecosystems may cause strong changes in the structure and functioning of natural communities (Badano and Pugnaire, 2004; Castro *et al.*, 2010), which in turn may lead to the competitive displacement of native species (Callaway and Aschehoug, 2003; Bais *et al.*, 2003). All these human-induced factors are threatening the diversity of life on earth, or biodiversity, as it is often called (Earth Summit, Rio de Janeiro 1992). Biodiversity, however, is an irreplaceable natural heritage and it is crucial for human welfare and economy (Loreau *et al.*, 2006). For these reasons, the preservation and restoration of natural ecosystems have become global aims.

The preservation and restoration of forests have acquired particular relevance in this Global Change scenario. This is because forest ecosystems perform a variety of functions and provide a number of services (Ruiz, 2001). To avoid confusions, we will use the term “ecosystem function” to refer to the outcome of the interactions between organisms and the physical environment (e.g., nutrient cycling, water capture, soil development, carbon sequestration) (Chapin *et al.*,

1997). On the other hand, the term “ecosystem services” will refer to a given set of ecosystem functions which have an associated value for humans, be it economic, social or cultural (Giller and O’Donovan, 2002). The existence of our species depends on ecosystem services, primarily the provision of resources and the maintenance of the biosphere. In this context, forests are important for humans because, among other services they provide, they act as freshwater reservoirs and are the main carbon sinks in the planet (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

MEXICAN FORESTS AND THE GLOBAL CHANGE

Mexico is a megadiverse country with large forestry areas. These ecosystems include tropical, subtropical and temperate forests (Rzedowski, 1978), containing a great part of the animal and plant biodiversity of the world. For these reasons, the larger part of the surface of this country is considered a world conservation priority, and it was included in the traditional Mesoamerican Biodiversity Hotspot (Myers *et al.*, 2000) and the recently defined Madrean Pine-Oak Woodlands Biodiversity Hotspot (Mittermeier *et al.*, 2004). The Mesoamerican Hotspot covers all the tropical and subtropical Mexican forests, irrespectively if they are moist, seasonal or dry forests. This hotspot entirely covers the five southernmost Mexican states (Campeche, Chiapas, Tabasco, Quintana Roo, and Yucatán), but it also extends as far north as northern Sinaloa, on the Pacific Coast, and as far as Tamaulipas, on the coast of the Gulf of Mexico (Myers *et al.*, 2000). The Madrean Pine-Oak Woodlands Hotspot includes temperate forests located on the main mountain chains of Mexico, namely the Sierra Madre Occidental (including the Madrean Sky Islands

of southern Arizona and New Mexico), the Sierra Madre Oriental, the Trans-Mexican Volcanic Belt, the Sierra Madre del Sur, the Sierra Norte de Oaxaca, and some isolated mountaintop islands in Baja California (Mittermeier *et al.*, 2004).

However, in spite of the high biodiversity that these forests support, they are strongly threatened because of the uncontrolled wood exploitation. In 2005, the National Forestry Commission of Mexico (CONAFOR) indicated to the advisory group for Global Forest Resources Assessment of the Food and Agriculture Organization (FAO) that the current forestry surface area of Mexico was 64 238,000 hectares (FAO, 2006); this area represents up to 34% of the total surface of the country. However, during the last century, overpopulation, unplanned urban growth and the application of unsustainable industrial and farming technologies have led to overexploitation of these natural resources, strong changes in land use and heavy losses of natural habitats. This history of environmental degradation is well illustrated by the rates of deforestation estimated with data recorded throughout the last 30 years. Lund *et al.* (2002), for example, indicated that Mexico loses up to 2 000 000 ha of forest per year. The FAO, on the other hand, has made more conservative estimations and indicated that these rates range from 350 000 to 650 000 ha per year (FAO, 2006).

Irrespectively of the precision of these estimates, deforestation seems to threaten the future of Mexican forests. The World Health Organization (WHO) indicated that Mexico should have had approximately 0,7 ha of forest per inhabitant during the first decade of this century. However, Mexico only has 0,5 ha of forest *per capita* (Velazquez *et al.*, 2002). This indicates that deforestation rates in Mexico exceed the reforestation efforts of

governmental agencies. The current situation might be even more critical in the future; if deforestation rates remain constant for the next decade, then forest cover by 2025 will be reduced to 0,3 ha *per capita* (Velazquez *et al.*, 2002). This change in land use, together with the increasing air pollution, may injure population welfare in the short term because of the reduction of ecosystems that provide atmospheric cleansing services.

A number of questions arise from this bleak picture: (1) Can we effectively reverse this situation? (2) Are conservation and restoration practices viable? (3) Are there benefits that can be derived from these activities? The next sections attempt to illustrate how cooperation among different sectors of society can contribute to positively answering these questions.

POTENTIAL BUSINESS OPPORTUNITIES BEHIND CONSERVATION AND RESTORATION IN MEXICO

A general analysis of the conservation policies of different Latin American countries (see Appendix) indicates that most of the decisions for preserving natural areas are dependent on the governmental sector. These decisions are mainly rooted in ethical principles (preserving the habitat of endangered species or some natural resource) and recreational purposes (spaces for promoting the interaction between humans and nature). The potential economic benefits of the ecosystem services that natural areas provide are usually not taken into account in these decisions, but it could be crucial for the success of conservation programs. Costanza *et al.* (1997), for example, made a series of economic analyses to determine the value of the ecosystem services that the nature provides. After including

several types of ecosystems and their multiple services, these authors indicated that we perceive benefits worth over 33 billion U.S. dollars from natural ecosystems. Therefore, promoting environmental protection activities can be currently visualized as a highly profitable business for governments and private companies disposed to invest in it. But, why should we promote these investments?

Ecosystem conservation and restoration are critical activities for mitigating the expected impacts of climate change. Whether this phenomenon exists or not has been matter of discussion during several years. However, in 1988, the World Meteorological Organization and the United Nations Environment Programme created the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The aim of the IPCC is analyzing scientific information required to assess the environmental and socioeconomic consequences of climate change. Since 1992, the IPCC has provided considerable evidence indicating that: (1) the global climate change phenomenon effectively exists, (2) it is induced by human activities, and (3) it is mainly caused by the emission of greenhouse gases to the atmosphere (carbon dioxide and carbon monoxide, methane, nitrous oxide, hydrofluorocarbons, perfluorocarbons and sulfur hexafluoride) (IPCC, 2007). In 1997, the increasing concerns about the consequences of climate change lead to an international agreement for reducing greenhouse gas emissions, which is known as the Kyoto Protocol (United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998). The party countries that signed this protocol were committed to promote environmentally sustainable economies that, besides reducing emissions of greenhouse gases, must also protect and increase the surface of ecosystems that act as sinks of

these gases. Thirty nine of the 190 countries that originally signed the protocol, most of them developed countries or countries that are undergoing the process of transition to a market economy, accepted targets for limiting or reducing emissions (countries in Annex B of the Kyoto Protocol). These targets were expressed as levels of allowed emissions that these countries could produce over the period 2008-2012. The remaining parties, considered as developing countries, had no such a commitment, and Mexico was included in this last group of countries (Tudela, 2004).

Although these targets should be primarily reached by developing national policies, the Kyoto Protocol also introduced market-based "Flexibility Mechanisms" for reducing the impacts of greenhouse gases on the environment, and especially carbon dioxide (CO₂). The term "flexibility" was introduced in this concept because the geographic difference between the sites where CO₂ is produced and where it is fixed by vegetation does not matter for the climate. Thereby, the protocol led to the creation what is currently known as "carbon offset market" and stated three Flexibility Mechanisms:

1. Emissions Trading (Article 17 of the Kyoto Protocol): This only applies to parties that have accepted targets for limiting or reducing emissions (Annex B of the Kyoto Protocol). If these countries have emission units to spare (emissions permitted, but not used), they can sell this excess capacity to countries that are over their targets.

2. Clean Development Mechanism (Article 12 of the Kyoto Protocol): This mechanism allows those countries that have accepted targets for limiting or reducing emissions to implement emission-reduction projects in developing countries (countries not included in Annex

B of the Kyoto Protocol). These projects must generate carbon credits (one carbon credit equals one ton of CO₂ emissions). The projects might involve, for example, rural electrification programs using solar panels, increasing the cover of forests (reforestation) or protecting ecosystems that are fixing large amounts of CO₂.

3. Joint Implementation (Article 6 of the Kyoto Protocol): This mechanism allows a country with an emission reduction or limitation commitment to earn carbon credits in countries not included in Annex B of the Kyoto Protocol, which have no emission reduction commitments. The projects under this mechanism must provide a reduction in emissions by sources, or an enhancement of removal by sinks, that is additional to what would otherwise have occurred; this is known as "additionality" and an example of this is given below.

The extensive natural forested areas of Mexico may position this country in the international carbon market as an important provider of environmental services. Indeed, the adequate implementation of restoration programs on deforested areas might expand the supply of these services on both short and long term bases. Therefore, the introduction of Mexico in the international carbon market would have strong positive impacts on its economic and social development programs, while also promoting the conservation and restoration of natural areas.

A good starting point to illustrate this opportunity for business using carbon fixation is the system of natural protected areas of Mexico. The National Commission of Natural Protected Areas (CONANP) indicates that Mexico currently has 171 natural protected areas covering more than 25,3 million of hectares; this represents 13% of the country's surface (CONANP, 2010). Indeed, after signing the

Nagoya–Kuala Lumpur Protocol (United Nations Environment Programme, 2011), this country assumed the commitment of increasing the surface of its terrestrial protected areas up to 17% by 2020. This environmental policy allows to visualize promising scenarios for Mexico in the world carbon market. This suggestion is rooted in two main facts: (1) more than the third part of the current protected areas corresponds to different forest types (temperate forests, tropical forests, among others); and (2) the net carbon sequestration is expected to increase continuously during the next years (see Table 1) if the surface area of protected forests is still increasing at the same rate than that observed between 1990 and 2000 (Masera *et al.*, 2001). Therefore, Mexican government should receive significant inflows of money for just having well preserved forests that are fixing enormous amount CO₂ per year. However, this is not the current situation because detailed studies indicating the exact rates of carbon fixation at different forests types are still scarce (but see Ordoñez-Díaz, 1999; Masera *et al.*, 2001). Then, the first

step that requires investing funds and time to reach such an economic goal is to determine the annual rates of carbon fixation, or the amount of carbon credits provided per year, for later offering these services on the international market.

Another interesting example for this business opportunity comes from non-protected forests. Since the Agrarian Reform, after the Mexican Revolution at beginning of the XX century, extensive areas of land were expropriated from landowners and assigned to groups of farmers to meet their basic needs. These lands of common use are called “ejidos” and are exploited by rural people usually belonging to the same social group. However, The National Council of Evaluation of Social Development Policy of Mexico (CONEVAL) indicates that several farmers are abandoning lands and looking for work opportunities in the cities because farms are not producing enough to support their families (CONEVAL, 2007). These abandoned farms currently have limited exploitation regimens by the remaining farmers, or they are no longer exploited.

Table 1. Total values of net carbon sequestration (tons) expected for different forest types within protected areas of Mexico in the period 2000-2030. See Masera *et al.* (2001) for full details on the methods used for calculating these estimates.

Forest type	Year			
	2000	2008	2012	2030
Temperate forests	0	31 568 000	55 494 000	180 051 000
Tropical evergreen forests	0	26 233 000	45 019 000	141 493 000
Tropical deciduous forests	0	44 864 000	77 424 000	209 097 000
Wetland forests	0	0	0	0
Semi-arid forests	0	5 938 000	19 494 000	99 433 000
All forest types	0	108 603 000	197 431 000	630 074 000

Taking into account this situation, it is important to highlight that several farms cover thousands of hectares and contain relatively low-disturbed native forests. Therefore, after determining the value of these forests as carbon sinks, these forested areas could also be offered in the international market and bring economic benefits to the farmers. Still, this requires an additional investment in order to train farmers and develop sustainable management forestry systems.

Although some of these farms have large forested surfaces, other sites show a worrying picture. At several communal farms, farming has been abandoned because of soil depletion. Further, some companies with high levels of environmental impact, mainly dedicated to oil exploitation and mining, have left large land extensions on which forests were removed. This has led to eroded soils that are now becoming desertified areas. The advance of desertification is a strong problem for countries with limited water resources, as occurs in parts of Mexico (Chapela, 2004). Thus, developing programs aimed to recover soils and their associated vegetation is critical for reversing this situation. From the simplest point of view, the implementation of these activities would increase the capacity of degraded ecosystems for fixing CO₂. Consequently, this would generate new carbon credits that can be tendered in the international market. In the Kyoto protocol, the activities aimed to increase the CO₂ fixing capacity of ecosystems are referred altogether as "additionality", and they are of crucial interest for companies interested in buying carbon credits. This is because companies cannot acquire credits for the baseline carbon sequestration that is already happening in forests; they can only accept credits if, for instance, a forest restoration action leads to higher net carbon sequestration than that observed at the baseline case. There-

fore, all those policies addressed to promote forest additionality through restoration programs may represent a good business opportunity with large positive socioeconomically repercussions on the rural population of Mexico.

FOREST CONSERVATION AND RESTORATION: THE BENEFITS OF A SHARED RESPONSIBILITY

Reaching the goals described above requires the joint action of different social sectors, including governments, private companies, the scientific community and the general population. In this cooperative framework, governments and private companies should increase their financial contributions to the development of applied environmental science. Investments of private companies are crucial for developing this business because they are a main source of greenhouse gases emissions. Nevertheless, governments should also stimulate this flow of money from the private companies. Mexico currently has these types of initiatives, but most of them are aimed to the development of new products and technologies for the productive sector. Environmental sciences, instead, almost entirely depend on governmental funds because they are not visualized as a source of information that can provide economic benefits. Therefore, environmental researchers must be committed to establish adequate communication channels with these two sectors in order to prompt them to expand their visions of science and business.

An increased investment of both governments and companies would allow scientific institutions to acquire specialized equipment and instruments, improving their infrastructure, training the personnel required to determine the value of ecosystem services and contributing to

the development of sustainable management programs. Nevertheless, in this instance, scientists, government and companies must understand that they are investing and developing science to produce social and economic benefits at the short, medium and long term. For this, scientific proposals addressing these issues must make sense in the political and economic framework of the country, and they must lead to specific and viable goals. This, however, requires a switch in the conception of "science" by part of the scientific community. Ecologists, for instance, usually focus their research in developing "pure science", aimed to understand the mechanisms behind the functioning of the nature. This research is important because it provides the scientific bases to develop applied science. However, these "pure scientists" commonly argue that the further applicability of such a research is not matter of their concern. Therefore, the scientific community should also commit itself to dedicate part of its research effort to the development of applied science, besides performing basic science (Day *et al.*, 2009). Additionally, scientists should be willing to develop educational activities for sensitizing, but not alarming, the general population of the local environmental problems.

In addition to the net benefits for the environment and society, this joint action can provide a number of specific benefits for participants. Some examples of these benefits are:

Government Sector: (1) economic benefits in the short, medium and long term by selling carbon credits from protected areas; (2) availability of sound scientific basis for the development of profitable and sustainable environmental policies; (3) the global political positioning of Mexico as a country that, besides developing of its own internal economy,

also provides environmental services to more developed countries; (4) reduction of desertification and improvement of areas that act as water reservoirs, such as forests; (5) increasing employment in rural areas with high levels of poverty and training the people in forest management.

Private Sector: (1) long term availability of resources needed for developing their activities, such as water; (2) advertising through the dissemination of their activities dedicated to protect the environment; (3) scientific support for obtaining international certifications, such as those indicated in the norm ISO 14000 for the "green seal"; (4) local positioning of the contributing companies as "environmentally and socially responsible companies"; (5) by investing in the development of environmental sciences, companies can also contribute to generate high quality human capital at universities and institutions, which can be later captured by contributing companies as advisers and technicians in environmental matters.

Rural and city population: (1) economic benefits for the rural population by selling carbon credits from the forests located in the common use lands; (2) education and training in environmental and sustainable development for the general population; (3) sustainable availability of resources, such as water and forest resources; (4) improvement of the air quality and reduction in the risks of respiratory diseases; (5) availability of "green areas" for recreation close to urban centers.

Scientific sector: (1) short-term economic benefits by providing advising and consulting services to other sectors in environmental matters; (2) self-sustainability of scientific institutions and improvement of working conditions for scientists; (3) long-term benefits through increases in infrastructure and acquisition of equipment; (4) increased ability to

generate high-quality professionals by developing and expanding the undergraduate and postgraduate study programs of scientific institutions.

CONCLUSIONS

Can we stop the current global change by promoting environmentally friendly policies and promoting conservation and restoration? Unfortunately, the answer to this question is negative. We can, however, mitigate the impacts of this environmental change but, as mentioned above, a "change of mind" is necessary in the different sectors of the society. Although, the globalized market world in which we live today seems to show a disappointing picture for this, it also provides opportunities for economic, social and environmental development in Mexico via the carbon market. For these reasons, Mexico urgently requires the development of policies for promoting the interaction among social sectors, which must be addressed to an environmentally sustainable economy.

ACKNOWLEDGMENTS

The author thanks the support provided by IPICTY and Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica Conacyt-Gobierno del Estado de Puebla, number 108571; also thanks an anonymous reviewer for its valuable comments on the early version of the manuscript and Nayeli Prieto for revising the orthography, grammar and style of the English version of manuscript.

REFERENCES

Badano, E.I. and F.I. Pugnaire. 2004. Invasion of *Agave* species (Agavaceae) in southeast Spain: invader demographic parameters and impacts on native

species. *Diversity and Distributions* 10:493-500.

Baz, A. and A. Garcia-Boyer. 1996. The SLOSS dilemma: a butterfly case study. *Biodiversity and Conservation* 5:493-502.

Brooks, T.M., R.A. Mittermeier, C.G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca, A. B. Rylands, W. R. Konstant, P. Flick, J. Pilgrim, S. Oldfield, G. Magin and C. Hilton-Taylor. 2002. Habitat loss and extinction in the hotspots of biodiversity. *Conservation Biology* 16:909-923.

Callaway, R.M. and E.T. Aschehoug. 2003. Invasive plants versus their new and old neighbors: a mechanism for exotic invasion. *Science* 290:521-523.

Castro, S.A., E.I. Badano, D. Guzmán, L.A. Cavieres and F.M. Jaksic. 2010. Biological invasion of a refuge habitat: *Anthriscus caucalis* (Apiaceae) decreases diversity, evenness, and survival of native herbs in the Chilean matorral. *Biological Invasions* 12:1295-1303.

Chapela, G. 2004. Lucha contra la desertificación y lucha contra el calentamiento global. In: J. Martínez and A. Fernández Bremauntz (Eds.). *Cambio climático: una visión desde México*. Semarnat-INE, México, D.F. pp. 190-200.

Chapin III, F.S., B.H. Walker, R.J. Hobbs, D.U. Hooper, J.H. Lawton, O.E. Sala and D. Tilman. 1997. Biotic control over the functioning of ecosystems. *Science* 227:500-504.

Chapin III, F.S., O.E. Sala, I. Burke, J.P. Grime, D.U. Hooper, W.K. Lauenroth, A. Lombard, H.A. Mooney, A.R. Mosier, S. Naeem, S.W. Pacala, J. Roy, W.L. Steffen and D. Tilman. 1998.

- Ecosystem consequences of changing biodiversity. *BioScience* 48:45-52.
- CONANP. 2010 ¿Qué son las ANPs? Consulted at the Internet on March 30th 2010, available at <http://www.conanp.gob.mx>
- CONEVAL. 2007. Mapas de pobreza por ingresos y rezago social 2005. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. México, D.F. 505 p.
- Costanza, R; R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.
- Day Jr., J.W., C.A. Hall, A. Yáñez-Arancibia, D. Pimentel, C. Ibáñez-Martí and W.J. Mitsch. 2009. Ecology in times of scarcity. *BioScience* 59:321-331.
- FAO. 2006. Forest Resources Assessment. Consulted at the Internet on July 17th 2009, available at www.fao.org
- Gilbert, F., A. Gonzalez and I. Evans-Freke. 1998. Corridors maintain species richness in the fragmented landscapes of a microecosystem. *Proceedings of the Royal Society of London B* 265:577-582.
- Giller, P.S. and G. O'Donovan. 2002. Biodiversity and ecosystem function: do species matter? *Proceedings of the Royal Irish Academy B* 102:129-139.
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, 115 p.
- Loreau, M., A. Oteng-Yeboah, M.T.K. Arroyo, D. Badin, R. Barbault, M. Donoghue, M. Gadgil, C. Häuser, C. Heip, A. Larigauderie, K. Ma, G. Mace, H.A. Mooney, C. Perrings, P. Raven, J. Sarukhan, P. Schei, R.J. Scholes and T.R. Watson. 2006. Diversity without representation. *Nature* 442:245-246.
- Lund, H.G., V. Torres, A. Turner and L. Wood. 2002. México: análisis crítico de los estimados disponibles de deforestación. USAID-Semarnat. Mexico, D.F. 127 p.
- Masera, O.R., A.D. Cerón and A. Ordóñez. 2001. Forestry mitigation options for Mexico: finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 6:291-312.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis. World Resources Institute. Washington, D.C. 83 p.
- Mittermeier, R.A., J. Schipper, G. Davidse, P. Koleff, J. Soberón, M. Ramírez, B. Goettsch and C.G. Mittermeier. 2004. Mesoamerica. In: R. A. Mittermeier, P. Robles-Gil, M. Hoffman, J. Pilgrim, T. Brooks, G.G. Mittermeier, J. Lamoreux and G.A. B. da Fonseca (Eds.). *Hotspots Revisited*. CEMEX. México, D.F. pp. 51-55.
- Myers, N.; R.A. Mittermeier, C.G. Mittermeier, G.A.B. Da Fonseca and J.

- Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853-858.
- Ordoñez-Díaz, J.A.B. 1999. La captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juna Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología-Semarnap, México, D.F. 73 p.
- Pimm, S.L., G.J. Russell, J.L. Gittleman and T. M. Brooks. 1995. The future of biodiversity. *Science* 269:347-350.
- Raup, D.M. and J.J. Sepkoski. 1982. Mass extinctions in the marine fossil record. *Science* 215:1501-1503.
- Raup, D.M. and J.J. Sepkoski. 1984. Periodicity of extinctions in the geologic past. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 81:801-805.
- Rejmánek, M., D.M. Richardson, M.G. Barbour, M.J. Crawley, G.F. Hursá, P.B. Moyle, J.M. Randal, D.S. Simberloff and M. Williamson. 2002. Biological invasions: politics and the discontinuity of ecological terminology. *Biological Invasions* 83:131-133.
- Ruis, B.M.G.S. 2001. No forest convention but ten tree treaties. *Unasylva-FAO* 206. Consulted at the Internet on July 17th 2009, available at www.fao.org
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Editorial Limusa. México, D.F. 432 p.
- Saunders, D.A., R.J. Hobbs and C.R. Margules. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conservation Biology* 5:18-32.
- Tudela, F. 2004. México y la participación de países en desarrollo. In: Martínez, J. and A. Fernández-Bremauntz (Eds.). *Cambio climático: una visión desde México*. Semarnat-INE. México D.F. pp. 156-175.
- United Nations Environment Programme. 2011. Nagoya-Kuala Lumpur Supplementary Protocol on Liability and Redress to the Cartagena Protocol on Biosafety. Consulted at the Internet on March 30th 2011, available at <http://www.unep.org>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. 1998. Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Consulted at the Internet on June 27th 2009, available at <http://unfccc.int>
- Velázquez, A., J.F. Mas, J.R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P.C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Excurra and J.L. Palacio. 2002. Patrones y tasa de cambios de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica* 62:21-37.

APPENDIX

Examples for the general conservation policies of Latin American countries. The list provides that dates on which these documents were consulted and the hyperlinks to the official WebPages of each country where documents are available

Costa Rica: Ley de Parques Nacionales. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.tramites.go.cr>

Nicaragua: Decreto de Creación del Servicio de Parques Nacionales. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.ccad.ws>

México: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y su Reglamento. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.conanp.gob.mx>

Argentina: Ley de Parques Nacionales. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.fucema.org.ar>

Chile: Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.bienes.cl>

Ecuador: Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.ambiente.gov.ec>

Perú: Ley de Áreas Naturales Protegidas. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.fonamperu.org>

Bolivia: Ley de Vida Silvestre, Parques Nacionales, Caza y Pesca. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.inra.gob.bo/>

Uruguay: Sistema Nacional de Naturales Protegidas. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.snap.gub.uy>

Panamá: Política nacional de biodiversidad. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.anam.gob.pa>

Guatemala: Ley de Áreas Protegidas. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://www.mem.gob.gt>

El Salvador: Ley de Áreas Naturales Protegidas. Consulted at the Internet on August 25th 2009, available at <http://snet.gob.sv>

Recibido el: 4 de septiembre de 2009

Aceptado el: 15 de marzo de 2011

Este documento se debe citar como: Badano, E.I. Conservation and restoration of Mexican forests in the global change scenario: a shared responsibility with multiple benefits. *Madera y Bosques* 17(2):7-18.

Análisis de la abundancia e infección por muérdago en Sierra Fría, Aguascalientes, México

Analysis of the abundance and mistletoe infection in Sierra Fría, Aguascalientes, México

Ricardo Clark-Tapia¹, Brenda Torres-Bautista², Cecilia Alfonso-Corrado¹, Juan I. Valdez-Hernández³, Gabriel González-Adame¹, Jorge Bretado-Velázquez¹ y Jorge Campos-Contreras⁴

RESUMEN

Los muérdagos, plantas hemiparasíticas, son el segundo agente de destrucción de los bosques mexicanos después del insecto descortezador, por lo que en el presente estudio se evaluó su infectación en poblaciones forestales de Sierra Fría, Aguascalientes, esto con la finalidad de: a) conocer los factores que influyen en la abundancia de muérdago, b) determinar el grado de infectación que presentan las especies hospederas, c) identificar si existe especificidad del muérdago por especie y tamaño del hospedero y/o por hábitat. En enero de 2007 se seleccionaron 20 sitios de muestreo dentro de los cuales se establecieron dos unidades de muestreo (UM) de 2500 m². En cada UM se midió la altura y diámetro de todos los individuos (infestados y no infestados) >1 m de altura y se registró la presencia de muérdago. Se registraron, además, la altitud, inclinación y orientación de la pendiente, nivel de perturbación y grado de infección. Los resultados indican que el grado de infección por muérdago muestra asociación positiva con la altitud y orientación y una asociación negativa con la perturbación. Se encontró que al aumentar en tamaño los atributos dasométricos (altura, diámetro) se incrementa el grado de infección. *Phoradendron bolleanum* fue la especie de muérdago más abundante, siendo su hospedero más común *Juniperus deppeana*. En contraste con lo mencionado en otros trabajos, las poblaciones forestales de Sierra Fría no se encuentran severamente afectadas por muérdago; sin embargo, se recomienda realizar estudios futuros que permitan comprender los factores que dan forma a la distribución e interacción hemiparásito-hospedero, dentro y entre poblaciones, con la finalidad de evaluar los daños reales o futuros, así como evaluar la selectividad hacia ciertas especies hospederas y los cambios químicos que sufren los árboles a través de la infección.

PALABRAS CLAVE:

Especificidad, hemiparásita, hospedero, perturbación, Sierra Fría.

- 1 Instituto de Estudios Ambientales, Universidad de la Sierra de Juárez. Av. Universidad s/n, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. CP 68725. c.e.: rclark@juppa.unsj.edu.mx
- 2 Herbario, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Av. Universidad núm. 940, Cd. Universitaria, Aguascalientes, Ags. CP 20100.
- 3 PF-COLPOS. CP 56230, Montecillos, Texcoco, Estado de México. Tel. (595) 9520200 ext 1484, Tel. D.F. (55) 58045900 ext 1484.
- 4 Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. Unidad de Biotecnología y Prototipos. Apartado Postal 314. 54000 Tlalnepanitla, Estado de México.

ABSTRACT

Mistletoe, a hemiparasitic plant, is the second most destructive agent for Mexican forests after the bark beetle. For this reason, in the present study, its infestation in the forest populations of Sierra Fria, Aguascalientes was examined in order to: a) understand the factors that influence the abundance of mistletoe; (b) determine the infestation level present in host species and (c) identify if there exists specific types of mistletoe that correspond to different species and sizes of the host and / or habitat. In January 2007, 20 sampling locations were selected within which two sampling units were established (UM) of 2500 m². In every UM the height and diameter of all individuals (infected and uninfected) > 1 m in height were measured and the presence of mistletoe was recorded. Also recorded was the altitude, incline, slope orientation, level of disturbance and degree of infestation. The results indicate that the level of mistletoe infection shows positive association with altitude and orientation and a negative association with disturbance. It was found that as the size of dasometric attributes (height, diameter) increases so too does the degree of infection. *Phoradendron bolleanum* was the most abundant species of mistletoe, with *Juniperus deppeana* being its most common host. In contrast to that reported by other works, Sierra Fria forest populations are not found to be severely affected by mistletoe. Nevertheless, it is recommended that future studies be undertaken that allow for the understanding of the factors that shape the distribution and hemiparasitic-host interaction within and between populations, in order to assess real or future damage and to evaluate the selectivity towards certain host species and chemical changes from which trees suffer as a result of infection.

KEYWORDS:

Specificity, hemiparasitic, host plants, disturbance Sierra Fria.

INTRODUCCIÓN

Los muérdagos son plantas generalmente arbustivas o subarbustivas pertenecientes al Orden Santalales, el cual se encuentra constituido por 13 familias (*sensu* APG II, 2008). En este orden se

encuentra la familia Santalaceae (que en la actualidad incluye a Viscaceae) representada por 151 géneros y 1985 especies, siendo *Phoradendron* uno de estos géneros (Simpson, 2006; Tropicos, 2011). El género *Phoradendron* se distribuye desde Estados Unidos de Norteamérica hasta Sudamérica (Trelease, 1916) y está representado por especies hemiparásitas fotosintéticas con haustorios que atacan al xilema de la planta que hospedan para obtener agua y sales minerales, ya que son incapaces de obtenerla directamente del suelo (Simpson, 2006).

En México, el muérdago es considerado la plaga forestal con mayor extensión en nuestro país y el segundo agente de destrucción de los bosques después del escarabajo descortezador (Geils *et al.*, 2002; Villa, 2003), debido a que los haustorios pueden causar deformación en la madera, reduciendo la vida y/o ocasionando la muerte del hospedero (Gutiérrez, 1986; López-de Buen *et al.*, 2002). La Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2006) sugiere que los ecosistemas forestales comprendidos en los estados de Aguascalientes, San Luis Potosí, Nuevo León y Coahuila, están siendo afectados por plantas hemiparásitas del género *Phoradendron* y epífitas de la familia Bromeliaceae, ocasionando daño severo e incluso la muerte del arbolado de miles de hectáreas.

En ambientes fragmentados o con cierto nivel de disturbio, es necesario considerar la selectividad de especies hospederas y la distribución espacial del parásito dentro y entre poblaciones de los hospederos. El género *Phoradendron* presenta especificidad a ciertas especies de hospederos, generalmente infesta a coníferas y algunas angiospermas como *Quercus*, *Arbutus* y *Arctostaphylos*, mostrando además una distribución frecuentemente homogénea dentro de la población (Aukema, 2003). Por lo ante-

rior, comprender los procesos de infección de la planta parásita ayudará, sobre todo, a elucidar los factores que dan forma a la distribución, dinámica e interacción del muérdago dentro y entre poblaciones de sus huéspedes. Esto permitiría, por un lado, evaluar los daños reales o futuros dentro de una población y, por el otro, comprender la selectividad hacia una especie hospedera en particular y el ensamble espacial en las comunidades, como lo sugieren Press y Phoenix (2005).

Aguascalientes es uno de los estados del país reportado por Conafor (2006) en fase de alerta por la infección de muérdago. En dicho estado, las especies de encino y pino juegan un papel ecológico muy importante, debido a que representan 90% de los bosques templados del estado, además de que desempeñan múltiples e importantes funciones, como son la captación de agua y sostienen el mayor reservorio de flora y fauna en la entidad (Sedeso, 1993). Desafortunadamente, las poblaciones forestales de Sierra Fría han sido afectadas en el siglo pasado y en el presente por factores antropogénicos: sobreexplotación forestal, sobrepastoreo (Sedeso, 1993; Minnich *et al.*, 1994) y naturales: plagas, enfermedades (Asociación Sierra Fría, 2002; Díaz-Núñez *et al.*, 2006) que han reducido y transformado la cubierta forestal en esta región.

El conocimiento actual del género *Phoradendron* para el estado de Aguascalientes se reduce a estudios anatómicos (Gutiérrez, 1986) y taxonómicos (García-Regalado, 1998). Estos trabajos brindan una idea del hospedero preferido; sin embargo, existe una total carencia de estudios ecológicos, particularmente de los que evalúan la abundancia y niveles de infección para el estado. Gutiérrez (1986) sugiere que el disturbio presente en Sierra Fría ha incrementado los niveles de

infección por muérdago; sin embargo, su trabajo no presenta evidencia al respecto. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es evaluar el nivel de infección de los muérdago presentes en los bosques de Sierra Fría, Aguascalientes, con la finalidad de: a) determinar la abundancia de individuos infestados y el grado de infección que presentan las poblaciones de Sierra Fría, b) conocer los factores que influyen en la abundancia de muérdago en Sierra Fría y c) identificar si existe especificidad del muérdago por especie y tamaño del hospedero y/o por hábitat.

MATERIAL Y METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la zona natural protegida de Sierra Fría, en el margen occidental del estado de Aguascalientes. Es una cordillera situada al sur de la Sierra Madre Occidental, de la cual forma parte, con coordenadas 22° 0' - 22° 15' latitud norte y 102° 30' - 102° 40' longitud oeste (Minnich *et al.*, 1994).

El clima del área de estudio es templado subhúmedo, con lluvias en verano, de acuerdo con la clasificación de Rzedowski (1978) corresponde a C(w1)b(e)g. Presenta una temperatura entre -3 °C y 18 °C y con un promedio anual de precipitación de aproximadamente 600 mm, no obstante, también encontramos en las partes bajas de Sierra Fría clima semiárido y semicálido correspondiente a Bs1kw(e) con una temperatura promedio anual de 17 °C (Sedeso, 1993).

La vegetación de Sierra Fría presenta una amplia distribución relacionada a la altitud. En los bosques de Sierra Fría se pueden encontrar asociaciones de encino (e.g. *Quercus eduardii* Trel., *Q.*

potosina Trel., *Q. grisea* Liebm., *Q. resinosa* Liebm. y *Q. sideroxyla* Humb. et Bonpl.), encino-pino (e.g. *Pinus leophylla* Schl. et. Cham, *P. teocote* Schl. et. Cham, *P. lumholtzii* Rob. et Fern. y *Juniperus deppeana* Steud.), así como la presencia de otras especies forestales como manzanita (*Arctostaphylos pungens* HBK.) y madroño (*Arbutus arizonica* (A. Gray) Sarg. y *A. glandulosa* Mart et Gal.) (De la Cerda, 1999). Mientras que los dos géneros de muérdago presentes en Sierra Fría, Aguascalientes son: *Phoradendron* (Santalaceae) y *Psittacanthus* (Loranthaceae) (García-Regalado, 1998).

Diseño de la investigación

Durante el año de 2007 se seleccionaron sistemáticamente 20 sitios de muestreo con la finalidad de analizar diferentes gradientes de altitud a lo largo y ancho de Sierra Fría (Tabla 1). En cada uno de los sitios seleccionados se establecieron dos unidades de muestreo (UM) de 2500 m² (50 m x 50 m) con separación de 500 m entre ellas. Dentro de cada UM se identificó y estimó la abundancia tanto de las especies hospederas como de los muérdagos (*Phoradendron* y/o *Psittacanthus*) presentes en Sierra Fría. Además, se midió la altura y el diámetro de las especies hospederas con la finalidad de establecer categorías dasométricas.

En cada UM se registró la ubicación geográfica, altitud, inclinación y orientación de la pendiente, nivel de perturbación (e.g. intensidad de extracción de leña y pastoreo) y nivel de infección. La ubicación geográfica y la altitud (m) se obtuvieron utilizando un geoposicionador marca Garmin 12XL. En campo se midieron la inclinación de la pendiente con un clinómetro marca Brunton (en porcentaje) y la exposición de la misma con una brújula marca Brunton (en grados), esta última corregida con una carta topográfica (INEGI, 1996).

Para la variable perturbación se utilizó la escala cualitativa de intensidad: ausencia (cero), baja (uno), media (dos) y alta (tres), descrita por Álvarez-Moctezuma et al. (1999); mediante la observación de indicadores de actividades que deterioran el ecosistema (desmonte por tala, pastoreo, restos de heces fecales de ganado, suelo compactado, deterioro en el estrato herbáceo y presencia de especies indicadoras de disturbio). Finalmente, para evaluar el grado de infección y evaluación de daños del muérdago, se utilizó la metodología propuesta por Hawksworth (1977) y Conafor (2005).

Esta metodología valora, en una escala semi-cuantitativa, la abundancia de muérdago, divide la copa viva del árbol en tres secciones verticales iguales y a cada una de ellas le asigna un valor de 0 a 2 en función de la mayor o menor presencia de muérdago (0, ausencia; 1, infección leve; 2, infección fuerte). Posteriormente, se obtiene la suma de los valores asignados a los tercios de la copa, resultando un valor que oscila entre 0 (ausencia de muérdago) y 6 (máxima infección). De acuerdo con los análisis de daños observados en campo, se consideró una escala modificada de Hawksworth (1977), reduciéndola a cinco categorías de grado de infección:

Grado 1. No hay presencia de muérdago. **SANO**

Grado 2. Sólo se observa una planta de muérdago. **LEVE**

Grado 3. Más de una planta de muérdago (hasta 50% de cobertura). **FUERTE**

Grado 4. Más de 50% de cobertura por muérdago. **SEVERA.**

Grado 5. Muerte del árbol por muérdago. **MUERTE.**

Tabla 1. Descripción de los sitios de estudio en Sierra Fria.

Sitio	Ubicación	Coordenadas	Altitud msnm	Pendiente (%)	Nivel de perturbación	Orientación	Asociación vegetal
1	La Congoja	22°09'62" N 102°32'97" W	2489	12	3	NE	Quercus - Juniperus
2	Alamitos	22°09'74" N 102°34'43" W	2598	4	2	Meseta	Juniperus - Quercus
3	El Cepo	22°10'79" N 102°35'81" W	2613	5	3	Meseta	Juniperus-Quercus
4	La Araña	22°11'87" N 102°37'16" W	2621	3	3	NE	Juniperus - Quercus
5	El Sinaí	22°08'37" N 102°39'90" W	2606	20	3	NW	Quercus - Juniperus
6	Mesa del Sapo	22°14'71" N 102°30'79" W	2437	3	3	Meseta	Quercus
7	Agua Escondida	22°11'91" N 102°37'77" W	2688	18	2	NW	Quercus - Pinus
8	Barranca Macitas	22° 09'11" N 102°34'24" W	2552	32	2	SE	Quercus - Juniperus
9	El Pinal	22°04'48" N 102°43'52" W	2567	25	2	NE	Quercus
10	Paraje Don Pepe	22°12'25" N 102°35'25" W	2467	22	3	NW	Quercus - Juniperus
11	Laguna Seca	22°09'39" N 102°39'15" W	2643	34	2	NW	Quercus - Pinus
12	Río Blanco	22°13'73" N 102°31'21" W	2237	42	2	NE	Quercus
13	El Pilar	22°05'83" N 102°41'32" W	2656	28	2	NO	Quercus
14	Ciénaga	22°05'78" N 102°39'93" W	2340	26	1	NE	Quercus-Juniperus
15	Pinsión	22°11'80" N 102°35'52" W	2470	15	3	NE	Quercus
16	Cuesta la Gloria	22°13'73" N 102°28'21" W	2237	14	3	NE	Quercus
17	Peñón Blanco	22° 10'23" N 102° 31'21" W	2272	28	3	E	Quercus
18	El Conejo	22°17'08" N 102°34'52" W	2775	5	1	NW	Quercus
19	Astillero	22°17'08" N 102°34'52" W	2279	3	3	Meseta	Quercus
20	Montoro	22°17'08" N 102°34'52" W	2351	1	3	Meseta	Quercus

Nivel de perturbación: 0- ausencia; 1- baja <25%; 2- media 25-50%; 3- alta >50%.

Por otro lado, las especies hospederas consideradas para cada especie de muérdago se obtuvieron con base en los registros de presencia/ausencia y fueron complementadas con el registro taxonómico de muérdagos y sus especies hospederas, realizado en Aguascalientes por García-Regalado (1998).

Por medio de análisis de varianza (ANOVA), pruebas de Chi-cuadrada y coeficientes de correlación de Spearman se obtuvo información sobre los factores que determinan la abundancia y distribución de muérdago en Sierra Fría. Estos análisis se realizaron con el programa estadístico JMP versión 4.0 (1999). Además, se realizó un análisis canónico (Ter Braak, 1988) para identificar la asociación entre las variables ambientales y las variables de infección, utilizando el programa estadístico Statistica versión 8.0 (2007).

RESULTADOS

De los 20 sitios estudiados en Sierra Fría, 18 presentaron por lo menos un muérdago y un grado de infección leve (grado 2), mientras que dos sitios (Cuesta la Gloria y Peñon Blanco) tuvieron grado de infección 1 (sano) por ausencia de muérdago (Figura 1). En los sitios estudiados, se analizaron un total de 4004 árboles, de los cuales 313 (7,81%) individuos estuvieron infectados. Por otro lado, el número de muérdago presente en las áreas de estudio fue de 1785 plantas.

Se encontró una correlación significativa entre el grado de infección y el número de muérdago presentes en una población ($r=0,513$, $P>0,02$). El grado de infección promedio de la Sierra Fría es leve (promedio $1,53\pm 0,74$) con rangos de leve (*i.e.* La Congoja, Alamitos, Mesa del Sapo, Agua Escondida y Paraje Don Pepe), a fuerte (El Cepo y La Araña). El grado de infección entre sitios difiere

significativamente ($H=32,413$, $P<0,001$), siendo las localidades centrales las que presentan una mayor abundancia de muérdago y las únicas en el estudio con grado 2 (fuerte) de infección.

Los sitios analizados presentaron un nivel de perturbación de media a alta (promedio $\pm SD=2,5\pm 0,6$), altitudes mayores a los 2200 msnm, pendientes que varían de 1 hasta 42, con un promedio de $10,7\%\pm 3\%$ y una exposición predominante hacia el norte (NE y NW), así como una asociación de vegetación dominante de *Quercus-Juniperus*, *Juniperus-Quercus* o *Quercus* (Tabla 1). Los resultados del análisis canónico indican una asociación positiva ($R=0,745$, $\chi^2=20,87$, $P=0,013$) de dos variables ambientales (altitud y orientación) con tres variables de infección (número de individuos infestados, número de muérdagos y grado de infección). El análisis canónico sugiere además una asociación negativa de la perturbación con las variables de infección (figuras 2 y 3). La pendiente no mostró asociación con las variables de infección ($R=0,367$, $\chi^2=2,38$, $P=0,49$).

Por otra parte, los resultados indican diferencias significativas ($H=9,55$; $P<0,05$) en el grado de infección entre las categorías dasométricas. Las categorías de mayor diámetro presentan una abundancia más elevada de muérdago y una mayor infección (grado 2 y 3). En cambio, la categoría de 0 cm a 2 cm presenta baja abundancia de muérdago y una infección leve (grado 1) (Figura 3). De igual manera, se encontraron diferencias significativas en el grado de infección entre categorías de altura ($H=17,89$, $P<0,001$). Las categorías mayores a 4 metros presentaron la mayor abundancia de muérdago y un mayor grado de infección (2 y 3) que las categorías menores a 4 metros de altura (grado 1 y 2).

Finalmente, en los sitios estudiados se presentaron cuatro especies de muér-

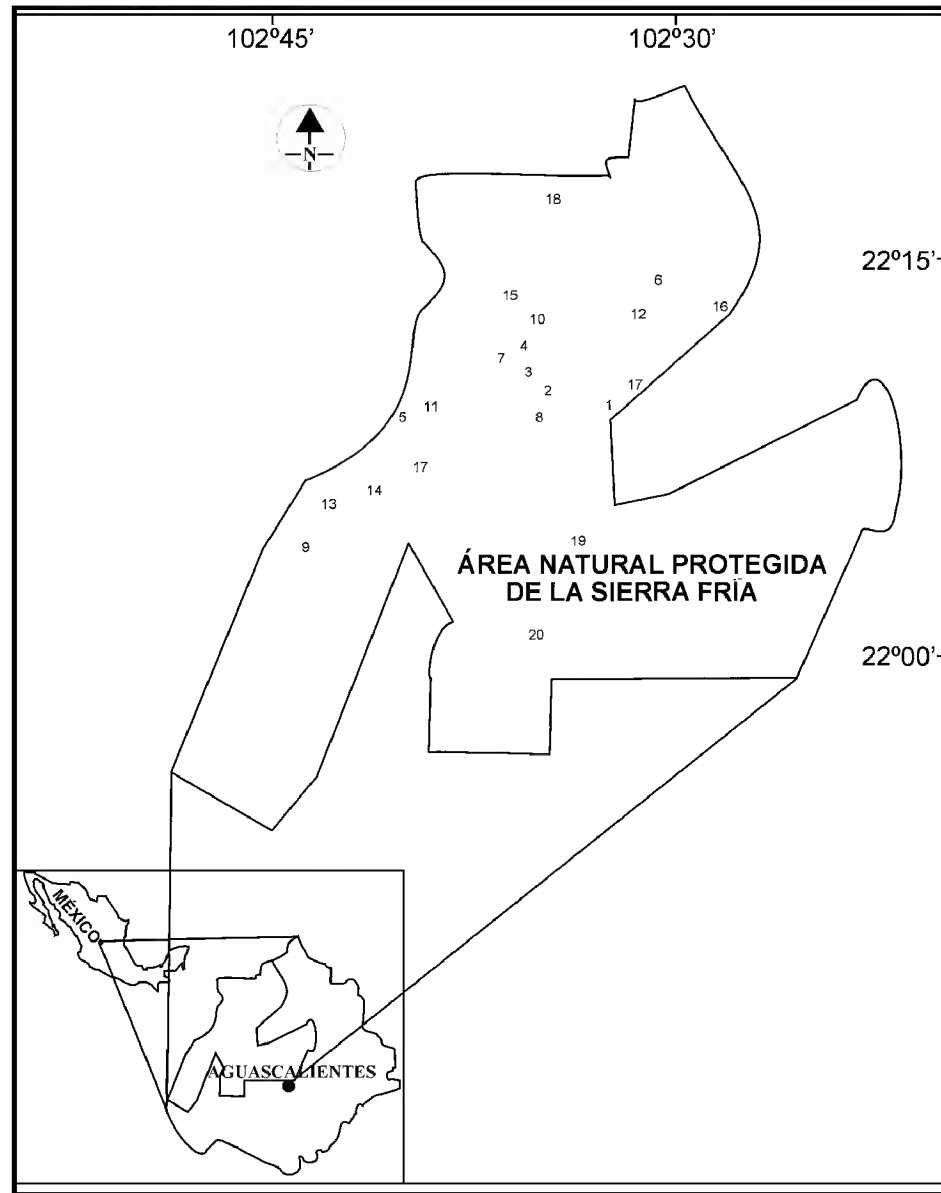


Figura 1. Sitios de estudio y localización de zonas de infección en Sierra Fria.

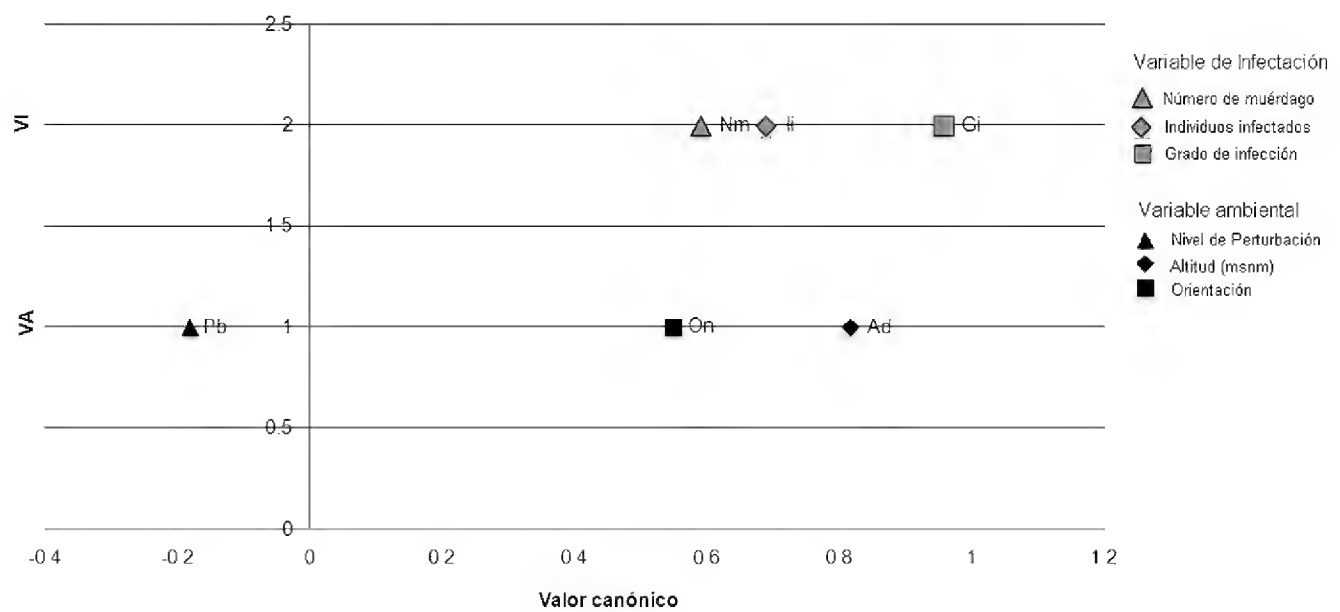
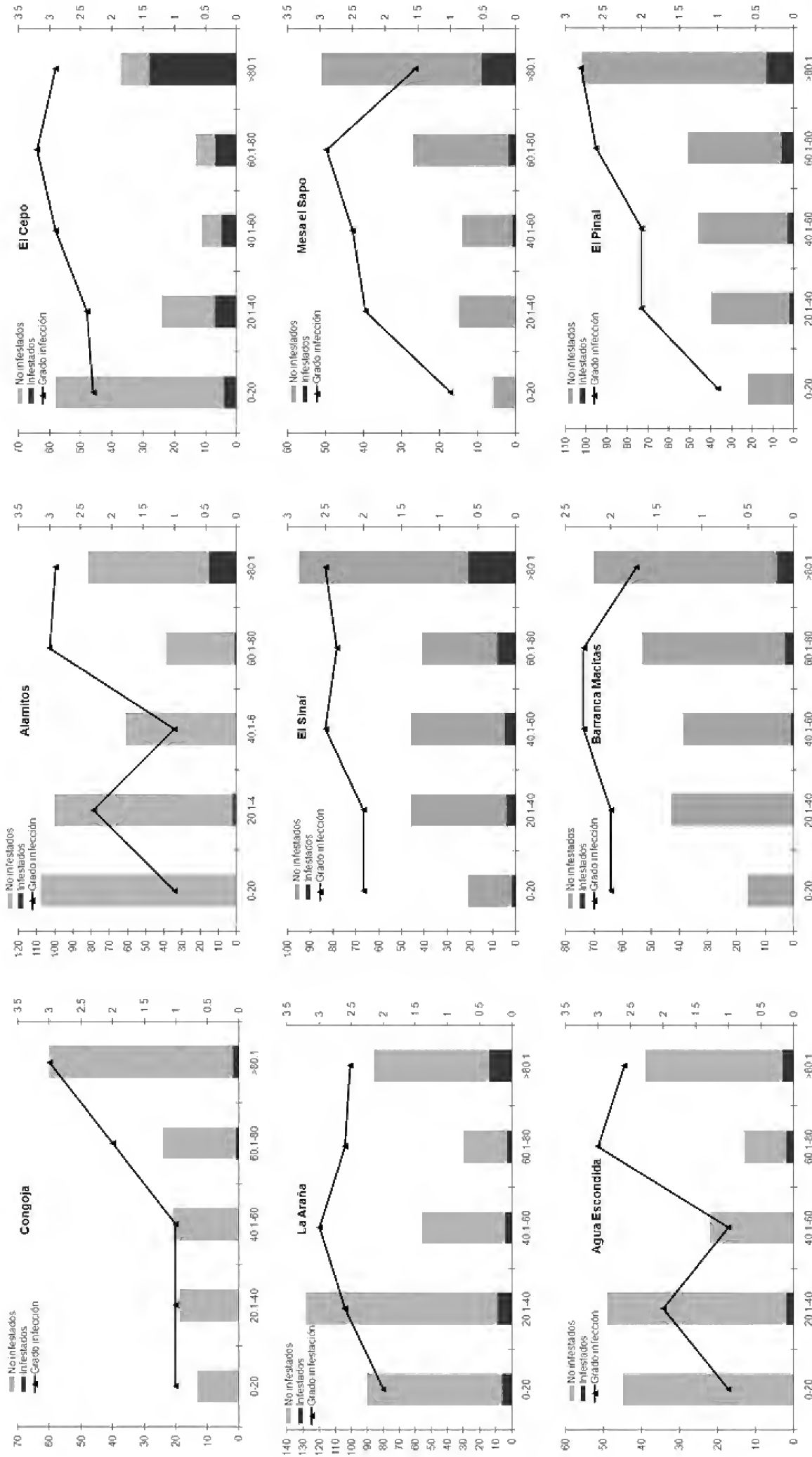


Figura 2. Análisis de correspondencia canónica (una raíz $R=0,745$, $\chi^2=20,87$, $P=0,013$) de las variables ambientales y variables de infección por muérdago en Sierra Fria.



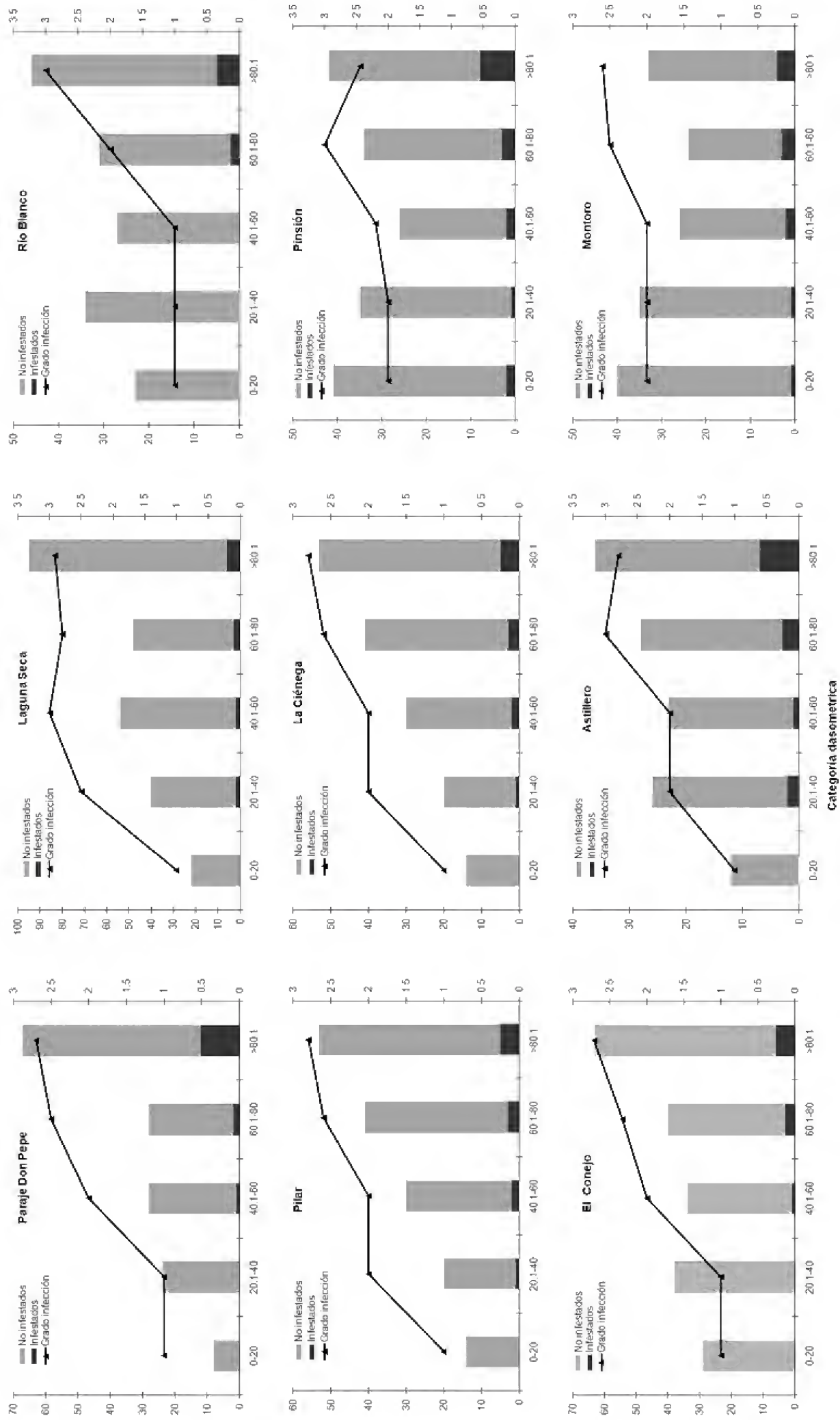


Figura 3. Número de individuos infectados y grado de infección por categoría dasométrica de los sitios con presencia de muérdago.

Tabla 2. Especificidad del género *Phoradendron* hacia el hospedero, en Sierra Fría, Aguascalientes.

Hemiparásita	Hospedero	Tipo de vegetación	Altitud
<i>P. bolleanum</i>	<i>Juniperus deppeana</i> , <i>Arbutus arizonica</i> , <i>A. glandulosa</i> , <i>Arctostaphylos pungens</i> , <i>Quercus potosina</i> .	Juniperus- Quercus	2400-2600
<i>P. schumanni</i>	<i>Q. potosina</i> , <i>Q. eduardii</i> y <i>Q. sideroxylla</i>	Quercus	2250-2550
<i>P. villosum</i>	<i>Q. grisea</i> , <i>Q. potosina</i>	Quercus	2200-2600
<i>P. reichenbachinum</i>	<i>Q. potosina</i> y <i>Q. rugosa</i>	Quercus-Pinus	2250-2400

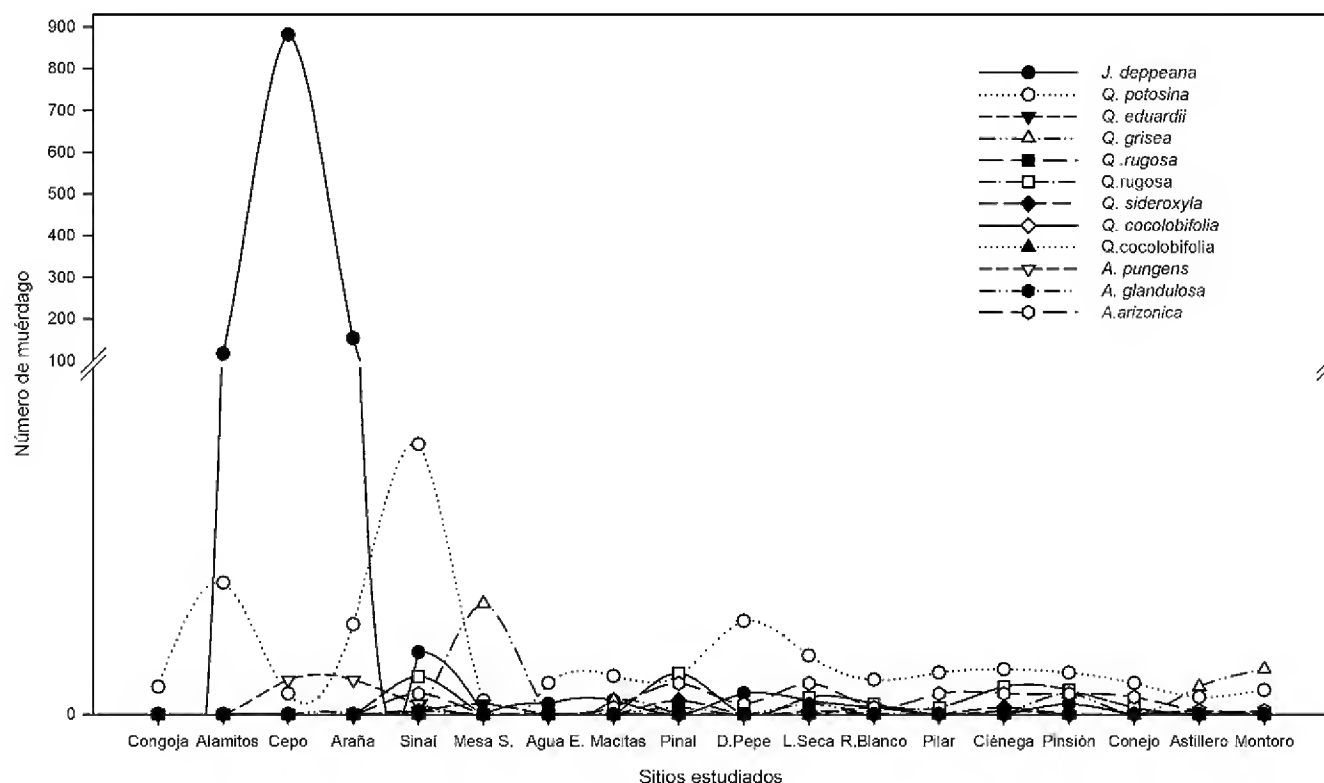


Figura 4. Número de muérdago (*Phoradendron*) presente en las especies hospederas de los sitios infectados.

gado que pertenecen al género *Phoradendron*, estas tienen una alta especificidad hacia ciertos hospederos, así como diferencias en la susceptibilidad del hospedero a ser parasitado (Tabla 2). De estas especies *J. deppeana* es la especie que presenta mayor número de individuos

infestados y *Q. sideroxylla* la menos infectada ($\chi^2=23,45$, $P>0,05$); siendo *Q. potosina* la única especie susceptible a ser parasitada por todas las especies de muérdago y con registro de por lo menos un muérdago en 90% de las poblaciones estudiadas (Figura 4).

DISCUSIÓN

Los resultados sugieren que la infección por muérdago en Sierra Fria se encuentra asociada a variables ambientales como la altitud y la orientación de las laderas. Este resultado concuerda con el obtenido en otros estudios como los de López-Sáenz (1993) e Informe Técnico de Plagas y Patología Forestal (1999), que reportan un efecto significativo en los grados de infección debido al ambiente. Sin embargo, contradicen a Gutiérrez (1986), quien sugiere que el disturbio en Sierra Fria ha favorecido los grados de infección por muérdago en las especies forestales.

A pesar que la perturbación no se encuentra asociada a la infección por muérdago en Sierra Fria, esta no solo puede afectar la estructura interna del bosque, sino también la interacción parásito-hospedero (López-de Buen *et al.*, 2002). Sierra Fria tiene una larga historia de disturbio ya que estuvo sujeta a una intensa explotación forestal y fue utilizada como área de pastoreo hasta finales del siglo XX (Minnich *et al.*, 1994) cuando se decretó Área Natural Protegida en 1994 (Sedeso, 1993); no obstante, el disturbio ha continuado debido a la extracción ilegal de madera y al pastoreo extensivo, esto a pesar de ser Área Protegida.

En este sentido, la historia de disturbio, pasada y presente, en Sierra Fria ha propiciado una reestructuración de la cubierta y con ello un posible cambio en las preferencias del hospedero. Se conoce que la especificidad del muérdago responde a condiciones fisiológicas y químicas que propician hospederos específicos (Aukema, 2003). Se observó una alta especificidad del género *Phoradendron* a ciertos hospederos (*i.e.* *Quercus* y *Juniperus*), lo que concuerda con lo reportado por Gutiérrez (1986). Sin embargo, también se encontró que en ausencia o menor abundancia del hospede-

ro específico, el muérdago puede infestar a otras especies.

Se sugiere que la infección de muérdago a otras especies puede ocurrir cuando un sitio se encuentra perturbado. En este estudio se encontró que la selección del hospedero puede variar con el tipo de vegetación y la historia de disturbio del sitio. A nivel intraespecífico, *J. deppeana* es la especie que presenta el grado más alto de infección. Sin embargo, cuando *J. deppeana* presenta bajas densidades o se encuentra ausente, *Phoradendron bolleanum* utiliza como hospederos a especies diferentes como *Arbutus arizonica*, *A. glandulosa*, *Arctostaphylos pungens* y *Quercus potosina*, siendo el grado de infección en estas especies menor al encontrado en *J. deppeana*. De estas especies, *Q. potosina* es única, ya que puede ser susceptible de ser infestada por todas las especies de *Phoradendron* de Sierra Fria, con grados de infección que van de leve a fuerte.

La distribución actual que presentan las especies en Sierra Fria no corresponde a su distribución pasada. Minnich *et al.* (1994) sugiere que *J. deppeana* colonizó grandes extensiones de terreno durante el siglo XX después de las extracciones de encino, particularmente en la porción central de Sierra Fria; mientras que *Q. potosina*, una de las especies más dominantes junto a *Q. eduardii*, presentó una gran revegetación. El cambio en la estructura vegetal asociada al disturbio histórico puede ser una de las razones del porqué la porción central de Sierra Fria (dominada por *Juniperus* y *Q. potosina*) presenta la mayor infección por muérdago, esto asociado quizás a un corredor de dispersión biológico (*e.g.* aves) y/o a mecanismos de baja resistencia y susceptibilidad de las especies (*i.e.* poco grosor y resistencia de la corteza, textura suave, etc.) que permiten la penetración de los haustorios (Downey, 2004).

Diversos estudios sugieren una asociación entre el tamaño del hospedero y el nivel de infectación (Downey, 2004; Mora, 2005). Esta asociación ha sido relacionada con la preferencia de las aves por árboles de mayor tamaño para perchar (Norton y Reid, 1997), ya que estos les brindan mayor protección que árboles de menor altura y diámetro. La selección de árboles grandes para perchar otorgan una mayor probabilidad de recibir más semillas de muérdago (Overton, 1994; Donohue, 1995), generando una distribución restringida y consecuentemente pocos árboles infestados dentro de las poblaciones, lo que concuerda con lo obtenido en este estudio. Sin embargo, es necesario realizar futuras investigaciones conducentes a evaluar corredores de dispersión para conocer las causas de las variaciones en los niveles de infectación entre poblaciones.

Asimismo, la susceptibilidad de un hospedero a ser infestado por una planta parásita está determinada por las condiciones ambientales del hábitat, por las características de la superficie del tronco, ramas y de los compuestos químicos de estos (Benzing, 1990; García-Franco, 1996). Se ha observado que cortezas lisas son menos propensas a albergar a plantas epífitas o a infestarse que cortezas rugosas (Botto-Mahan *et al.*, 2000). La región central de Sierra Fría, zona de mayor infectación, está dominada por especies con tallo rugoso (*J. deppeana* y *Q. potosina*) por lo que se esperaría que esta hipótesis fuese correcta. Sin embargo, es necesario profundizar al respecto con nuevos estudios, ya que especies de encino con tallo rugoso como *Q. resinosa* y *Q. rugosa* presentan valores bajos de infectación, incluso similares a los de especies con tallos lisos. Futuros estudios permitirían evaluar este aspecto y determinar si las especies presentan algún mecanismo de defensa que impida el establecimiento del muérdago.

CONCLUSIONES

Las poblaciones de Sierra Fría presentan en general una leve infectación por muérdago, siendo las poblaciones centrales las que presentan los niveles más altos. La infectación por muérdago en Sierra Fría no muestra correlación con el nivel de disturbio, sin embargo, la historia de disturbio en Sierra Fría ha propiciado una reestructuración de la cubierta vegetal generado un cambio en la selección de los hospederos.

Las especies que presentan una mayor infección son *Juniperus deppeana* y *Quercus potosina*. La mayor cantidad de individuos infestados de *J. deppeana* se encuentran en la porción central de Sierra Fría, mientras que la infectación de individuos de *Q. potosina* es proporcional en Sierra Fría. Se encontró, además, una infectación superior en individuos de mayor diámetro y altura, y una especificidad del muérdago por ciertas especies.

En Sierra Fría, las masas forestales presentan un grado de infección de leve a fuerte (grado 2 y 3) y concuerdan con las observaciones realizadas por Gutiérrez (1986). De acuerdo con Conafor (2005), este grado de infección es susceptible de tratamiento de poda, por esto se recomienda realizar podas de saneamiento en las áreas más afectadas por muérdago, por ejemplo la zona central de Sierra Fría.

Se recomienda, además, realizar estudios que permitan comprender los factores que dan forma a la distribución e interacción hemiparásito-hospedero, dentro y entre poblaciones, con la finalidad de evaluar los daños reales o futuros, así como evaluar la selectividad hacia ciertas especies hospederas y los cambios químicos que sufren los árboles a través de la infección.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a los revisores de la revista *Madera y Bosques* por sus valiosos comentarios que enriquecieron este trabajo. Asimismo, agradecemos a Gerardo Regalado y Margarita de la Cerda Lemus, responsables del herbario de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, por las facilidades brindadas durante el desarrollo del trabajo e identificación de las especies de muérdago y especies forestales, y a Tania Sánchez por el apoyo en campo durante el estudio. A Conafor-Conacyt, por el apoyo financiero otorgado al proyecto 14704.

REFERENCIAS

- Álvarez-Moctezuma, J.G., S. Ochoa-Gaona, B.H.J. de Jong y M.L. Soto-Pinto. 1999. Hábitat y distribución de cinco especies de *Quercus* (Fagaceae) en la Meseta Central de Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical* 47:351-358.
- APG II. 2008. Angiosperm Phylogeny Group: an update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APG II. <http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb>. Consulta 15 Feb 2011.
- Asociación Sierra Fría (A.S.F.). 2002. La lucha contra el descortezador de pino (*Dendroctonus* spp.) en la Sierra Fría, Aguascalientes (Informe sometido a la embajada estadounidense en México). 18 p.
- Aukema, J.E. 2003. Vectors, viscin and Viscaceae: mistletoes as parasites, mutualists, and resources. *Front. Ecol. Environ.* 1:212-219.
- Benzing, D.H. 1990. Vascular epiphytes. General biology and related biota. Cambridge University Press, Nueva York.
- Botto-Mahan, C., R. Medel, R. Ginocchio y G. Montenegro. 2000. Factores que afectan la distribución circular del muérdago sin hojas *Tristerix aphyllus* (Loranthaceae) sobre el cacto *Echinopsis chilensis*. *Rev. chil. hist. nat.* 73:525-531.
- CONAFOR, 2005. Manual de Sanidad Forestal. Gerencia de Sanidad Forestal. Coordinación General de Conservación Forestal. 51 p.
- CONAFOR, 2006. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal. Demanda 1.11 Ecología y manejo de plantas parásitas y epífitas en ecosistemas forestales del semidesierto mexicano. http://www.conacyt.mx/fondos/FondosSectoriales/CONAFOR/Convocatoria%20CONAFORCONACYT%20200601/CONAFOR_Demandas_2006-01.pdf.
- De la Cerda, L.M. 1999. Encinos de Aguascalientes. Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.
- Díaz-Núñez, V., G. Sánchez-Martínez y E.N. Gillete. 2006. Respuesta de *Dendroctonus mexicanus* (Hopkins) a dos isómeros ópticos de verbenona. *Agrociencia* 40:349-354.
- Donohue, K. 1995. The spatial demography of mistletoe on a Yemeni acacia. *International Journal Plant Science* 156:816-823.
- Downey, P.O. 2004. A regional examination of the mistletoe host species inventory. *Cunninghamia* 8:354-361.
- García-Franco, J.G. 1996. Distribución de epífitas vasculares en matorrales

- costeros de Veracruz, México. *Acta Botánica Mexicana* 37:1-9.
- García-Regalado, G. 1998. La Familia Loranthaceae (injeritos) del estado de Aguascalientes, México. *Polibotánica* 7:1-14.
- Geils, B.W., J.T. Cibrián, B. Moody. 2002. Mistletoes of North American Conifers. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-98. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 123 p.
- Gutiérrez, R.G. 1986. Estudio del comportamiento del muérdago sobre *Quercus* spp. En la Sierra de San Blas de Pabellón del Estado de Aguascalientes. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Hawksworth, F.G. 1977. The 6 class Dwarf Mistletoe Rating System. USDA Forest Service. General Technical Report RM-48. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station Forest service U.S. Department of Agriculture, Fort Collins, Colorado. 7 p.
- INEGI, 1996. Carta topográfica Escala 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F.
- Informes Técnicos de Plagas y Patología Forestal. 1999. Inventario de árboles afectados por muérdago (*Viscum album*) en el Monte Herbeset del término municipal de Morelia. Resultados y propuestas de gestión. Sección de estudios y planificación forestal.
- López-de Buen, L., J.F. Ornelas y J.G. García-Franco. 2002. Mistletoe infection of trees located at fragmented forest edges in the cloud forest of Central Veracruz, Mexico. *Forest Ecology and Management* 164:293-302.
- López-Sáez, J.A. 1993. Contribución a la corología y ecología del muérdago (*Viscum album* L.) en el centro y norte de la Península Ibérica. *Boletín de Sanidad Vegetal-Plagas* 19:551-558. Madrid.
- Minnich, R., J. Sosa Ramírez, E. Franco-Vizcaino, J.W Barry y M.E. Siqueiros. 1994. Reconocimiento preliminar de la vegetación y de los impactos de actividades humanas en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Investigación y Ciencia. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes. Investigación y Ciencia* 4:23-29.
- Mora M. 2005. Studies of the population ecology of the mistletoe *Phoradendron anceps* (Viscaceae) and its host *Pisonia albida* (Nyctaginaceae) in the Guanica Forest Reserve, Puerto Rico. Master in Science, University of Puerto Rico.
- Norton, D.A. y N. Reid. 1997. Lessons in ecosystem management from management of threatened and pest Loranthaceous mistletoes in New Zealand and Australia. *Conservation Biology* 11:759-769.
- Overton, J.M. 1994. Dispersal and infection in mistletoe metapopulations. *Journal of Ecology* 82:711-723.
- Press, M.C. y K.P. Phoenix. 2005. Impacts of parasitic plants on natural communities. *New Phytologist* 160:737-751.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. México, Limusa. México. 504 pp
- Simpson, M.G. 2006. *Plant Systematics*. Elsevier Press. Canada. 249.

- Trelease, W. 1916. The Genus *Phoradendron*, a monographic revision. University of Illinois. EUA.
- Ter Braak, C.J.F. 1988. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* 67:1167-79.
- Trópicos, 2011. Missouri Botanical Garden. <http://www.tropicos.org>. Consulta 15 Feb 2011.
- SEDESOL. 1993. Estudio para la declaración de la Sierra Fría como área natural protegida (Volumen 2). Primera edición, SEDESOL. Aguascalientes.
- Villa, C.J. 2003. Importante contribución a la salud de ecosistemas forestales. *Forestal XXI* Noviembre-Diciembre. Pp. 27-28.

Recibido el: 26 de abril de 2010

Aceptado el: 16 de febrero de 2011

Este documento se debe citar como: Clark-Tapia, R., B. Torres-Bautista, C. Alfonso-Corrado, J. Valdez-Hernández, G. González-Adame, J. Bretado-Velázquez y J. Campos-Contreras. Análisis de la abundancia e infección por muérdago en Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y Bosques* 17(2):19-33.

Proliferación de embriones somáticos de *Nothofagus alpina*: efecto de la fuente de nitrógeno orgánico exógena

Proliferation of somatic embryos of *Nothofagus alpina*: effect of an exogen source of organic nitrogen

Hermes Castellanos¹, Darcy Ríos², Manuel Sánchez-Olate², Christian Wehenkel¹ y Javier Corral³

RESUMEN

Se probó el efecto de algunas fuentes de nitrógeno orgánico como caseína hidrolizada y los aminoácidos L-Glutamina y L-Serina en el proceso de embriogénesis somática secundaria directa, empleando como explantes embriones somáticos de *Nothofagus alpina* inducidos desde cotiledones aislados de semillas maduras. Los mayores porcentajes de embriogénesis secundaria directa fueron obtenidos en medio base BTM y vitaminas MS, sin reguladores del crecimiento vegetal y en este medio más ANA, BAP y caseína hidrolizada. Sin embargo, el peso fresco de las masas de proliferación fue superior en presencia de una fuente adicional de nitrógeno orgánico. Bajo el tratamiento con reguladores del crecimiento y caseína hidrolizada también se produjo la mayor cantidad promedio de embriones producidos por explanto, aunque no hubo diferencias significativas con el tratamiento que contuvo L-Glutamina, donde el crecimiento de callo fue significativamente menor. Mediante subcultivos alternados entre medio base y medio con ANA, BAP y caseína hidrolizada, se logró la proliferación del cultivo embriogénico de manera directa, estable durante más de dos años y con baja incidencia de callo.

PALABRAS CLAVE:

Embriogénesis somática, estado de desarrollo, micropropagación, reguladores del crecimiento.

ABSTRACT

The effect of some sources of organic nitrogen such as hydrolyzed casein and the aminoacids L-glutamine and L-Serine were tested in the process of direct secondary somatic embryogenesis, in which somatic embryos of *Nothofagus alpina* -induced from isolated cotyledons of mature seeds- were used as explants. The highest percentages of direct secondary embryogenesis were obtained in BTM base medium plus MS vitamins, without plant growth regulators, and in this medium plus NAA, BAP and hydrolyzed casein. However, the fresh weight of the proliferated mass was greatest in the presence of an additional source of organic nitrogen. The highest average number of embryos per explant was also produced in the treatment with growth regulators and hydrolyzed casein, although the number was not significantly higher than in the L-Glutamine treatment, in which significantly less callus growth occurred. Alternate use of base medium and NAA, BAP and hydrolyzed casein medium during subcul-

- 1 Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. Universidad Juárez del Estado de Durango. Km. 5.5 carretera a Mazatlán. Durango, Dgo. México. CP 34120.
- 2 Laboratorio Cultivo de Tejidos Vegetales. Centro de Biotecnología. Universidad de Concepción, Chile.
- 3 Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Río Papaloapan y Blvd. Durango s/n, Col. Valle del Sur, CP 34120, Durango, México

ture enabled direct proliferation of the embryogenic culture, which remained stable for over two years and with a low incidence of callus.

KEYWORDS:

Somatic embryogenesis, developmental stage, micropropagation, growth regulators.

INTRODUCCIÓN

Nothofagus alpina (Poepp. et Endl.) Oerst.) (raulí), es considerada la especie nativa del bosque chileno con mayor potencial productivo, la que se produce mayormente mediante semillas para repoblación artificial (Donoso *et al.*, 1998). Salvo contadas excepciones, como aquellas para promover el mejoramiento genético y la silvicultura clonal del raulí y otros *Nothofagus* (Gutiérrez, 2005), la regeneración de esta especie con fines productivos se ha llevado a cabo mediante el manejo de renovales o bosques de segundo crecimiento (Donoso, 1978), lo cual, si bien tiene un efecto positivo en la calidad de los renuevos, no explota a cabalidad el acervo genético de la especie para fines productivos y de conservación.

Para la propagación de la especie, junto con la vía generativa para obtener semilla mejorada genéticamente a través de polinización controlada (Ipinza y Gutiérrez, 2000), se ha explorado la propagación vegetativa, tanto mediante macro como micropropagación organogénica. Estas investigaciones han logrado resultados prometedores (Jordan *et al.*, 1996; Martínez-Pastur y Arena, 1996; Sánchez-Olate *et al.*, 2004), pero han demostrando las limitaciones técnicas como bajas tasas de enraizamiento y escasa aplicabilidad a nivel operacional que surgen al pretender aplicar este tipo de alternativas para propagación en programas operativos de reforestación.

Gran parte de estas limitaciones puede ser superada mediante el establecimiento de micropropagación basado en la embriogénesis somática, que es la regeneración de un embrión a partir de células o tejidos somáticos diferenciados, constituyendo la expresión máxima de la totipotencia de la célula vegetal, como resultado del aislamiento, tanto espacial como fisiológico, de una célula o grupo celular (Toribio, 2003; Fehér, 2006). Actualmente, se ha conseguido inducir con éxito la embriogénesis somática en un número cada vez mayor de especies y explantos de inicio, principalmente en coníferas como *Pinus taeda*, *Abies alba* y *Larix decidua*, lo que ha propiciado su aplicación a escala operacional para la propagación masiva de genotipos selectos (Zoglauer *et al.*, 2003). En el caso de *N. alpina* se ha conseguido inducir exitosamente masas proembriogénicas y regeneración de embriones somáticos viables desde explantos cotiledonares extraídos desde semillas maduras provenientes del huerto semillero clonal Huillilemu, ubicado en la provincia de Valdivia, décima región de Chile (Castellanos *et al.*, 2005).

Algunas fuentes de nitrógeno orgánico como aminoácidos y caseína hidrolizada, han sido probadas en leñosas y herbáceas logrando una proliferación sostenida de estructuras embriogénicas *in vitro* y más aún su posterior conversión a planta (Kim y Moon, 2007; Sarker *et al.*, 2007; Corredoira *et al.*, 2003), no así en sistemas embriogénicos de *Nothofagus alpina*. Dichos aditivos en el medio de cultivo, en presencia o ausencia de sales de nitrógeno inorgánica incrementan la eficiencia del cultivo en la embriogénesis somática, lo cual se manifiesta en mayores tasas de multiplicación de embriones y retención del potencial embriogénico de los tejidos (Sotiropoulos *et al.*, 2005).

OBJETIVOS

La disparidad de resultados entre géneros y especies frente a un mismo estímulo de cultivo *in vitro*, hacen necesario la búsqueda para cada caso en particular de la mejor secuencia de cultivo que asegure la obtención de un protocolo de regeneración confiable. Así, el objetivo de este trabajo fue indagar la dosis de aminoácidos, adicionales a los contemplados en el medio de cultivo base, así como la incorporación de caseína hidrolizada, a fin de incrementar los niveles de proliferación de nuevas estructuras embriogénicas en la línea clonal RaC-01 de *Nothofagus alpina*, una de las tres líneas clonales inducidas con éxito desde cotiledones de semillas maduras y que se ha mantenido con niveles de proliferación estables hasta la fecha.

METODOLOGÍA

Material vegetal. El material empleado en este estudio se obtuvo del cultivo de la línea embriogénica RaC-01 (raulí, explanto cotiledonar, línea clonal 01), inducida desde cotiledones aislados de semillas maduras de *N. alpina*, las cuales se generaron en un huerto semillero clonal del Instituto Forestal de Chile (Infor), mediante polinización controlada. Luego de la inducción de masas pre-embriogénicas (MPEs) y manifestación de embriones somáticos, el cultivo se mantuvo en medio de manutención, consistente en la solución mineral Broadleaved Tree Medium o BTM (Chalupa, 1983) y vitaminas MS (Murashige y Skoog, 1962), más los reguladores del crecimiento 6-benciladenina (BA) y ácido α -naftalenacético (ANA) a concentraciones de 0,1 mgL⁻¹ cada uno, así como 30 gL⁻¹ de sacarosa y 6gL⁻¹ de agar. Cada 28 días se realizó un subcultivo a medio

fresco, alternándose dos subcultivos con los reguladores del crecimiento (RC) y concentraciones mencionados anteriormente con un subcultivo en medio base BTM, sin RC.

Explantos de inicio. Con ayuda de material quirúrgico previamente esterilizado y bajo lupa estereoscópica, se aislaron desde las MPEs los explantos que sirvieron de material de inicio para cada uno de los tratamientos. Dichos explantos correspondieron a embriones somáticos primarios en estado cotiledonar (ESP), seleccionando aquellos de morfología normal y con una longitud de eje embriionario de entre 3 mm y 4 mm (Figura 1a).

Tratamientos de proliferación. Se aplicaron seis tratamientos de proliferación (incluyendo un testigo en media base sin RC). El medio base aplicado a todos los tratamientos correspondió a la solución mineral BTM con vitaminas MS. En los tratamientos que incluyeron reguladores del crecimiento (T3, T4, T5 y T6), se aplicó BAP y ANA en relación 1:1. A su vez, se agregó al medio de cultivo caseína hidrolizada y los aminoácidos L-Glutamina y L-Serina, en las concentraciones y combinaciones que se detallan en la tabla 1 y que constituyen los tratamientos ensayados.

Condiciones de cultivo. El pH en todos los tratamientos fue ajustado a 5,8 por medio de la aplicación de HCl o NaOH, antes de su esterilización en autoclave a 121 °C y 1 atmósfera de presión, durante 20 minutos. Todos los tratamientos estuvieron con 30 gL⁻¹ de sacarosa y 6,0 gL⁻¹ de agar. A lo largo de las seis semanas del experimento, el cultivo se mantuvo en oscuridad continua a una temperatura de (25 ± 1) °C de día (16 horas, fotoperiodo en la cámara de cultivo) y (22 ± 1) °C de noche.

Tabla 1. Soluciones minerales y reguladores del crecimiento aplicados en los tratamientos de proliferación de la línea embriogénica de raulí RaC-01.

Tratamiento	RC (mgL ⁻¹)		Otros componentes (mgL ⁻¹)		
	ANA	BAP	Caseína hid.	L-Glutamina	L-Serina
T1	0,0	0,0	-	-	-
T2	0,0	0,0	500	-	-
T3	0,05	0,05	-	-	-
T4	0,05	0,05	500	-	-
T5	0,05	0,05	-	2,0	-
T6	0,05	0,05	-	-	2,0

Diseño experimental y análisis estadístico. Se estableció un diseño experimental completamente al azar. La unidad experimental correspondió a una placa petri de 9 cm de diámetro, conteniendo nueve ESP, con cinco repeticiones. La unidad muestral correspondió a cada ESP. Al cabo de seis semanas se evaluó el porcentaje de explantos (ESP) con embriogénesis secundaria directa (ESSD), porcentaje de explantos con calogénesis, número de embriones somáticos secundarios (ESS) en estado cotiledonar y torpedo por ESP y peso fresco (mg) del macizo de proliferación.

Debido a la naturaleza del experimento, con un limitado número de repeticiones y al incumplimiento del supuesto de normalidad de las observaciones, se llevó a cabo un análisis no paramétrico basado en permutaciones (Manly, 1997) con el fin de verificar si las diferencias observadas entre los valores promedio de los tratamientos se deben a un efecto dirigido de estos, o bien a eventos al azar (Wehenkel *et al.*, 2008). Mediante un elevado número de permutaciones es posible evaluar las diferencias promedio entre los tratamientos, las cuales sean

mayores o iguales que las respectivas diferencias observadas, lo que se llevó a cabo para las cinco variables antes mencionadas.

RESULTADOS

Embriogénesis somática secundaria directa (ESSD). Los efectos de la aplicación de tratamientos de proliferación comienzan a evidenciarse a los cinco días de iniciado el ensayo, manifestándose de dos formas diferentes. En primer lugar, algunos explantos de inicio (ESP, Figura 1a) comienzan a experimentar un aumento de tamaño tanto en sentido radial como longitudinal, seguido de la ruptura del tejido epidérmico en ambos polos de crecimiento longitudinal para luego dar paso a una continua proliferación celular, la cual, a las dos semanas cubre toda la superficie del explanto (Figura 1b). El segundo tipo de respuesta es la ocurrencia de germinación del ESP y elongación del eje hipocótilo-raíz. Conjuntamente se aprecia la aparición de agregados celulares blancos y cristalinos en la región hipocótilo, así como de pequeñas estructuras sobre el tejido epidérmico

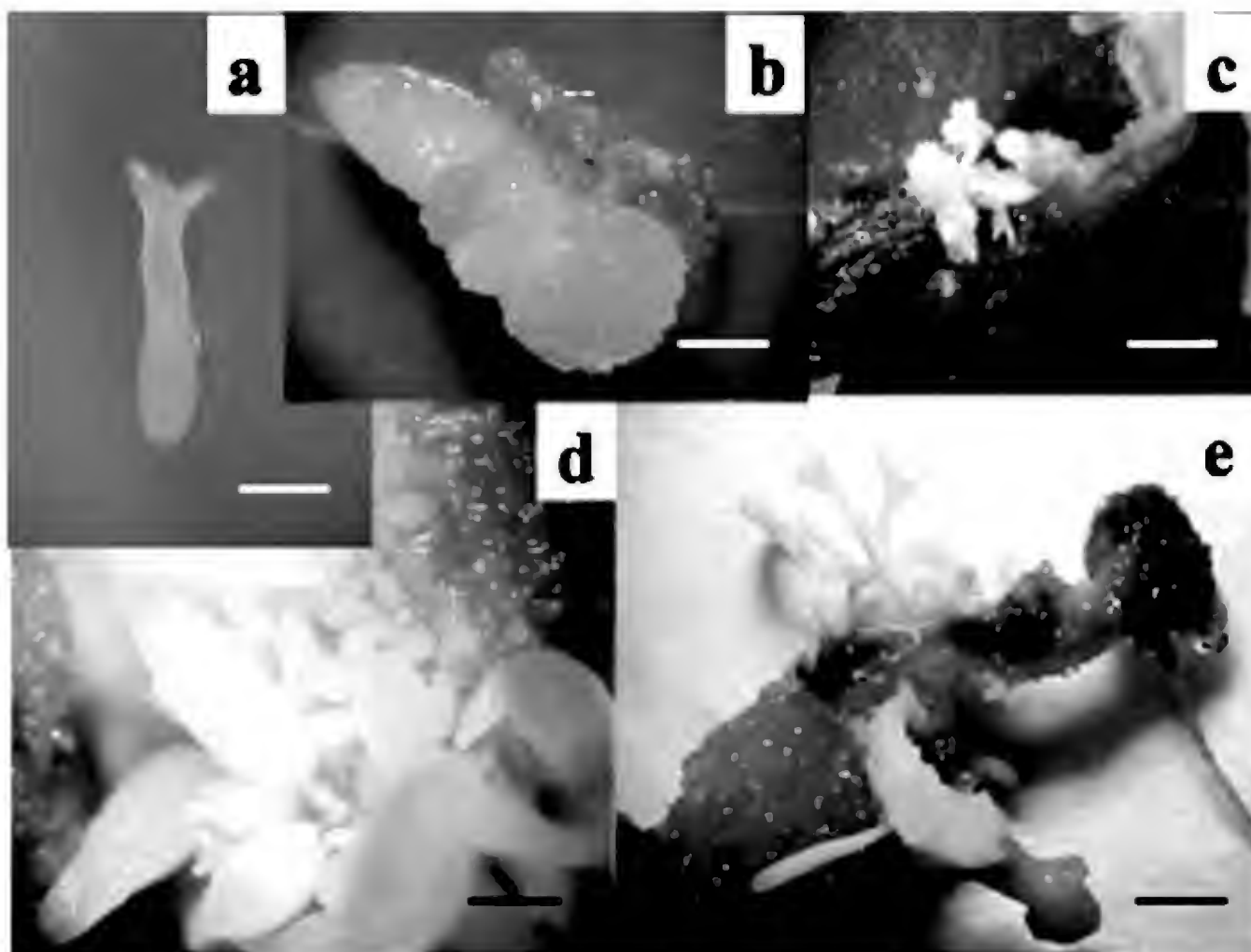


Figura 1. Diferentes aspectos de la proliferación de embriones somáticos de *Nothofagus alpina*. a) Explanto de inicio, embrión somático (ESP) en estado cotiledonar. b) Respuesta callogénica desde ESP. c) Embriogénesis somática directa desde la región hipocótilo de un ESP. d) ESS en estado globular, torpedo y cotiledonar emergiendo directamente desde ESP. e) Embriones somáticos en estado cotiledonar.

solo observables bajo lupa, correspondientes a embriones somáticos secundarios en estado globular generados de manera directa, los cuales a las cuatro semanas serán perfectamente identificables a simple vista (Figura 1c).

Respecto al porcentaje de explantes presentando (ESSD), se determinaron efectos significativos de los tratamientos aplicados sobre esta variable, alcanzándose un máximo de 53,3% de explantes iniciales, lo cual ocurrió en el tratamiento T5, el cual contiene 2,0 mgL⁻¹ de L-Glutamina además de los reguladores del crecimiento ANA y BAP (Tabla 2). Sin embargo, este tratamiento no difiere significativamente con el tratamiento

testigo en medio BTM ni con el tratamiento T4 que contiene RC más caseína hidrolizada.

El tratamiento en que menos explantos manifestaron embriogénesis somática directa fue en el que se adicionó 2,0 mgL⁻¹ del aminoácido L-Serina en combinación con ANA y BAP, con un 4,4% en tal condición.

Callogénesis. Los tratamientos aplicados influenciaron significativamente la respuesta en formación de callo desde los explantos de inicio. El mayor porcentaje de formación de callo se obtuvo en el tratamiento T3 (80%) con los reguladores del crecimiento ANA y BAP a una concen-

tración de 0,05 mgL⁻¹ cada uno, sin otro suplemento adicional. Esta respuesta no difiere significativamente agregando 500 mgL⁻¹ de caseína hidrolizada a estas condiciones (T4), donde 73.4% de los explantes presentaron callo (Tabla 3). Los niveles de callogénesis se presentaron significativamente inferiores a los tratamientos antes mencionados, principalmente bajo dos condiciones (Tabla 3): sin reguladores del crecimiento (con o sin caseína hidrolizada, T1 y T2) y con RC más aminoácidos (T5 y T6).

De acuerdo con lo observado en el sistema embriogénico en *N. alpina*, el mayor porcentaje de ESS morfológicamente normales se presenta por la vía directa, por lo que se considera favorable que la incidencia de callo se mantenga en niveles bajos en los tratamientos en donde se observaron los mayores índices de ESSD (T1 y T5, Tabla 2), esto debido a que en ausencia de callo los embriones se presentan morfológicamente normales, con ambos cotiledones y pueden ser

aislados con mayor facilidad para las siguientes etapas de maduración y germinación.

Número de embriones somáticos secundarios (ESS). En esta variable en que se considera ESS tanto en estado torpedo como cotiledonar (Figura 1d), los tratamientos influenciaron significativamente los resultados, luego de seis semanas de iniciado el ensayo. La mayores cantidades de ESS por explante se generaron en tratamientos con reguladores del crecimiento, con excepción del T6 donde el aminoácido L-Serina está presente. El mayor nivel se presentó en el tratamiento T4 con un promedio de 2.6 ESS por explanto, sin diferir significativamente con el número de ESS promedio alcanzado en los tratamientos T3 y T5, con 2.2 embriones somáticos secundarios en ambos casos (Tabla 4). Los resultados en los tratamientos antes mencionados tuvieron diferencias significativas con el resto.

Tabla 2. Valores de probabilidad (p) mediante 10 000 permutaciones y porcentajes de embriogénesis somática secundaria directa (ESD) en tratamientos aplicados a embriones somáticos primarios (ESP) de *Nothofagus alpina*.

Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5
T2	0,155				
T3	0,044*	0,576			
T4	0,092	0,330	0,333		
T5	0,374	0,037*	0,039*	0,062	
T6	0,004**	0,074	0,042*	0,009**	0,002**
Embriogénesis somática secundaria directa (ESSD) %					
T1	T2	T3	T4	T5	T6
46,7	22,2	22,2	28,9	53,3	4,4

Nota: * valores significativos (p<0,05); **valores altamente significativos (p<0,01)

Tabla 3. Valores de probabilidad mediante 10 000 permutaciones y porcentajes de callogénesis en tratamientos aplicados a embriones somáticos primarios (ESP).

Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5
T2	0,120				
T3	0,004**	0,004**			
T4	0,004**	0,004**	0,274		
T5	0,549	0,094	0,002**	0,002**	
T6	0,034*	0,652	0,002**	0,002**	0,024*

Callogénesis %

T1	T2	T3	T4	T5	T6
26,6	11,1	80,0	73,4	31,1	13,3

Nota: * valores significativos ($p < 0,05$); **valores altamente significativos ($p < 0,01$)

Tabla 4. Valores de probabilidad (p) mediante 10 000 permutaciones y número de embriones somáticos secundarios por explanto en tratamientos aplicados a embriones somáticos primarios.

Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5
T2	0,082				
T3	0,037*	0,004**			
T4	0,039*	0,004**	0,436		
T5	0,039*	0,004**	0,660	0,439	
T6	0,258	0,501	0,012*	0,011*	0,011*

Número de embriones somáticos secundarios

T1	T2	T3	T4	T5	T6
1,2	0,4	2,2	2,6	2,2	0,4

Nota: * valores significativos ($p < 0,05$); **valores altamente significativos ($p < 0,01$)

Considerando solo ESS en estado cotiledonar, la mayor cantidad por explante se presentó nuevamente en el T4 con un promedio de 1,6 sin presentar diferencias significativas, solo con T3 en donde este promedio alcanzó los 1,5 ESS por ESP ($p=0,498$). Los ESS en estado cotiledonar se presentan en su mayoría con caracteres morfológicos normales, principalmente en lo referido al par cotiledonar. Los ESS con anomalías morfológicas tales como presencia de cotiledones fusionados, no supera 20% del total, en el T4.

Peso fresco. El peso fresco de los agregados embriogénicos también se vio influenciado significativamente por los tratamientos. Esta variable se presentó en mayor magnitud en los tratamientos T3 y T4 (33,2 y 27,9 mg, respectivamente), sin diferencias significativas entre ambos tratamientos ($p=0,163$), pero sí con el resto de los tratamientos probados (Tabla 5). En los tratamientos T3 y T4 no existió

una dosis adicional de aminoácidos, salvo la adición de ANA y BAP y caseína hidrolizada. Esta respuesta está influenciada tanto por la mayor presencia de callo en estos tratamientos, así como por la mayor cantidad de ESS en estado cotiledonar (Figura 1e).

Los valores menores de esta variable se presentaron en tratamientos sin reguladores del crecimiento (T1 y T2), así como en el tratamiento T6 que contiene L-Serina, sin superar los 10 mg por macizo embriogénico en promedio.

Por otra parte, la supervivencia de los explantos se mantuvo alta en todos los tratamientos a lo largo del estudio, presentando valores máximos (100%) en los tratamientos T4 y T5, lo cual difiere significativamente con el tratamiento que contiene L-Serina (T6), que tuvo en promedio 86,7% de supervivencia.

Tabla 5. Valores de probabilidad (p) mediante 10 000 permutaciones y peso fresco (mg) de los macizos de proliferación embriogénica en tratamientos aplicados a embriones somáticos primarios (ESP).

Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5
T2	0,276				
T3	0,004**	0,004**			
T4	0,004**	0,004**	0,163		
T5	0,044*	0,026*	0,004**	0,004**	
T6	0,392	0,407	0,004**	0,004**	0,084
Peso fresco (mg)					
T1	T2	T3	T4	T5	T6
7,7	6,8	33,2	28,0	10,8	7,4

Nota: * valores significativos ($p<0,05$); **valores altamente significativos ($p<0,01$)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Si bien es cierto que las plantas, a diferencia de los humanos y la mayoría de los animales, son capaces de sintetizar todos los aminoácidos derivados de las proteínas a partir de moléculas como el piruvato y el ciclo del ácido cítrico (Taiz y Zeiger, 2006), tales componentes orgánicos se agregan a los medios de cultivo para satisfacer requerimientos de nitrógeno en su forma reducida. Estos se emplean de manera rutinaria cuando su efecto es positivo en sistemas de micropropagación masiva, como la embriogénesis somática, a pesar de su alto costo (George y de Klerk, 2008).

Se ha comprobado el efecto positivo de la adición de caseína hidrolizada y otras fuentes orgánicas de nitrógeno como los aminoácidos L-Glutamina y L-Serina a los medios de cultivo en diferentes fases de la embriogénesis somática, incluyendo inducción y proliferación de MPE, atribuyéndoles entre otros efectos, incrementar el número de nuevas estructuras embriogénicas y promover su desarrollo (Varisai *et al.*, 2004).

Por su parte, la caseína y otras proteínas hidrolizadas son menos costosas, aunque debido a su origen y procesos de obtención, son de naturaleza menos definida que los aminoácidos, lo cual implica que se deba probar su eficiencia en cada sistema embriogénico en particular. La caseína hidrolizada constituye una fuente de calcio, fosfato, diversos microelementos, vitaminas y una mezcla de al menos 18 aminoácidos, entre ellos la glutamina. Se ha probado su efecto estimulador del desarrollo en procesos morfogénicos *in vitro*, tanto en procesos como el cultivo de suspensiones celulares, como en organogénesis (George y de Klerk, 2008).

El aminoácido L-Glutamina ha sido empleado con éxito en otros sistemas embriogénicos de especies leñosas, observándose un incremento en los niveles de proliferación de MPE. Tal es el caso de un estudio llevado a cabo en *Abies nordmanniana* (Stev.) Stach., en el cual además se adicionó caseína hidrolizada al medio de cultivo (Norgaard y Krogstrup, 1991). Las fuentes de nitrógeno orgánicas suplementarias al medio de cultivo se aplican rutinariamente en estudios de embriogénesis somática en fagáceas, principalmente en las fases de inducción y proliferación de agregados embriogénicos (Cuenca *et al.*, 1999; Xing *et al.*, 1999). En *Quercus acutissima* Carruth., se adicionó 1 gL⁻¹ de L-Glutamina al medio de inducción, en el cual se cultivaron como explantos embriones cigóticos inmaduros, obteniéndose posteriormente la germinación y conversión a planta de ES de diferentes genotipos (Kim *et al.*, 1997).

Este mismo aminoácido fue aplicado con éxito como aditivo al medio MS modificado, en la mantención de la competencia embriogénica de cultivos de *Castanea sativa* Mill., en donde se emplearon ES como explante para generar embriogénesis somática recurrente, con el fin de realizar estudios posteriores del efecto de la fuente de carbono en la maduración y germinación de embriones somáticos (Corredoira *et al.*, 2003). En este estudio en *N. alpina*, la adición de aminoácidos al medio de cultivo base no tuvo un efecto significativo en relación al tratamiento testigo en cuanto a la incidencia de ES secundaria y mantenimiento de la líneas embriogénicas.

Por su parte, Robichaud *et al.* (2004) emplearon caseína hidrolizada (1 gL⁻¹) como componente adicional en medio base WPM en un estudio sobre el efecto de la adición de los aminoácidos L-Glutamina y L-Asparagina, además de agentes

modificadores del potencial osmótico del medio, sobre la maduración de ES de *Castanea dentata* (Marsh.) Borkh., encontrándose, a diferencia de este estudio, que hubo un efecto positivo en el tamaño de los ES respecto al testigo, aunque también se evidenciaron anomalías morfológicas y germinación precoz.

De acuerdo con Inoue y Maeda (1982, citados por George y De Klerk, 2008), en diversos cultivos la caseína hidrolizada es más efectiva en promover el desarrollo que la adición individual de aminoácidos en el medio de cultivo, supuestamente debido a la presencia de algún factor del crecimiento desconocido, aún presente en esa sustancia.

Si bien se considera que el mayor efecto de estas fuentes de nitrógeno inorgánico se manifiesta en soluciones minerales con baja dotación de iones NH_4^+ , George y De Klerk (2008) sugieren que estas sustancias son también efectivas en medios ricos en iones amonio, debido a la conservación de la molécula de ATP (compensando la deficiencia de fosfato), su capacidad para actuar como agentes quelantes, favorecer la capacidad de asimilación de nitrógeno, sustitución de posibles iones NH_4^+ tóxicos y el ajuste del pH intracelular.

En este estudio, el porcentaje de explantes presentando embriogénesis secundaria directa no fue afectado significativamente al agregar reguladores del crecimiento al medio de cultivo (T1 vs T4 y T5). Sin embargo, en presencia de BAP y ANA y una fuente de nitrógeno orgánico como caseína hidrolizada, el peso fresco de los macizos de proliferación y el número de ES por explante en estado cotiledonar y torpedo fueron significativamente superiores respecto al testigo. La aplicación de L-serina tuvo una incidencia negativa en esta respuesta frente al trata-

miento testigo, así como frente al tratamiento que contempló adición de L-Glutamina. Por su parte, el porcentaje de incidencia de calogénesis (proliferación de MPE), así como el peso fresco de los agregados, fueron influenciados positivamente mediante la adición de BAP y ANA, con o sin caseína hidrolizada (T3 y T4).

Del mismo modo, la generación por vía directa de embriones somáticos en estado cotiledonar y torpedo fue significativamente mayor en medio con BAP y ANA sin otros componentes adicionales, excepto al adicionar caseína hidrolizada. Se recomienda la proliferación directa de embriones somáticos secundarios en *Nothofagus alpina*, en medio base sin RC, sin un incremento significativo en la proliferación calogénica. Sin embargo, es necesario estudiar los efectos de una fuente de nitrógeno orgánico como caseína hidrolizada y el aminoácido L-Glutamina en etapas posteriores como la maduración y germinación de embriones somáticos de raulí.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a CONICYT-Chile y al proyecto MESESUP AUS 0103 por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Castellanos, H., M. Sánchez-Olate y D. Ríos. 2005. La embriogénesis somática como alternativa para la regeneración *in vitro* de raulí y roble. In: B. Gutiérrez, O. Ortiz y M.P. Molina. Clonación de raulí: estado actual y perspectivas. CEFOR-INFOR-UACH. Concepción, Chile. 174 p.
- Cuenca, B., M. San-José, M. Martínez, A. Ballester y A. Vieitez. 1999. Somatic

- embryogenesis from stem and leaf explants of *Quercus robur* L. *Plant Cell Reports* 18:538-543.
- Chalupa, V. 1983. Micropropagation of conifer and broadleaved forest trees. *Communicationes Instituti Forestalis Cechosloveniae* 13:7-39.
- Corredoira, E., A. Ballester y A.M. Vieitez. 2003. Proliferation, maturation and germination of *Castanea sativa* Mill. Somatic embryos originated from leaf explants. *Annals of Botany* 92(1): 129-136.
- Donoso, P., M. González, B. Escobar, I. Basso y L. Otero. 1998. Viverización y plantación de Raulí, Roble y Coigüe en Chile. In: C. Donoso y A. Lara. *Silvicultura de los bosques nativos de Chile*. Editorial Universitaria. Santiago. Chile. 421 p.
- Fehér, A. 2006. Why somatic plant cells start to form embryos? In: A. Mujib y J. Samaj. *Plant Cell Monographs. Somatic Embryogenesis*. Springer. Alemania. 357 p.
- George, E.F. y G.-J. De Klerk. 2008. The components of plant tissue cultura media I: Macro and Micronutrients. In: E.F. George, M. Hall y G.-J. De Klerk (Eds.). *Plant propagation by tissue culture*. Springer. Países Bajos. 501 p.
- Hartmann, H. y J. Kester. 1997. *Plant Propagation. Principles and Practices*. Prentice Hall. EUA. 770 p.
- Gutiérrez, B. 2005. Propagación vegetativa y silvicultura clonal: antecedentes generales. In: B. Gutiérrez, O. Ortiz y M.P. Molina (Eds.). *Clonación de raulí: estado actual y perspectivas*. CEFOR-INFOR-UACH. Concepción, Chile. 174 p.
- Ipinza, R. y B. Gutiérrez. 2000. Estrategia de mejora genética para *N. alpina* y *N. obliqua* en Chile. In: R. Ipinza, B. Gutiérrez y V. Emhart (Eds.). *Domesticación y mejora genética de raulí y roble*. Universidad Austral de Chile, Instituto Forestal. Valdivia, Chile. 468 p.
- Jordan, M., J. Velozo y A.M. Sabja. 1996. Organogenesis *in vitro* of *Nothofagus alpina* (P. et E.) Oerst., Fagaceae. *Plant Cell Reports* 15(10):795-798.
- Kim, Y.W. y H.K. Moon. 2007. Enhancement of somatic embryogenesis and plant regeneration in Japanese larch (*Larix leptolepis*). *Plant Cell Tissue and Organ Culture* 88:241-245.
- Manly, B.F.J. 1997. *Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology*. Segunda edición. Chapman & Hall. 399 p.
- Martínez, O. 1993. Nuevo límite sur del área de distribución de *Nothofagus alpina* (Mull.) Dim., Fagaceae. *Bosque* 14(1):73-74.
- Martínez-Pastur, G. y M. Arena. 1996. *In vitro* propagation of *Nothofagus nervosa* (Phil.) Dim. et Mil. *Phyton* 58(1/2):1-7.
- Murashige, T. y F. Skoog. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue culture. *Physiologia Plantarum* 15:473-479.
- Norgaard, J. y P. Krogstrup. 1991. Cytokinin induced somatic embryogenesis from immature embryos of *Abies nordmanniana* Lk. *Plant Cell Reports* 9(9): 509-513.
- Robichaud, R.L., C.L. Veronica y S.A. Merkle. 2004. Treatments affecting maturation and germination of American chestnut somatic embryos.

- Journal of Plant Physiology. 161:957-969. Donoso, C. 1978. La silvicultura de *Nothofagus* en Chile. Departamento de Silvicultura y Conservación. Universidad de California. Berkeley. California. 102 p.
- Sánchez-Olate, M., D. Ríos, M. Pedraza, G. Pereira, H. Castellanos y R. Escobar. 2004. Propagación *in vitro* de *Nothofagus procera* ((Poepp. et Endl.) Oerst.) a partir de embriones aislados. *Bosque* 25(1):123-128.
- Sarker, K.K., A.H. Kabir, S.A. Sharmin, Z. Nasrin and M.F. Alam. 2007. Improved somatic embryogenesis using L-asparagine in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Sjemenarstvo* 24:187-196.
- Sotiropoulos, T.E., K.N. Dimassi y I.N. Therios. 2005. Effects of L-arginine and L-cysteine on growth, and chlorophyll and mineral contents of shoots of the apple rootstock EM 26 cultures *in vitro*. *Biologia Plantarum* 49(3):443-445.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2006. *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc. Massachusetts. 764 p.
- Toribio, M. 2003. Embriogénesis somática en especies forestales. In: V Reunión de la Sociedad Española de Cultivo *in vitro* de Tejidos Vegetales. Pamplona. España. 131 p.
- Varisai, S., C. Wang, M. Thiruvengadam y N. Jayabalan. 2004. *In vitro* plant regeneration via somatic embryogenesis through cell suspension cultures of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc). *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant* 40:284-289.
- Wehenkel, A., M. Bellinzoni, M. Graña, R. Duran, A. Villarino, P. Fernandez, G. Andre-Leroux, P. England, H. Takiff, C. Cerveñansky, S.T. Cole y P.M. Alzari. 2008. Mycobacterial Ser/Thr protein kinases and phosphatases: Physiological roles and therapeutic potential. *Biochimica et Biophysica Acta* 1784(2008):193-202.
- Xing, Z., W. Powell y Ch. Maynard. 1999. Development and germination of American chesnut somatic embryos. *Plant Cell Tissue and Organ culture* 57:47-55.
- Zoglauer, K., U. Behrendt, A. Rahmat, H. Ross and Taryono. 2003. Somatic embryogenesis-the gate to biotechnology in conifers. In: M. Laimer, M. and W. Rucker (Eds.). *Plant tissue culture. 100 years since Gottlieb Haberlandt*. Springer. Austria. 260 p.

Recibido el: 21 de enero de 2009

Aceptado el: 30 de julio de 2010

Este documento se debe citar como: Castellanos, H., D. Ríos, M. Sánchez-Olate, Ch. Wehenkel y J. Corral. Proliferación de embriones somáticos de *Nothofagus alpina*: efecto de la fuente de nitrógeno orgánico exógena. *Madera y Bosques* 17(2):35-46.

Utilização de resíduos de *Pinus* spp., metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira

Use the residue of *Pinus* spp, high reactivity metakaolin and residue of ceramic calcined in wood-cement composites

Adauto José Miranda de Lima¹, Setsuo Iwakiri²
y María Guadalupe Lomelí-Ramírez³

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de utilização do resíduo do desdobro de toras de *Pinus* spp. e de substituições parciais do cimento Portland por metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada, em compósitos cimento-madeira. As características físicas (massa específica, índice de vazios e absorção de água) e mecânicas (resistência à compressão e a tração) dos compósitos, foram determinadas conforme normas da ABNT. Foram testadas substituições do cimento Portland por teores de 5% a 40% de metacaulim de alta reatividade e 5% a 40% de resíduo de cerâmica calcinada. Em ambos casos foram utilizados, aditivos químicos ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para acelerar a pega do cimento e superplastificante, a fim de manter inalteradas as características reológicas do compósito. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica da utilização do resíduo de *Pinus* spp. e das substituições parciais do cimento Portland dos compósitos. Os valores otimizados destas substituições foram determinados através de análise multivariada, sendo de 10% para o metacaulim de alta reatividade e de 5% para o resíduo de cerâmica calcinada.

PALAVRAS-CHAVE:

Compósito cimento-madeira, *Pinus* spp., metacaulim de alta reatividade, resíduo de cerâmica calcinada.

ABSTRACT

This research was developed with the objective of evaluating the potential use of residues of the production of sown *Pinus* spp wood and partial substitutions of Portland cement for high performance metakaolin and residue of calcined ceramic in cement-wood composites. The evaluation of the physical characteristics (specific mass, porosity and water absorption) and mechanics characteristics (compression and traction resistances) of the composites were determined in agreement with the ABNT standards. The was levels of substitution to the Portland cement for 5% to 40% of high performance metakaolin and 5% to 40% of residue of calcined ceramic. In both cases additive chemicals ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) to speed up the cure of the cement were used and super-plasticizer to maintain without altering the rheological characteristics

- 1 Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR, Curitiba, PR, Brasil – adautojm@utfpr.edu.br
- 2 Depto. de Engenharia e Tecnologia Florestal, UFPR, Curitiba, PR, Brasil – setsuo@ufpr.br
- 3 Depto. de Engenharia e Tecnologia Florestal, UFPR, Curitiba, PR, Brasil – glomeli12@hotmail.com

of the composite. The results demonstrated the technical viability to the use of the residue of *Pinus spp* and the for substitutions of the cement Portland in composites, and the optimized levels, obtained through multivariate statistical analysis, were 10% of high performance metakaolin and 5% of residue of calcined ceramic.

KEYWORDS:

Cement-wood composites, *Pinus spp.*, high performance metakaolin, residue of calcined ceramic.

RESUMEN

Utilización de residuos de *Pinus spp*, metacaolín de alta reactividad y residuo de cerámica calcinada en compuestos madera-cemento. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el uso potencial del residuo de aserrío de trozas de *Pinus spp.* y de sustituciones parciales de cemento Portland por metacaolín de alta reactividad y residuo de cerámica calcinada, en compósitos cemento-madera. Las características físicas (densidad, índice de poros y la absorción de agua) y mecánicas (resistencia a la compresión y a tracción) de los compuestos se determinaron con base en las normas ABNT. Fueron evaluadas sustituciones de cemento Portland por niveles de 5% a 40% de metacaolín de alta reactividad y 5% a 40% de residuo de cerámica calcinada. En ambos casos se utilizaron aditivos químicos ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para acelerar la cura del cemento y superplastificante para mantener inalteradas las características reológicas del compuesto. Los resultados demostraron viabilidad técnica de la utilización del residuo de *Pinus spp.* y de las sustituciones del cemento Portland en el compósito. Los valores optimizados fueron determinados a través de análisis multivariado, siendo de 10% de metacaolín de alta reactividad y 5% de residuo de cerámica calcinada.

PALABRAS CLAVE:

Compuestos cemento-madera, *Pinus spp.*, metacaolín de alta reactividad, residuo de cerámica calcinada.

INTRODUÇÃO

A viabilidade da produção de compósitos produzidos com fibras e/ou partículas naturais vem sendo pesquisada há décadas, possuindo uma longa história de aceitação e aplicação na construção civil, especialmente na Europa e Ásia.

De acordo com Semple e Evans (2004) e Moslemi (1989), os materiais produzidos com compósitos cimento-madeira apresentam uma série de vantagens, entre as quais podem ser citadas: disponibilidade de matéria prima em grandes quantidades, baixa massa específica, o que permite sua utilização na produção de painéis de fechamento, forros, telhas, elementos de vedação e de alvenaria. Além destes atributos, os materiais podem ser serrados, furados, receber parafusos e tintas.

Além dessas vantagens, os materiais produzidos com compósitos cimento-madeira não emitem resíduos tóxicos durante a sua manufatura (Van Elten, 2000 apud Semple e Evans, 2004), não necessitam de tratamentos preservativos, apresentam menor dispêndio de energia no processo de produção (Moslemi, 1989), inclusive se tornando uma alternativa viável aos fibrocimentos que utilizam asbesto (amianto), principalmente na Europa, Japão e América do Norte (Moslemi, 1989).

O gênero *Pinus spp.*, da família *Pinaceae* é composto por plantas lenhosas, em geral arbóreas, de altura variável, sendo que algumas espécies de *Pinus* se incluem entre as árvores mais utilizadas no mundo (Lima *et al.*, 1988; Morais *et al.*, 2005).

As madeiras pertencentes ao gênero *Pinus spp.* fornecem material de boa qualidade para a produção de celulose,

além de apresentar características tecnológicas adequadas para seu aproveitamento em serraria. Durante as etapas do processamento mecânico da madeira se produz grande quantidade de resíduos que, de acordo com Nahuz (2004), até o momento, não têm recebido a devida valorização.

O incremento na produção de madeira de *Pinus* spp. pode ser constatado na base de dados da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2009), onde se verifica uma produção de toras de *Pinus* spp., em 2007, de 50,6 milhões de metros cúbicos, contra 42 milhões de metros cúbicos em 1997. Portanto, um acréscimo de produção de 20,48% no período de dez anos.

Sob esta ótica, a geração de resíduos florestais no Brasil também atinge valores expressivos, pois segundo a ABIMICI (2009) só a produção de madeira serrada em 2008 alcançou o montante de 22,886 milhões de metros cúbicos. Inferindo sobre este valor, o potencial de perdas, que conforme Freitas (2000) pode atingir até 60%, deduz-se que um valor significativo de resíduos florestais foi produzido naquele ano.

Dentre os resíduos de outras atividades industriais, alguns como a cinza volante e a escória de alto-forno, apresentam propriedades que permitem o uso como substituintes ao cimento Portland, cuja produção, conforme Oliveira (2008) é responsável por 7% das emissões de CO₂ no planeta.

A capacidade dos materiais cimentícios alternativos em reagir com o Ca(OH)₂, também conhecida como atividade pozolânica, é propriedade fundamental para a sua utilização. Esta reação resulta na formação de compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os

silicatos e os aluminatos de cálcio hidratado, que são os principais elementos responsáveis pela resistência das pastas hidratadas de cimento (Carmo, 2006). Esta reação, por se dar a temperatura ambiente, é geralmente lenta e pode levar meses para ser completada, entretanto, quanto mais vítrea e mais fina for a pozolana, mais rápida será a reação com o Ca(OH)₂ do cimento.

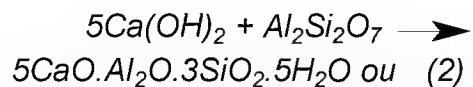
John e Agopyan (1993) afirmam que o emprego de materiais cimentícios alternativos pode colaborar para um aumento da durabilidade de compósitos com fibras ou partículas vegetais. Com o consumo de parte do Ca(OH)₂ que está concentrado na zona de transição, ocorre a melhora da aderência entre fibra e matriz. De acordo com Lange *et al.* (1989), a redução do pH da solução em função desta combinação dos íons Ca²⁺, torna a matriz menos sensível aos efeitos inibitórios da madeira.

O metacaulim, também denominado metacaulim de alta reatividade, é originado da calcinação da caulinita de alta pureza - Al₂Si₂O₅(OH)₄ - que é essencialmente um silicato de alumínio hidratado, que após sua calcinação perde a maioria dos radicais OH⁻ e passa a ser um silicato de alumínio desidratado, no estado amorfo, passando em seguida por um processo de moagem altamente eficiente, conferindo elevada área superficial às partículas (Rocha e Vasconcelos, 2006).

Segundo Zampieri (1989), as reações pozolânicas entre o metacaulim e o Ca(OH)₂ são, em essência, reações de dissolução e formação de novas fases. O metacaulim, principalmente devido ao grande desordenamento atômico oriundo do tratamento térmico, ao entrar em contato com o meio fortemente alcalino das pastas hidratadas de cimento Portland, provoca a dissolução do silício e do alumínio na superfície de suas partí-

culas, que, posteriormente, reagem com o excesso de cálcio existente, cristalizando em aluminatos, silicatos e alumino-silicatos de cálcio hidratado.

As reações químicas iniciam normalmente após o fim de pega do cimento e só cessam quando todo o metacaulim da mistura reagir com o CaO livre da matriz, de acordo com a seguinte expressão:



CASH (cristais de genelita)
+ CSH (portlandita)

O Brasil respondeu em 2007 por 6,8% da produção mundial de caulim, com 2,52 milhões de toneladas, sendo a região norte do país, responsável por 80% da produção nacional (DNPM, 2009).

A utilização de argilas ativadas termicamente (argilas calcinadas) em argamassas e concretos tem recebido considerável atenção nos últimos anos, devido aos benefícios técnicos, econômicos e ambientais que esses materiais podem promover.

Uma possibilidade de obtenção de argila calcinada é a partir de resíduos de indústrias que utilizam argila como matéria-prima, como ocorre na indústria cerâmica, que normalmente utilizam argilas ilíticas ou montmorilomíticas, que passam por um processo de queima e sinterização que pode chegar a uma temperatura de 950 °C (Gonçalves *et al.*, 2006).

A indústria da cerâmica vermelha compreende os materiais empregados na construção civil, tais como tijolos, blocos, telhas, tubos cerâmicos, manilhas e argila expandida. O setor de cerâmica vermelha

conta com aproximadamente 11 mil empresas no Brasil, em sua maioria de pequeno porte. Ruy (2004) e Gonçalves *et al.* (2006) determinaram que o índice médio de perdas nesse setor é de 10%.

Ao inferir este percentual de perdas, de 10% sobre a produção nacional de cerâmica vermelha, que de acordo com os últimos dados da Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM (2008), que são de 65 milhões de toneladas, obter-se-á uma produção de resíduo de cerâmica calcinada de 6,5 milhões de toneladas, volume significativo e que ocasiona problemas ambientais em função da deposição irregular.

Outra fonte importante de resíduo de cerâmica calcinada são os resíduos sólidos urbanos. Estima-se que 40% a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos têm origem no processo construtivo, dos quais 50% são dispostos irregularmente sem qualquer critério de seleção. Em massa, o montante de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados no Brasil é de aproximadamente $68,5 \times 10^6$ toneladas/ano (Ângulo *et al.*, 2001). A participação de materiais cerâmicos na composição do RCD atinge até 30% do total de resíduos (Pinto, 1997; Ângulo *et al.*, 2001), o que resulta em mais de 20,5 milhões de toneladas/ano.

Em função da grande finura, a utilização tanto do metacaulim de alta reatividade quanto do resíduo de cerâmica calcinada, em substituição de parte do cimento, resulta em um aumento na demanda de água para manter a mesma trabalhabilidade de uma pasta produzida com cimento puro. Para evitar-se a adição de mais água na mistura, o que prejudicaria as características dos compósitos no estado endurecido, é imprescindível o uso de aditivos superplastificantes, que são aditivos redutores de água de alta eficiência e atuam disper-

sando as partículas de cimento e dos materiais alternativos, diminuindo o atrito interno existente entre elas (Khayat e Aïtcin, 1993 apud Mendes, 2002; Mehta e Monteiro, 2008; Neville, 1997).

Os aditivos aceleradores são úteis para modificar as propriedades do concreto de cimento Portland, propiciando redução do tempo de cura, aumento da velocidade de desenvolvimento da resistência inicial do material, entre outras (Mehta e Monteiro, 2008).

Os aditivos aceleradores de pega são úteis também para modificar as propriedades do concreto de cimento Portland, propiciando redução do tempo de cura e aumento da velocidade de desenvolvimento da resistência inicial do material. Dentre os compostos inorgânicos utilizados como aceleradores de pega, encontram-se os hidróxidos de sódio, potássio ou amônio e, entre os compostos orgânicos, destaca-se a trietanolamina (Isaia, 2005). Para Mehta e Monteiro (2008) o aditivo acelerador de pega mais conhecido e amplamente utilizado é o cloreto de cálcio (CaCl_2).

OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de utilização do resíduo do desdobro de toras de *Pinus* spp. e de substituições parciais do cimento Portland por metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada, em compósitos cimento-madeira.

MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de madeira de *Pinus* spp., utilizado neste estudo foi proveniente de uma madeireira localizada no município de Almirante Tamandaré (Paraná, Brasil). Após a coleta, o resíduo foi seco ao ar e

peneirado em uma peneira ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) n° 4, de forma a garantir ao resíduo de *Pinus* spp, uma granulometria contínua com dimensão máxima característica ($D_{\text{máx}}$) de 4,8 mm.

Na produção dos compósitos de referência o resíduo de *Pinus* foi utilizado *in natura*, ou seja, sem qualquer pré-tratamento ou uso de aditivos químicos (Referência 1), *in natura* e com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Referência 2) e com pré-tratamento tipo extração em água fria por 48 horas (AF-48H) e com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Referência 3).

O aglomerante utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland, tipo CPV ARI RS – cimento Portland de Alta Resistência Inicial – Resistente a Sulfatos, especificado pela norma ABNT NBR 5.733 (1991).

Nesta pesquisa utilizou-se o material *Metacaulim HP*® produzido e comercializado pela empresa *Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda.* O resíduo de cerâmica utilizado foi fornecido por uma indústria que produz cerâmica vermelha para construção civil, localizada na cidade de Curitiba (Paraná, Brasil).

O aditivo acelerador de pega utilizado foi o cloreto de cálcio bi-hidratado - $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, produzido pela *IPC do Nordeste Ltda.* O aditivo superplastificante utilizado tem como base uma mistura de lignosulfonatos, naftalenos e melaminas e foi produzido e fornecido pela empresa *MC – Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda.*, com o nome comercial *Muraplast FK 49B*.

A confecção dos corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 50mm baseou-se na Norma Brasileira NBR 7215 (1996). Foi utilizado o traço sugerido por Simatupang (1979) e apresentada por Moslemi Pfister (1987) apud Iwakiri

(2005), fixando-se uma relação madeira/cimento igual a 13,3:1 e uma relação água/cimento igual a 0,35. O teor de água da mistura foi controlado e corrigido em função do teor de umidade do resíduo de *Pinus*, de forma a manter sempre a madeira no Ponto e Saturação das Fibras (PSF), adotado neste estudo como 30%.

A amostra mínima a ser ensaiada, a fim de garantir estatisticamente a distribuição e confiabilidade dos resultados, foi determinada pela equação:

$$n = z_{\alpha/2}^2 \cdot \frac{CV^2}{Er^2} \quad (3)$$

Onde: n = número de repetições;

Er = erro relativo admitido da estimativa, fixado em 10%;

CV = coeficiente de variação da amostra;

$z_{\alpha/2}$ = valor tabelado, para um nível $\alpha = 5\%$ de significância, de 1,96.

A cura inicial dos corpos-de-prova, com duração de 24 horas, deu-se em câmara úmida, conforme NBR 9.479 (2006), com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa mínima de 95%, onde permaneceram com os moldes e cobertos com uma placa de acrílico, para proteção, conforme NBR 7.215 (1996). Após o período de cura inicial, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e mantidos em câmara úmida, imersos em água, até a data de ensaio.

As características mecânicas, compreendendo os ensaios para determinação da resistência à compressão aos 7 e 91 dias foram efetuados conforme NBR 7.215 (1997). Para não haver influências

de irregularidades nos topos dos corpos-de-prova, e garantir a ruptura por compressão simples, foram utilizados discos de neoprene com dureza 60 a 70 shore dispostas em guarnições de aço.

As características físicas dos compósitos produzidos nesta pesquisa foram determinadas em máquina universal de ensaio marca *Emic*, modelo *DL 30000*, com tomada de dados por computador. Os ensaios foram realizados no Labmat - Laboratório de Materiais de Construção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Os teores de substituições parciais do cimento Portland dos compósitos cimento-madeira (resíduo de *Pinus*), foram tomadas com base na massa de cimento do traço nos teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40%, tanto para o metacaulim quanto para o resíduo de cerâmica.

Quanto ao aditivo acelerador de pega, para cada teor de substituição do cimento Portland, foram testados teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, variando de 0%, 1%, 2%, 3% e 4,5%. O teor limite de 4,5% foi adotado por ter apresentado o melhor desempenho nos compósitos com o resíduo de *Pinus in natura*.

O aditivo superplastificante foi utilizado em teores calculados sobre a massa do cimento e dos materiais cimentícios alternativos, de modo a manter a consistência da mistura fresca, medida na mesa cadente, conforme NBR 7.215 (1996), constante e com valor que represente a média da consistência dos compósitos de Referência, estabelecida em (250 ± 10) mm.

Com base nos resultados de resistência à compressão na idade de 7 dias (RC 7d) e 91 dias (RC 91d) dos compósitos produzidos com as substituições parciais do cimento Portland, efetuaram-

se análises multivariadas através de regressões múltiplas, considerando-se como variáveis dependentes as resistências dos compósitos à compressão aos 91 dias de idade (RC 91d) e como variáveis independentes os teores de substituição ao cimento Portland e os teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante. Estas composições otimizadas foram produzidas e testadas em laboratório para determinação das características físicas e mecânicas dos compósitos.

As características físicas dos compósitos otimizados aos 28 dias de idade, compreendendo os ensaios para determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água, foram determinadas conforme a norma NBR 9.778 (2005). As características mecânicas, compreendendo os ensaios para determinação da resistência à compressão aos 7 dias (RC 7d), 28 dias (RC 28d) e 91 dias (RC 91d), foram determinadas conforme NBR 7.215 (1997). A determinação da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade (RT 28d), foi efetuada conforme NBR 7.222 (1994).

A análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios foi feita através da análise variância (ANOVA) e, todas as vezes que a hipótese da nulidade foi rejeitada, efetuou-se a comparação das médias através do teste de Tukey-Kramer.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland pelo Metacaulim de Alta Reatividade

Na tabela 1 estão apresentados os valores das resistências à compressão aos 7 e 91 dias de cura (RC 7d e RC 91d), para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito

por teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de metacaulim (MC) de alta reatividade.

Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela adição do resíduo de cerâmica, houve a necessidade, para manter inalterada a consistência do compósito fresco, de utilizar aditivo superplastificante nos teores de 0,60% a 7,80%, com base na massa do cimento mais MC;

Nos compósitos produzidos com teores acima de 4,0% de aditivo superplastificante e acima de 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, verificou-se a presença de macro-poros devido à dificuldade de compactação para a produção dos corpos-de-prova, conforme evidenciado na figura 1.

Os maiores valores de RC 7d, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim, se verificaram para os compósitos com MC 5% com adição de 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,60% de aditivo superplastificante, e MC 15% com adição de 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 1,20% de aditivo superplastificante, ambas significativamente superiores às resistências determinadas com os compósitos de referência (PN¹, PNCC², PNAFCC³).

Para os resultados obtidos aos 91 dias de idade, as maiores resistências foram verificadas para os compósitos MC 10% com adição de 1% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,70% de aditivo superplastificante, valor significativamente superior aos determinados com os compósitos de referência. Os resultados demonstram que é possível substituir até 30% do cimento Portland do compósito por Metacaulim, sem que haja diferenças estatísticas significantes, à 95% de confiança, dos valores determinados para a maior resistência determinada

Tabela 1. Variação da resistência à compressão aos 7 e 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento Portland por metacaulim de alta reatividade e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

TS-MC	T-CC (%)	T-SP (%)	CONS (mm)	Resistência à compressão (MPa)			CV (%)
				RC-7d	RC-91d	CV (%)	
PN ¹	0,00	0,00	283,00	20,01 P	28,97 T	4,99	5,68
PNCC ²	4,50	0,00	257,00	32,57 EFG	39,82 LMN	1,90	5,46
PNAFCC ³	4,50	0,00	248,00	34,73 BC	43,91 DEF	2,48	1,21
	0,00	0,60	250,00	27,87 KL	39,64 MN	3,62	3,29
	1,00	0,60	250,00	34,51 BCD	41,46 HIJKL	4,31	2,44
5,0	2,00	0,60	246,00	37,11 A	41,74 HIJK	4,31	2,42
	3,00	0,60	250,00	34,19 BCDE	40,93 IJKLM	3,26	3,01
	4,50	0,60	251,00	32,79 DEFG	39,40 MN	3,64	2,34
	0,00	0,70	259,00	26,92 LM	41,78 HIJ	4,89	3,12
	1,00	0,70	250,00	30,35 HI	49,57 A	3,56	2,50
10,0	2,00	0,70	248,00	33,18 CDEF	47,74 B	3,48	0,89
	3,00	0,70	250,00	32,19 FG	46,14 BC	3,17	1,64
	4,50	0,70	251,00	30,87 GHI	43,77 EF	2,62	3,86
	0,00	1,20	248,00	31,79 FGH	41,90 GHIJ	0,36	5,18
	1,00	1,20	247,00	32,41 EFG	43,65 EFG	4,84	3,69
15,0	2,00	1,20	245,00	35,64 AB	42,15 FGHJ	2,95	4,42
	3,00	1,20	245,00	33,18 CDEF	41,70 GHIJKL	3,02	2,73
	4,50	1,20	245,00	33,31 Fghi	38,79 NO	3,68	3,86
20,0	0,00	2,60	250,00	27,86 KL	40,11 JKLMN	1,81	0,78
	1,00	2,60	245,00	29,89 HIJ	42,14 FGHJ	4,18	1,04
	2,00	2,60	245,00	29,93 HIJ	45,81 BCD	1,73	0,71
	3,00	2,80	250,00	29,86 HIJ	44,46 CDE	3,94	0,74
	4,50	2,80	250,00	28,31 JKL	43,04 EFGH	4,54	2,84
	0,00	4,00	255,00	30,27 HI	33,05 R	4,40	1,41
30,0	1,00	4,00	252,00	29,36 IJK	39,95 KLMN	7,66	5,19
	2,00	4,60	240,00	32,75 DEFG	42,57 EFGHI	5,85	2,39
	3,00	5,40	250,00	30,26 HI	39,17 MN	6,77	2,39
	4,50	5,70	252,00	24,84 NO	31,22 S	2,79	5,72
	0,00	5,80	256,00	23,37 O	32,72 RS	7,48	2,31
40,0	1,00	6,80	250,00	27,10 LM	33,82 QR	2,94	5,83
	2,00	7,20	240,00	27,21 LM	37,03 OP	5,38	0,54
	3,00	7,80	245,00	25,66 MN	35,56 PQ	5,86	3,88
	4,50	7,80	243,00	23,96 NO	33,31 R	7,39	1,91

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; TS-CV: Teor de substituição da metacaulim; T-CC: Teor de CaCl_2 ; T-SP: Teor de superplastificante; CONS: Consistência; CV: coeficiente de variação; PN¹ Ref.1: Pinus spp in natura; PNCC² Ref.2: Pinus spp in natura + 4,5% CaCl_2 ; PNAFCC³ Ref.3: Pinus spp in natura com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5% CaCl_2 .

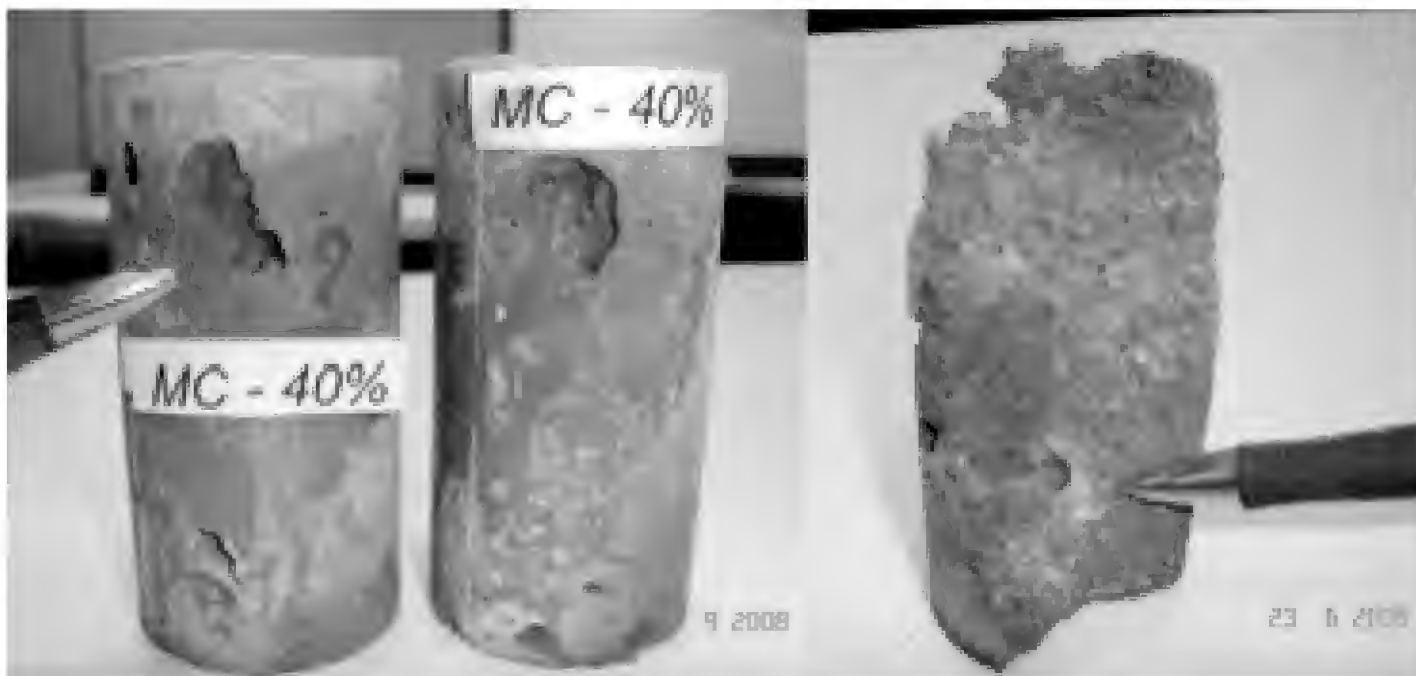


Figura 1. Macroporos nos compósitos com 40% de metacaulim e teores de superplastificante entre 5,8% e 7,8%.

com os compósitos de Referência aos 91 dias de idade (Ref. 3).

Através do uso de técnicas de análise multivariada determinou-se o seguinte modelo para expressar a dependência da RC91d em função dos teores de metacaulim, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e aditivo superplastificante:

$$\begin{aligned}
 RC91d \text{ (MPa)} = & 1 / (1,2481 \times 10^{-5} + \\
 & 4,9794 \times 10^{-23} \times \text{Exp}([\text{Teor Metacaulim} \\
 & \text{(\%)}]) + 2,6446 \times 10^{-44} / [\text{Teor CaCl}_2 \text{ (\%)}]^{1/3} \\
 & + 1,6530 \times 10^{-7} / \text{Ln}([\text{Teor Superplast} \\
 & \text{(\%)}])^{1/3} \quad (4)
 \end{aligned}$$

O modelo apresentou forte correlação ($R=0,8794$, $R^2=0,7734$ e $R^2_{\text{Ajust}} = 0,7656$), o que indica que os dados experimentais estão bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância ($1,1 \times 10^{-17}$), é superior a 99,99%.

Na figura 2 está apresentada a superfície de resposta da RC 91d do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPVARI RS em função do teor de substituição por metacaulim e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, conforme modelo determinado pela análise multivariada.

A superfície de resposta demonstra que há pouca variação da RC 91d do compósito para substituição do cimento Portland por teores entre 5% e 35% de metacaulim, sendo que acima desses teores de substituição, verifica-se uma queda acentuada da resistência. Verifica-se, também, que a RC 91d, praticamente independe do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, o que é confirmado pela de análise numérica da equação n° 4.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta na seguinte composição: cimento = 90%, metacaulim = 10%, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = 0% e superplastificante = 1,10%. A expectativa de resistência à compressão para esta

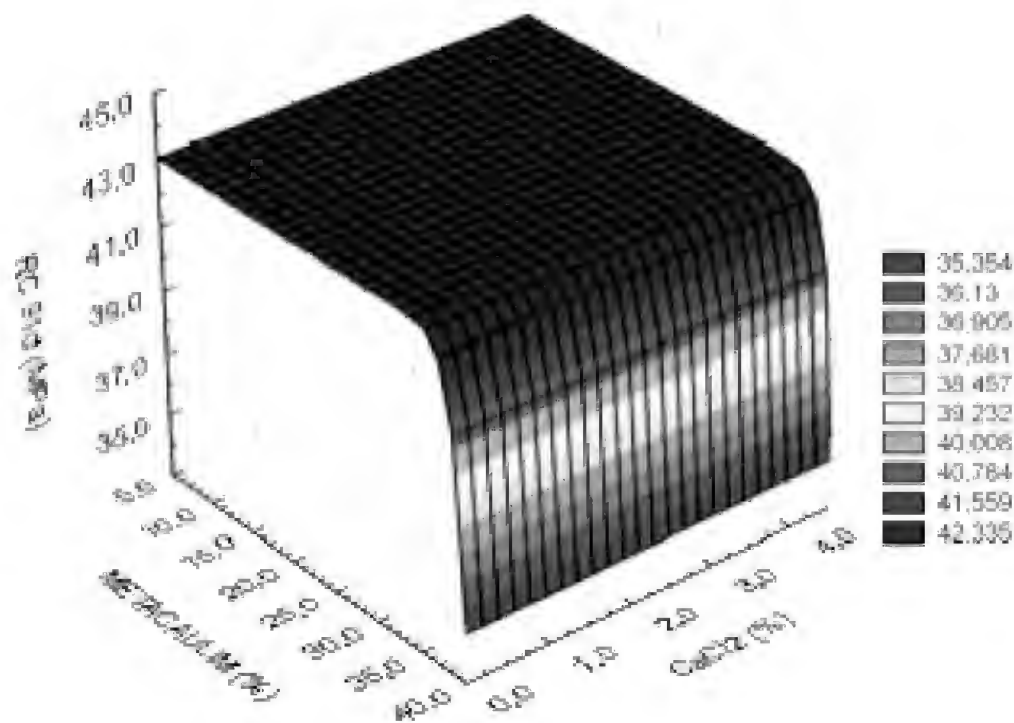


Figura 2. Variação da resistência à compressão aos 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento Portland por metacaulim e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

composição otimizada, aos 91 dias de idade, determinada pelo modelo é de 45,0848 MPa.

Análise da Substituição Parcial do Cimento Portland por Resíduo de Cerâmica Calcinada (RCC)

Na tabela 2 estão apresentados os valores das RC 7d e RC 91d para as substituições parciais do cimento Portland do traço original do compósito por teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% de resíduo de cerâmica calcinada RCC.

Em função do aumento da superfície específica da mistura, promovida pela adição do resíduo de cerâmica, houve a necessidade, a fim de manter inalterada a consistência do compósito no estado fresco, de utilizar aditivo superplastificante nos teores de 0,60% a 2,60%, com base na massa do cimento mais RCC.

A análise dos resultados apresentados indicam que o maior valor de RC 7d, para os compósitos produzidos com substituição parcial do cimento Portland, se verificou para o compósito com RCC 5% com 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,70% de aditivo superplastificante, sendo significativamente superior às resistências determinadas com os compósitos de Referência (PN¹, PNCC², PNAFCC³).

Para os ensaios realizados com 91 dias de idade, as maiores resistências à compressão foram verificadas para os compósitos RCC 5% com 2% e 3% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,60% e 0,70% de aditivo superplastificante, respectivamente, sendo ambas significativamente superiores às resistências determinadas com os compósitos de Referência. Os resultados indicam que é possível substituir até 20% do cimento Portland do compósito por RCC, sem que haja diferenças estatísticas significantes, à 95% de confiança,

Tabela 2. Variação da resistência à compressão aos 7 e 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica calcinada RCC e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

TS-RCC	T-CC (%)	T-SP (%)	CONS (mm)	Resistência à compressão (MPa)		
				RC-7d	RC-91d	CV (%)
PN ¹	0,00	0,00	283,00	20,01 Q	28,97 O	5,68
PNCC ²	4,50	0,00	257,00	32,57 IJ	39,82 GH	5,46
PNAFCC ³	4,50	0,00	248,00	34,73 FGH	43,91 CDE	1,21
5,0	0,00	0,60	255,00	31,08 JK	39,88 FGH	3,15
	1,00	0,60	255,00	37,39 BCD	44,57 CD	1,17
	2,00	0,60	250,00	39,65 B	47,86 A	1,13
	3,00	0,70	250,00	42,19 A	47,15 AB	5,31
	4,50	0,80	255,00	37,16 CDE	43,11 CDE	2,35
10,0	0,00	0,60	255,00	29,57 KL	35,50 JK	3,58
	1,00	0,60	253,00	33,06 HIJ	43,13 CDE	2,55
	2,00	0,60	248,00	38,35 BC	44,91 BC	2,00
	3,00	0,70	255,00	36,44 CDEF	42,59 CDE	1,21
	4,50	0,70	254,00	33,24 GHIJ	42,69 CDE	4,02
15,0	0,00	0,60	251,00	32,30 IJ	37,06 IJ	5,31
	1,00	0,60	250,00	35,04 EFGH	41,61 EFGH	5,99
	2,00	0,60	255,00	36,41 CDEF	42,44 CDEF	1,38
	3,00	0,60	251,00	37,25 BCDE	43,64 CDE	2,92
	4,50	0,60	250,00	35,64 DEFG	42,80 CDE	4,97
20,0	0,00	0,50	247,00	29,31 KL	37,01 IJ	3,62
	1,00	0,50	245,00	32,85 HIJ	39,40 HI	3,39
	2,00	0,60	256,00	35,78 DEF	42,17 DEFG	5,81
	3,00	0,60	253,00	35,04 EFGH	42,75 CDE	3,00
	4,50	0,60	252,00	34,42 FGH	42,44 CDEF	2,46
30,0	0,00	1,20	254,00	23,19 OP	30,13 NO	7,84
	1,00	1,20	254,00	27,51 LM	32,26 MN	5,25
	2,00	1,20	255,00	28,76 L	35,74 JK	6,45
	3,00	1,20	255,00	27,78 L	36,29 JK	3,00
	4,50	1,20	256,00	28,11 L	35,01 JKL	2,46
40,0	0,00	2,60	260,00	23,54 NOP	29,65 O	5,10
	1,00	2,60	264,00	24,91 NO	32,98 LM	6,88
	2,00	2,60	260,00	25,52 MN	34,57 KL	4,02
	3,00	2,60	250,00	24,05 NOP	35,56 JK	3,78
	4,50	2,60	260,00	22,72 P	34,08 KLM	2,66

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; TS-RCC: Teor de substituição do resíduo de cerâmica calcinada; T-CC: Teor de CaCl_2 ; T-SP: Teor de superplastificante; CONS: Consistência; CV: coeficiente de variação; PN¹ Ref.1: Pinus spp in natura; PNCC² Ref.2: Pinus spp in natura + 4,5% CaCl_2 ; PNAFCC³ Ref.3: Pinus spp in natura com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5% CaCl_2 .

dos valores determinados para a maior resistência determinada com os compósitos de Referência aos 91 dias de idade (Ref. 3).

O modelo que expressa a dependência da resistência à compressão do compósito aos 91 dias, em função dos teores de substituição do cimento por RCC, de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e de aditivo superplastificante é apresentada na equação 5.

$$RC\ 91d = 27,425 + 25,092 / [RCC]^{1/3} - 7,0138 \times \text{Exp}(-[CaCl2]) + 1,9691 / [\text{Superplast}]^2 \quad (5)$$

O modelo apresentou forte correlação ($R = 0,9327$, $R^2 = 0,8700$ e $R^2_{\text{Ajust}} = 0,8660$), o que indica que os dados experimentais estão muito bem ajustados pela superfície de resposta. A confiabilidade do modelo, calculada com base na sua significância ($1,1 \times 10^{-17}$), é superior a 99,99%.

Na figura 3 está apresentada a superfície de resposta da RC 91d, do compósito com substituição parcial do cimento Portland CPV ARI RS, em função do teor de substituição por RCC e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, conforme modelo determinado pela análise multivariada.

A superfície de resposta demonstra que a RC 91d do compósito decresce significativamente para teores de RCC acima de 5% e aumenta em função do acréscimo dos teores de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e do aditivo superplastificante, conforme análise numérica da equação nº 5.

Procedendo a otimização da função, dentro dos limites impostos pelas condições de produção do compósito, resulta na seguinte composição: cimento = 95%, RCC = 5%, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = 4,5% e superplastificante = 0,5%. A expectativa de resistência à compressão para esta

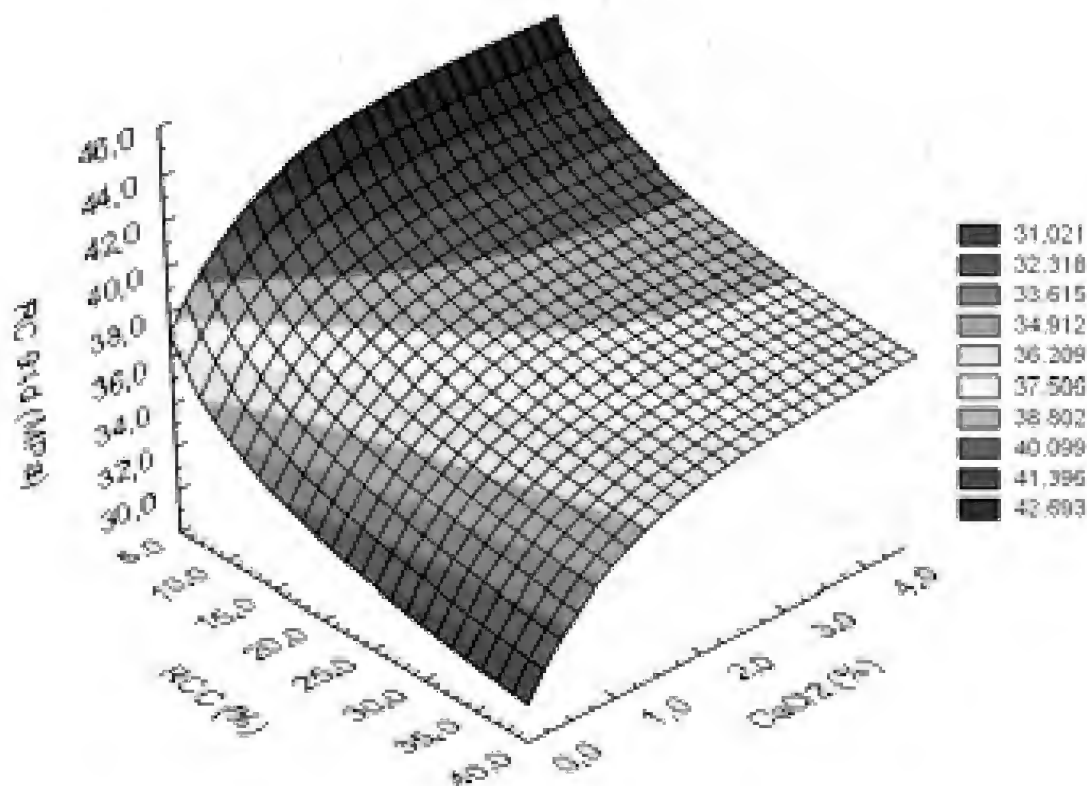


Figura 3. Variação da resistência à compressão aos 91 dias de idade em função da substituição parcial do cimento Portland por RCC e do teor de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

composição otimizada, aos 91 dias de idade, determinada pelo modelo é de 49,8974 MPa.

Análise dos Compósitos com Substituições Parciais do Cimento Portland Otimizadas

Com a finalidade de comprovar as expectativas de RC 91d e de determinar as demais características físicas e mecânicas dos compósitos cimento-madeira, produzidos com o resíduo de *Pinus spp* e com as substituições parciais do cimento Portland, procedeu-se a produção e teste dos compósitos.

Na tabela 3 estão apresentadas as características físicas dos compósitos produzidos com as substituições parciais otimizadas do cimento Portland por MC e RCC, e dos compósitos de referência.

Os resultados demonstram que tanto a massa específica, quanto o índice de vazios e a absorção de água, apresentaram diferenças significativas entre si, a 95% de confiança. A substituição parcial do cimento Portland por metacaulim e RCC, apesar da grande finura desses materiais, não contribuiu para alterações importantes das características físicas dos compósitos.

Na tabela 4 estão apresentadas as características mecânicas dos compósitos produzidos com as substituições parciais otimizadas do cimento Portland por MC e RCC, e dos compósitos de referência.

Foram constatadas diferenças estatísticas significativas entre os resultados obtidos para RC e RT, entre os compósitos com substituições parciais do cimento Portland e os compósitos de Referência, em todas as idades.

A RC 91d determinada para o compósito otimizado com MC (45,34MPa) apresentou valor médio 0,57% superior ao previsto pelo modelo estatístico enquanto, a RC 91d média, determinada com o compósito otimizado com RCC, ficou 11,96% abaixo da previsão.

Observando-se os valores de RC, pode-se notar a evolução das resistências dos compósitos com substituições parciais do cimento por MC e RCC ao longo do tempo, sendo significativa às diferenças aos 91 dias de idade entre estes e os compósitos de Referência 1 e 2, não havendo diferenças significativas em relação a RC da Ref 3. Os menores valores de resistência à compressão, em todas as idades, foram obtidos para o compósito produzido com 100% de cimento Portland e com o resíduo de *Pinus in natura*.

A análise da evolução da RC dos compósitos com a idade (Figura 4), verifica-se uma tendência de crescimento maior das resistências à compressão dos compósitos com substituição parcial do cimento Portland pelo MC e RCC, em comparação aos compósitos de Referência (com 100% de cimento Portland) a partir dos 28 dias de idade.

Quanto à resistência à tração determinada aos 28 dias de idade, cujos valores são, também, apresentados na tabela 4, verifica-se:

Quanto aos resultados de resistência à tração aos 28 dias apresentados na tabela 4, constata-se que houve diferenças estatísticas significativas entre os valores obtidos para os compósitos com substituição parcial do cimento Portland por MC e RCC e os compósitos de Referência.

Tabela 3. Compósitos com resíduo de *Pinus* spp. e substituições parciais do cimento Portland por metacaulim e RCC – Características físicas.

Compósito	ME	CV	IV	CV	ABS	CV
	(kgf/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
PN ¹	1.471 C	0,45	38,98 A	0,74	26,49 B	0,79
PNCC ²	1.594 A	0,62	36,29 BC	1,15	22,77 D	3,04
PNAFCC ³	1.503 B	0,88	35,77 C	0,81	23,79 C	1,61
MC 10%	1.492 B	0,54	34,47 C	0,71	23,10 BC	1,15
RCC 5%	1.469 C	0,95	39,09 A	1,62	26,60 A	2,38

Tabela 4. Compósitos com resíduo de *Pinus* e substituições parciais do cimento Portland por metacaulim e RCC – Características mecânicas.

Compósito	Resistência à compressão - RC (MPa)						Resistência à tração	
	RC 7d		RC 28d		RC 91d		RT (MPa)	
	CV (%)	RC (%)	CV (%)	RC (%)	CV (%)	RC (%)	RT 28d	CV (%)
PN ¹	20,01D	4,99	24,59D	1,29	28,97D	5,68	1,95E	2,33
PNCC ²	32,57B	1,90	38,64B	3,60	39,82C	5,46	2,57D	2,63
PNAFCC ³	34,73A	2,48	42,72A	2,69	43,91B	1,21	2,67D	2,13
MC 10%	32,86 B	5,04	39,02 B	4,23	45,34 A	1,80	3,93 A	5,27
RCC 5%	31,52 B	4,66	37,45 B	2,99	43,93 A	2,73	4,06 A	3,86

Letras diferentes denotam diferenças estatísticas entre as médias nas colunas ao nível de 95% de confiança; ME: massa específica; CV: coeficiente de variação; IV: índice de vazios; ABS: absorção; PN¹ Ref.1: *Pinus* spp in natura; PNCC² Ref.2: *Pinus* spp in natura + 4,5% CaCl₂; PNAFCC³ Ref.3: *Pinus* spp in natura com 48 horas de tratamento em água fria + 4,5% CaCl₂; MC: Metacaulim; RCCF: Resíduo de cerâmica calcinada.

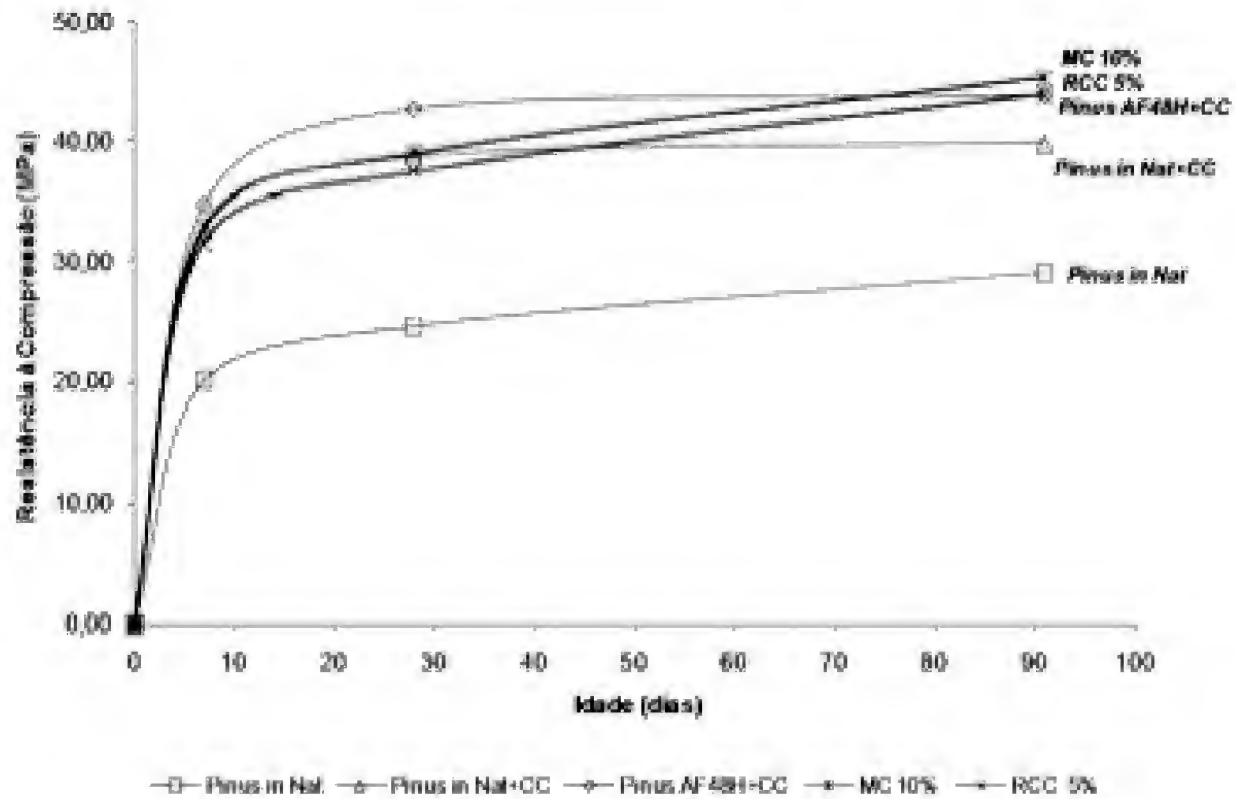


Figura 4. Compósitos com resíduo de *Pinus* spp. e substituições parciais do cimento Portland – evolução da resistência à compressão com a idade.

O compósito produzido com substituição parcial do cimento Portland por 10% de MC apresentou valor de resistência à tração aos 28 dias de idade (RT 28d) de 3,93 MPa, sendo este valor 101,54% maior que o valor obtido para a Ref 1,

52,92% maior que a Ref 2 e 52,06% maior que a Ref 3.

Quanto a substituição parcial por 5% de RCC, o valor de resistência à tração aos 28 dias de idade de 4,06 MPa, foi 108,21%

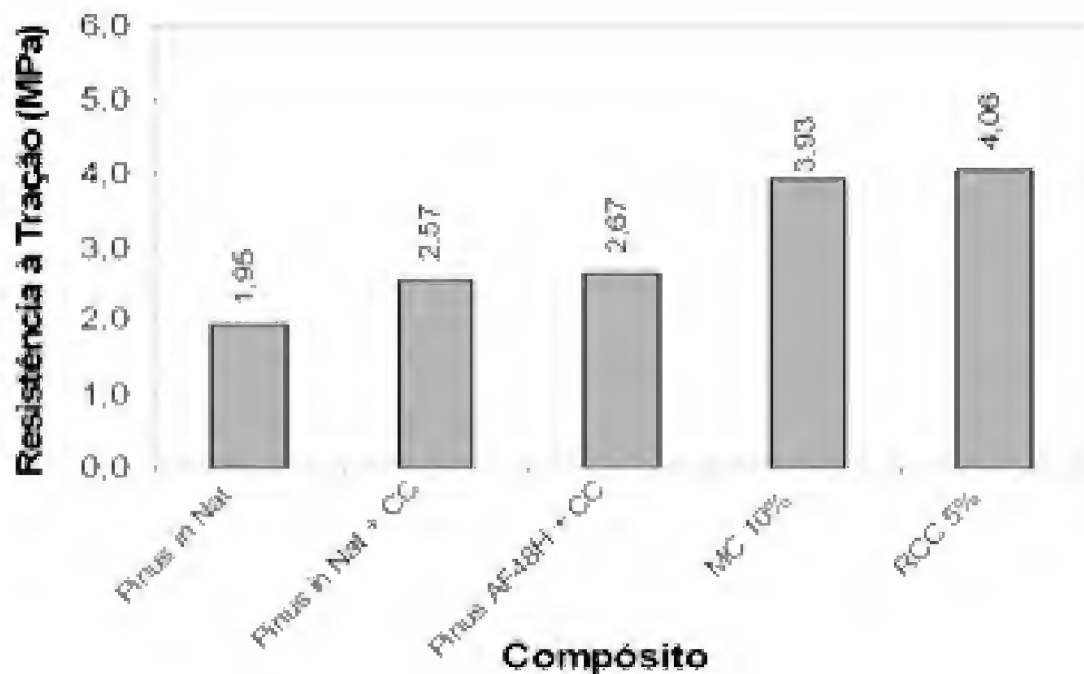


Figura 5. Compósitos com resíduo de *Pinus* e substituições parciais do cimento Portland – resistência à tração.

maior que a obtida para a Ref 1, 57,98% maior que a Ref 2 e 52,06% maior que os valores determinados para a Ref 3; Na figura 5, encontra-se ilustrada a comparação entre os valores determinados para a resistência à tração, obtida através de ensaios de compressão diametral dos corpos-de-prova, na idade de 28 dias.

Nas figuras 4 e 5 pode-se observar que a melhora das características mecânicas dos compósitos se deve a uma sinergia entre os diversos materiais utilizados nas suas composições. A extração de parte dos carboidratos do resíduo de *Pinus spp*, que a princípio não têm característica de material resistente, com um simples pré-tratamento com água fria, proporciona uma melhor interação com o cimento Portland e confere um ganho tanto das resistências à compressão quanto à tração do material.

Este fato também é verificado pela utilização do $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ como aditivo acelerador de pega do cimento e principalmente quanto a substituição parcial do cimento Portland por 10% de MC e 5% de RCC, utilizadas com auxílio de aditivo superplastificante, de forma a manter inalterada a consistência do compósito no estado fresco sem a necessidade de adicionar mais água para sua produção, o que, sem dúvidas, traria consequências negativas às resistências do material.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

A utilização do resíduo de *Pinus spp.* com $D_{\text{máx}} = 4,8$ mm é tecnicamente viável;

A utilização de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ como aditivo acelerador de pega propiciou ganhos significativos de resistência dos

compósitos com 100% de cimento Portland;

A utilização de pré-tratamento, tipo extração em água fria por 48 horas (AF-48H), propiciou aumentos significativos da resistência à compressão dos compósitos quando comparados aos compósitos com resíduo de *Pinus spp* sem tratamento;

O teor ótimo de substituição do cimento Portland por MC, determinado através de análise multivariada, foi de 10%, com 0% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 1,10% de aditivo superplastificante;

O teor ótimo de substituição do cimento Portland por RCC, também determinado através de análise multivariada, foi de 5%, com 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,5% de aditivo superplastificante;

Considerando as RC 91d determinadas com os compósitos de Referência, verifica-se a viabilidade de substituição do cimento Portland dos compósitos por até 30% de MC e 20% de RCC;

As características físicas dos compósitos produzidos com substituições parciais de sílica ativa e metacaulim, pouco diferiram das características dos compósitos de Referência;

Os compósitos produzidos com substituições parciais otimizadas do cimento Portland por MC e RCC, apresentaram resistências à compressão aos 91 dias de idade, e a tração, aos 28 dias de idade, superiores aos compósitos de Referência, produzidos com 100% de cimento Portland;

Fica evidente o ganho de qualidade, em termos das características físicas do compósito, devido à sinergia existente entre os materiais componentes, principalmente no que tange a utilização das

substituições ao cimento Portland, no caso o MC e o RCC, bem como o uso do aditivo superplastificante, essencial para manter inalterada a consistência do compósito no estado fresco;

Nos compósitos produzidos com MC verificaram-se problemas com o uso concomitante de teores acima de 3% do aditivo acelerador de pega e 4% de aditivo superplastificante, principalmente no que tange ao aparecimento de macroporos nos compósitos, durante as operações de moldagem.

REFERÊNCIAS

- Ângulo, S.C., Zordan, S.E., John, V.M. 2001. Desenvolvimento sustentável e reciclagem de resíduos na construção civil. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclado e suas Aplicações. CT206. IBRACON. Anais. São Paulo. p. 45-56.
- ABCERAM - Associação Brasileira de Cerâmica. Cerâmica no Brasil – Números do Setor. Documento disponível em www.abeceram.org.br. Acesso em 15/09/2008.
- ABIMCI - Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. Estudo Setorial 2008. Documento disponível em www.abimci.com.br. Acesso em 25/09/2009.
- ABNT - NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).
- ABNT - NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT - NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT - NBR 9479: Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT - NBR 9778: Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT - NBR 12653: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.
- Carmo, J.B.M. 2006. Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face a resistência mecânica e a viabilidade econômica. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 136 p.
- DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. Relatório sobre a oferta mundial e produção nacional de metacaulim no ano 2007. Documento disponível em www.dnpm.gov.br. Acesso em 29/06/2008.
- Freitas, L.C. 2000. A baixa produtividade e o desperdício no processo de beneficiamento da madeira: Um estudo de caso. Florianópolis. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 120p.
- Gonçalves, J.P., R.D. Toledo Filho y E.M.R. Fairbairn. 2006. Estudo de hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. Ambiente Construído, 6(4):83-94.

- Isaia, G.C. 2005. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. 2v. IBRACON, São Paulo. 1.600 .
- Iwakiri, S. 2005. Painéis de madeira reconstituída. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná-FUPEF. Curitiba. 247 p.
- John, V.M. y V. Agopyan. 1993. Materiais reforçados com fibras vegetais. In: Simpósio Internacional de Materiais Reforçados com Fibras para a Construção Civil. Anais. EPUSP, São Paulo. p. 29-38.
- Lange, H., M.H. Simatupang y A. Neubauer. 1989. Influence of latent hydraulic binders on the properties of wood-cement composites. In: 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. Forest Products Research Society. USA. Proceedings. p. 48-52.
- Lima, A.F., E.R.P. Jará y V.A. Alfonso. 1988. Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica. In: Celulose e Palpel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2^a ed. São Paulo. p. 129-167.
- Mehta, P.K. y P.J.M. Monteiro. 2008. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo. Ed. Ibracon. 674 p.
- Mendes, S.E.S. 2002. Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba. Curitiba, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 146 p.
- Morais, S.A.L., E.A. Nascimento y D.C. Melo. 2005. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* Parte I – Estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. Revista Árvore, Viçosa, 29(3):461-470.
- Moslemi. A. A. 1989. Wood-cement panel products: coming of age. In: 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. Forest Products Research Society. Proceedings, USA. p. 12-18.
- Nahuz, M.A.R. 2004. Atividades industriais com madeiras de Pinus – Atualidades e desafios. Revista da Madeira, 83:10-12.
- Neville, A.M. 1997. Propriedades do concreto. 2^a ed. Ed. PINI, São Paulo. 738 p.
- Oliveira, C.T.A. 2000. Água do poro de pastas de cimento de escória. São Paulo, Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 162 p.
- Pinto, T.P. 1997. Reciclagem de resíduos da construção urbana no Brasil – Situação atual. In: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. Anais. EPUSP/ANTAC. São Paulo. p. 156-170.
- Rocha, G.G.N. y W.L. Vasconcelos. 2006. Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. Concreto e Construções, n. 42. Ed. Ibracon. p. 98-116.
- Ruy, V.A. 2004. Estudo da qualidade dos blocos cerâmicos produzidos pelas olarias da região metropolitana de Curitiba – Avaliação de três empresas selecionadas. Curitiba,

- Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. 78 p.
- Semple, K.E. y P.D. Evans. 2004. Wood-cement composites – Suitability of Western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas. Rural Industries Research and Development Corporation. Kingston ACT. 64 p.
- Zampieri, V.A. 1989, Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas. São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 191 p.

Recibido el: 05 de mayo de 2010
Aceptado el: 03 de febrero de 2011

Este documento se debe citar como: Miranda de Lima, A.J., S. Iwakiri y M.G. Lomelí-Ramírez. Utilização de resíduos de *Pinus* spp., metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira. *Madera y Bosques* 17(2):47-65.

Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México

Feasibility of generating electricity through gasification of sawmill residues in the North of Mexico

Salvador Balderrama-Castañeda¹, Concepción Luján-Álvarez²,
David K. Lewis³, Juan A. Ortega-Gutiérrez¹,
Bernardus H.J. de Jong⁴ y Tonatiuh Nájera-Ruiz⁵

RESUMEN

Se evaluó la factibilidad de generar energía eléctrica a partir del uso de residuos del aserrío mediante la tecnología de gasificación en dos aserraderos ejidales, Rocheachi (RO) y Tatahuichi (TA), en el municipio de Guachochi, Chihuahua. El área se ubica en un clima semifrío, con medias anuales de temperatura y precipitación de 10,6 °C y 800 mm, respectivamente; la vegetación está constituida por bosque de pino y pino-encino; las especies maderables son principalmente *Pinus arizonica* y *P. durangensis*. Se caracterizó el flujo de residuos, su composición química y su valor energético. Se seleccionó la tecnología de gasificación de cama fija con flujo hacia abajo con costos y especificaciones de un proveedor chino. Se asumió una conversión bioenergética de 1,3 kgMS/kWh y un factor de planta de 80%; el uso total de la electricidad sería alumbrado público municipal al 80% del costo de la tarifa normal. Se evaluó la viabilidad financiera de sistemas con capacidades a (100, 200, 400 y 800) kW bajo tres escenarios: base, optimista y pesimista. Se valoró el efecto de ingresos adicionales por venta de bonos de carbono en el mercado voluntario a (4, 5 y 6) US\$/tCO₂. La tasa interna de retorno (TIR) se incrementó consistentemente con la capacidad del sistema; el sistema a 800kW tuvo la mejor perspectiva económica. Los resultados fueron negativos y positivos en todos los escenarios para las capacidades de 100 kW y 800 kW, respectivamente. Sin bonos de carbono, la rentabilidad privada solo resulta aceptable (13%) en el sistema a 800kW en un escenario optimista. El impacto de los bonos se reflejó en incrementos en la TIR de 1,1 a 1,6% en el sistema de 400 kW y de 2,3 a 2,9% en el de 800 kW. Bajo estas condiciones, los sistemas evaluados reunirían los requisitos de adicionalidad que demanda el mercado del carbono.

PALABRAS CLAVE:

Energía eléctrica, residuos de aserrío, gasificación, factibilidad.

- 1 UACH, Facultad de Zootecnia y Ecología, Km. 1 Perif. F.R. Almada s/n, Chihuahua. CP 31453. c.e.: sbalderr@uach.mx,
- 2 UACH. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km. 2.5 Carretera Delicias-Rosales, Delicias, Chihuahua, Mex. CP 33000. c.e.: clujan@uach.mx
- 3 Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- 4 El Colegio de la Frontera Sur, Villahermosa, Tabasco, México.
- 5 SolBridge International School of Business. Daejeon, Corea del Sur.

ABSTRACT

The feasibility of converting sawmill residues in electricity through gasification was evaluated in two ejido sawmills, Rocheachi and Tatahuichi, in the Guachochi municipality of Chihuahua State. The area has a semi cold climate, with temperature and precipitation annual means of 10,6 °C and 800 mm, respectively; the tree cover is dominated by pine and pine-oak communities with *Pinus arizonica* and *P. duranguensis* being the main species used for logging. The residues flow was estimated and its chemical composition and heating value characterized. The selected technology was the fixed bed downdraft gasifier; the costs and specifications data were provided by a Chinese supplier. The main assumptions were: 1,3 kgDM/kWh, 80% plant factor, electricity output sold for street lighting at 80% of commercial price. The financial viability was evaluated through the configuration of (100, 200, 400 and 800) kW systems and three scenarios: base, optimistic and pessimistic. The effect of additional revenues from carbon credits sold at the voluntary market at 4, 5 and 6 US\$/tCO₂ was assessed. The internal rate of return (IRR) increased consistently with increasing the systems' capacity with the 800kW being the most economically attractive. Without carbon credits, the 100 kW system showed no positive values at any scenario whereas the 800 kW system was the only one with positive IRR in all the scenarios with a range of 3% to 13%; the additional revenues from carbon credits added 2,3 and 2,9% to the low and high scenarios, respectively. In the context of the study, the systems evaluated would satisfy the additionality criteria required by the carbon market.

KEYWORDS:

Electric energy, sawmill residues, gasification, feasibility.

INTRODUCCIÓN

Los residuos de la industria de la madera son considerables en los países en desarrollo, por lo cual sugieren un alto potencial para la generación de energía (Tomaselli, 2007). En la actualidad, la energía de la madera es competitiva en el

mercado, particularmente cuando se origina como residuo de la industria del procesamiento de la madera.

En México, los recursos bioenergéticos potenciales representan entre 54% y 81% de la oferta interna bruta de energía primaria y 10 veces su uso actual (Maser y Fuentes, 2006). En forma específica, la cantidad de subproductos de la extracción forestal y la industria maderera con potencial energético serían del orden de 3,6 millones de toneladas (peso seco)/año, equivalentes a 71 PJ/año (Ghilardi *et al.*, 2006). Esto corresponde a 2,3% de los recursos de biomasa del país.

Las emisiones totales de México ascienden a 643 millones de toneladas de CO₂e/año (INE, 2006). El uso de la bioenergía contenida en los residuos de industrias como los aserraderos, tiene potencial para contrarrestar emisiones de CO₂ de otros sectores, entre ellos el de uso del suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUSS), el cual contribuye con 90 millones de toneladas de CO₂e.

Juárez *et al.* (2003) señalaron que en el estado de Chihuahua había un total de 335 aserraderos con una capacidad anual de 1,58 millones de m³/año. El potencial bruto de residuos generados por esta industria podría estar entre los (475 a 630) millones de m³/año, si se asume, con base en datos de Orta y Juárez (2000) y FAO (1990), que la eficiencia de conversión de trocería a productos primarios y secundarios se encuentra entre 60% y 70%.

La disposición de los residuos del asierre, que por décadas se ha tenido en los aserraderos de Chihuahua, ha sido de forma descontrolada en la mayoría de los casos. Aunque localmente no existen datos concretos sobre la contaminación de los aserraderos, entre los impactos

ambientales negativos se encuentra el arrastre a las corrientes de agua de lixiviados tóxicos, como el ácido tánico o taninos y material en partículas finas (EPA, 1999; Saha y Kaviraj, 1996; Brewer *et al.*, 2001). Otro impacto negativo son las emisiones de gases con efecto de invernadero por la descomposición anaerobia y la combustión incompleta que ocurren en la disposición de residuos comúnmente realizada en los aserraderos.

En términos de conversión energética de biomasa a electricidad, destaca el desarrollo tecnológico y comercial que ha tenido la gasificación, debido a su flexibilidad y relativamente alta eficiencia con respecto a las tradicionales por combustión (FAO, 2008). La tecnología de gasificación es actualmente la opción más apropiada para proveer de electricidad en sistemas pequeños, a comunidades y pequeñas industrias (Abe *et al.*, 2007). Los sistemas de gasificación, además de ser más eficientes, son más baratos, sus refacciones tienen mayor disponibilidad y las reparaciones se puede realizar *in situ* (Knoef, 2000).

En México, la tecnología de gasificación se encuentra aún en la primera fase de estudio, con el primer laboratorio en vías de implantación en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Aguillón, 2007; comunicación personal). El rezago tecnológico de México en materia de gasificación se atribuye en gran medida a la dependencia de los combustibles fósiles para satisfacer la demanda de energía. No obstante, en México no existen políticas públicas orientadas hacia el aprovechamiento de la bioenergía, ni un marco jurídico específico o incentivos fiscales particulares (De Buen y Aguillón, 2006).

Además de beneficios ambientales a nivel global y regional, el uso de biomasa, como fuente de energía renovable, tiene

impactos positivos locales en la generación de empleo, una necesidad igualmente crítica para el desarrollo sustentable de las comunidades serranas.

OBJETIVOS

1. Evaluar la viabilidad técnica, económica y financiera de sistemas de generación de electricidad a partir de los residuos en los aserraderos ejidales Rocheachi y Tatahuichi, municipio de Guachochi, en la alta Sierra Tarahumara, estado de Chihuahua, México.
2. Evaluar los beneficios económicos de los sistemas de generación de energía considerados en el estudio, derivados de una posible participación en el mercado de bonos de carbono.

METODOLOGÍA

Área de estudio

Los aserraderos ejidales Rocheachi y Tatahuichi, unidades objeto de estudio, se ubican en el municipio de Guachochi, al suroeste del estado de Chihuahua, a una distancia media de 350 km de la ciudad de Chihuahua, mediante los enlaces carreteros Chihuahua-Cuauhtémoc-Guachochi y Chihuahua-Parral-Guachochi (Figura 1).

En 2005, los ejidos Rocheachi y Tatahuichi contaban con poblaciones de 1799 y 1154 habitantes y 759 y 289 beneficiarios, respectivamente. La población se encuentra dispersa en alrededor de 30 localidades en cada ejido. Las localidades donde se ubican los aserraderos son Rocheachi (Rocheachi) y Hueleybo (Tatahuichi); según el Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED, 2008), estas comunidades tenían en 2000 una población de 681 y 191 habi-

tantes; 14% y 18% eran derechohabientes de los sistemas de salud IMSS e ISSSTE; su escolaridad promedio es de 6,9 y 5,1 años y su analfabetismo de 7% y 11%, respectivamente. La primera se encuentra totalmente electrificada, mientras que la segunda se encuentra en proceso de electrificación y el aserradero se ha autoabastecido de energía por medio de planta generadora a diesel.

El clima del área es templado húmedo, clasificado como C(E)W₂(x), dentro del subgrupo de climas semifríos "C(E)" (García, 1990). La temperatura media anual es 10,6 °C, con extremas de -13,2 °C y 31,5 °C; se tiene un periodo de heladas de 217 días. La precipitación media anual en la cuenca (Región Hidrológica 10 – Sinaloa) es de 803 mm; la temperatura media oscila entre (5 y 12) °C. La vegetación está constituida por bosque de pino y bosque de pino-encino; en el primero predomina *Pinus arizonica* y *P. durangensis*. Entre las no pináceas destacan *Quercus rugosa*, *Q. sideroxylla* y *Juniperus deppeana*.

Evaluación técnica

Características de los aserraderos

Los aserraderos del estudio, Rocheachi y Tatahuichi, son similares en cuanto a su infraestructura y orientación de mercado; la tabla producida en el asierre primario se vende sin clasificar a madererías y les provee la mayor parte de sus ingresos. En 2006, los productos del asierre primario y secundario en Rocheachi y Tatahuichi, totalizaron 6 600 y 2 521 m³, respectivamente (Tabla 1).

Flujos de residuos combustibles

Se identificaron las unidades, su equipamiento, sus insumos y productos y el uso de la superficie en la zona del aserradero. Se tomaron muestras de aserrín y se determinó el contenido de humedad conforme a la metodología descrita por la American Society for Testing Methods (ASTM) en la norma E 872-82. Con la colaboración del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Cimav), se realizó un análisis elemental (C,H,O,N,S) en muestras de

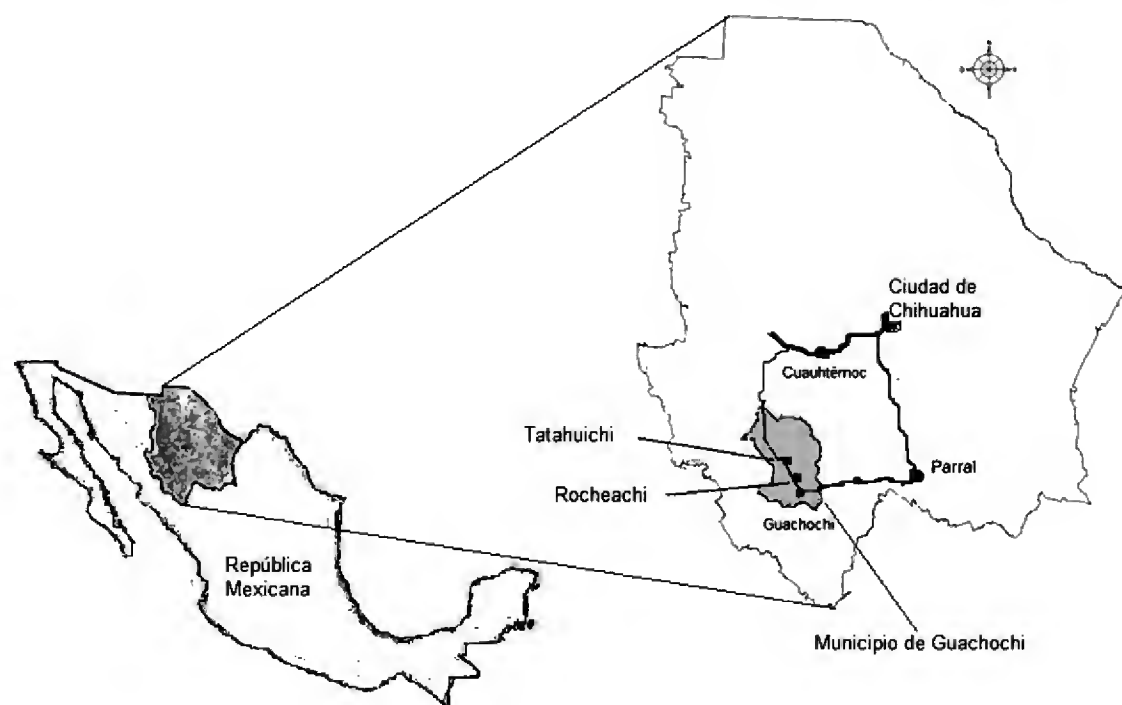


Figura 1. Localización del área de estudio: ejidos forestales Tatahuichi y Rocheachi, municipio de Guachochi, Chihuahua.

Tabla 1. Características técnicas de los aserraderos Tatahuichi y Rocheachi.

	<i>Rocheachi</i>	<i>Tatahuichi</i>
<i>Superficie total</i>	30 000 m ²	25,000 m ²
<i>Infraestructura</i>	1 aserradero principal 2 aserraderos diámetros menores Taller de secundarios (palilleras, tableteras)	1 aserradero principal 1 aserradero diámetros menores Taller de secundarios 1 astilladora 1 descortezadora (sin instalar)
Operadores en asierre primario	39	38
Operadores en asierre secundario	39	Sin datos
Fuente de electricidad	Red CFE	Motor diesel (en proceso de conexión a red CFE)
Tiempo en operación (años)	36	39
Capacidad de asierre diario (pie tabla)	9 000	9 000
Asierre total en 2006 (m ³) 1/	6 600	2 521

1/ Incluye primarios (tabla) y secundarios (reja, palillo, tarima y polín)

aserrín y corteza, y un Escaneado Diferencial Calorimétrico (DSC-TGA) (Price, 2006), a través del cual se determinó el contenido de compuestos orgánicos volátiles y carbono fijo en muestras de aserrín, con y sin corteza.

El valor energético superior (VES) en MJ/kg, se estimó con los resultados del análisis elemental, según la ecuación propuesta por Meraz *et al.* (2003) que expresa la aportación energética de los elementos carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre en función de su contenido porcentual en la biomasa, en base seca, de la siguiente manera:

$$\text{VES} = (1 - (\%H_2O/100))(-0,3708(\%C) - 1,1124(\%H) + 0,1391(\%O) - 0,3178(\%N) - 0,1391(\%S))$$

El coeficiente de asierre se estimó con base en muestras parciales, no estandarizadas, de trozas de diferentes diámetros en el asierre primario y de pedacería en secundarios como se muestra en la tabla 2. Los valores obtenidos se validaron por comparación con los de la literatura especializada.

Selección de la tecnología

A través de internet se recopiló información técnica y de costos sobre la tecnología de gasificación en sistemas a pequeña escala. Se estableció contacto con proveedores de China, Alemania y Estados Unidos. Los criterios más importantes considerados fueron el costo del equipo por kilowatt y la oferta de servicios adicionales para la instalación y arranque de una planta de gasificación.

Tabla 2. Muestras de aserrío realizadas en los aserraderos del estudio para estimar el coeficiente de aserrío

	<i>Cantidad</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Variables medidas</i>
ROCHEACHI			
Trozas	31	2,391/	Volumen aserrín y pedacería
Trozas	15	5,891/	Volumen nominal de tabla
Trozas	15	3,461/	Volumen de aserrín
Pedacería mayor	751 kg	--	Recuperación en kg de tableta, aserrín y pedacería
Tiras desorillado	460 kg	--	Recuperación en kg de palillo, aserrín y pedacería
TATAHUICHI			
Trozas	5	1,332/	Recuperación en kg de tabla, pedacería mayor, recortes y aserrín
Trozas	30	5,762/	Volumen y contenido de humedad de aserrín

La tecnología seleccionada para este estudio fue la de flujo hacia abajo de cama fija (downdraft fix bed), por ser la que produce menor cantidad de residuos de alquitrán. Las fases mayores del proceso se muestran en la figura 2.

Emisiones evitadas

La cantidad de carbono fósil sustituido por efecto de la generación de electricidad por medio de energía renovable se calculó conforme a lo siguiente:

Cantidad anual neta de energía
producida (CANEP) = Cantidad total
de electricidad producida – factor de
consumo interno (5%).

CO_2 sustituido = (CANEP (kWh) * Factor
de emisión para planta termoeléctrica a
gas (0,6 tCO₂/MWh)) - emisiones
del proceso (EP).

Las EP tuvieron los siguientes componentes:

1. emisiones de CO₂ por vehículos de transporte estimados por los factores

de emisión de 2,35 kgCO₂/l para gasolina y de 2,69 kgCO₂/l para diesel (EIA).

2. emisiones de CO₂e durante la instalación del sistema. Incluyen transporte aéreo, terrestre y electricidad. Para el transporte aéreo se consideró el factor de emisión de 0,110 kgCO₂/km/persona (Clean Air Conservancy, 2008).

El valor de los bonos de carbono fue asignado conservadoramente, según conceptos y rangos de precios para el mercado voluntario encontrados en informes recientes del mercado internacional de carbono (Kollmuss *et al.*, 2008; Capoor y Ambrosi, 2007).

Análisis económico y financiero

Los principales supuestos técnicos del sistema para el análisis económico se presentan en la tabla 3. La tecnología propuesta a utilizar es la gasificación de biomasa, con gasificador de tipo cama fija y flujo hacia abajo (fixed bed downdraft).

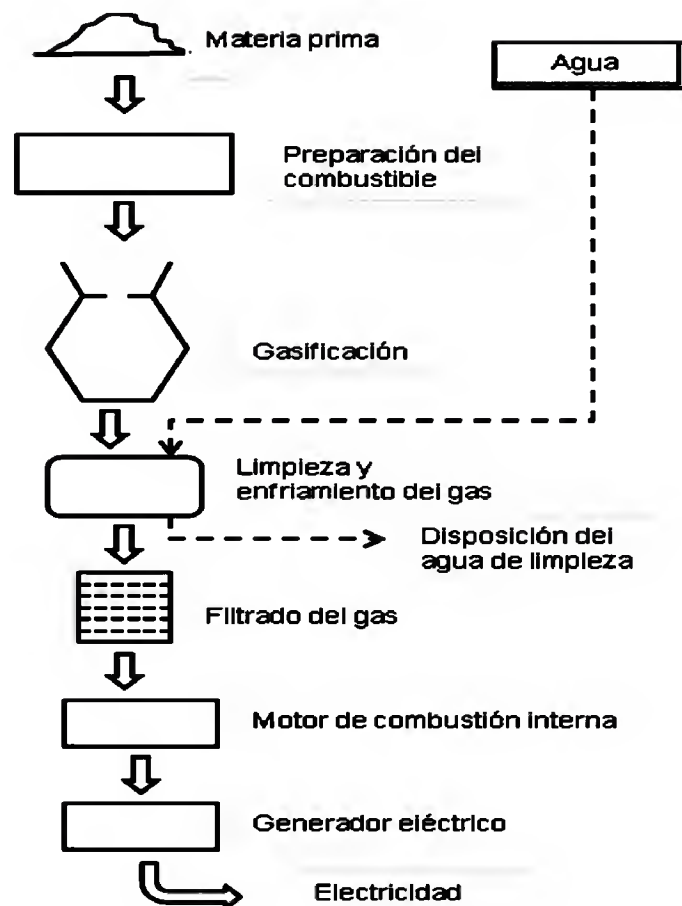


Figura 2. Secuencia de los principales procesos de la tecnología de gasificación seleccionada para el estudio.

Tabla 3. Principales variables y valores utilizados en el estudio.

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>
Factor de planta	80%
Días laborados/año	335
Horas/día	24
Conversión de biomasa a electricidad (kg MS/kWh)	1,3
Contenido de humedad de la biomasa combustible (b.h.)	15-20%
Consumo interno de electricidad por el sistema	5%
Residuos sólidos (carbón, cenizas)	6%
Residuos de alquitrán y partículas	<20mg/m ³
Consumo de agua	6 m ³ /100kW
Rango de superficie ocupada por instalaciones	924-5,280 m ²
Tarifa CFE base para ingresos por ventas	80% de 5-A
Precio de venta de energía eléctrica en año 1	\$MX 1,53
Incremento en la tarifa CFE por encima de la inflación	1,45%
Incremento anual en consumo municipal	4%
Impuestos (IVA, reparto de utilidades, otros)	47%
Tipo de cambio (MX\$/US\$)	11,05
Costo anual de financiamiento	9%
Tasa anual de descuento	5%

El material combustible proviene de residuos de asierre de trozas sin descortezar y consiste en astilla y aserrín comprimido, cuya preparación consideró el tamaño y contenido máximo de humedad especificados por el fabricante del equipo. El diseño de las instalaciones contempla un área de producción (gasificador, motor y generador), un área administrativa (oficina), espacios para reserva y secado de combustible y patio para descarga temporal de residuos.

Los costos de equipo, flete, instalación y características técnicas (vida útil, mantenimiento, generación de residuos) se basaron en el proveedor con la mejor oferta. Las necesidades de mano de obra, espacios para el trabajo operativo y administrativo, y equipo complementario, fueron estimadas con base en la literatura y la experiencia personal. Las necesidades de fuerza de trabajo se ajustaron en forma decreciente al incrementar la capacidad de los sistemas. La mano de obra incluyó las prestaciones de ley, incluyendo la distribución de utilidades.

Se elaboraron flujos de efectivo en hoja electrónica Excel para sistemas de generación de electricidad configurados a las capacidades de 100, 200, 400 y 800 kW. Se asumió que las necesidades de materia prima adicional, para los dos

sistemas mayores, podrían ser satisfechas mediante la compra a otros aserraderos en la zona. Debido a la ubicación geográfica de los aserraderos del estudio, se asumieron dos zonas de abastecimiento según radios de 10 y 50 km.

Los indicadores financieros fueron el Valor Neto Actual (VNA), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la TREMA. La viabilidad financiera de las diferentes capacidades de sistemas de generación de energía eléctrica se definió con base en lo siguiente:

$$\text{TREMA} = \text{TIE a 28 días} + 3 \text{ puntos}$$

donde:

TREMA = Tasa de Rentabilidad Mínima Aceptable,

TIE = Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio (vigente al día).

Se evaluó la sensibilidad de la TIR de las cuatro capacidades de sistema (100 kW, 200 kW, 400 kW y 800 kW) a la modificación de cinco variables principales; el análisis de sensibilidad contempló tres escenarios: base, optimista y pesimista (Tabla 4). Adicionalmente, se integró el efecto de los posibles ingresos adicionales por venta de bonos de carbono a tres valores, (4, 5 y 6) US\$/tCO₂.

Tabla 4. Configuración de los escenarios para el análisis de sensibilidad

<i>Variable</i>	<i>Escenario optimista</i>	<i>Escenario pesimista</i>	<i>Escenario intermedio</i>
Factor de carga	85%	75%	80%
Costo de la materia prima	-10%	+ 10%	0% cambio
Tarifa 5-A CFE (porcentaje por arriba de la inflación)	1,8%	1,1%	1,45
Costo equipo gasificación instalado	-5%	+ 5%	0% cambio
Costo del financiamiento	8%	10%	9%
Precio de créditos de carbono (US\$/tCO ₂ e)	6	4	5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Flujo y valor económico de los residuos combustibles

Los flujos de productos y residuos de los dos aserraderos se presentan en la tabla 5. Los valores encontrados para productos y subproductos estuvieron dentro de los rangos consignados por Juárez (2000), Orta y Juárez (2000) y Zavala y Hernández (2000), en estudios sobre coeficientes de asierre en México. La menor eficiencia en Tatahuichi se puede atribuir a un menor equipamiento para secundarios y al mayor deterioro de su equipo de asierre primario.

Valor económico de los residuos

La tabla 6 muestra una comparación entre los aserraderos del estudio en cuanto al uso y valor de sus residuos. Mientras que en Rocheachi, estos se quemaban, se regalaban o se vendían a

muy bajo precio, en Tatahuichi se obtenían beneficios económicos importantes. Desde hace dos años, este último ha estado descortezando las trozas y otros residuos y comercializando astilla y aserrín libres de corteza. Estos subproductos equivalen a 35% del volumen de trocería que ingresa a sus patios (Tabla 6). Se estimó que en el 2007, la venta de estos subproductos a la empresa Duraplay en Parral, Chihuahua, aportó a este aserradero arriba de 10% de sus ingresos totales. La demanda de residuos, particularmente descortezados, por parte de la industria de los tableros, ha abierto un mercado en esta zona del estado, lo que ha incrementado el valor de los residuos del aserradero considerados con potencial bioenergético. Por otro lado, en Tatahuichi no se tiene aún una forma de darle valor a la corteza, y su acumulación dispersa en los patios del aserradero resulta en un valor negativo; la maniobra para distribuirla en las zonas arboladas colindantes se estimó en \$40/t MS (Tabla 6).

Tabla 5. Productos y subproductos del asierre en los aserraderos Rocheachi y Tatahuichi en 2006.

<i>Producto</i>	<i>Rocheachi</i>		<i>Tatahuichi</i>	
	<i>m³</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>m³</i>	<i>Porcentaje</i>
Productos primarios	5 577	51,2	2 521 ^{1/}	56,0
Productos secundarios ^{2/}	1 023	9,4	—	—
Pedacería mayor	1 532	14,1	—	—
Pedacería menor, capote	873	8,0	—	—
Aserrín	1 541	14,2	521	11,6
Tabla cero ^{3/}	343	3,2	—	—
Astilla	—	—	1 054	23,4
Corteza	—	—	405	9,0
Volumen total aserrado	10 889	100	4 501	100

1/ Incluye productos primarios y secundarios.

2/ Incluye reja, palillo, tarima y polín.

3/ Tabla defectuosa de desecho.

Tabla 6. Cantidad potencial de residuos combustibles en los aserraderos del estudio y su valor económico.

Tipo de subproducto	t MS ^{1/}	Porcentaje	Valor (\$MX/t)	Uso
ROCHEACHI				
Tiras de desorillado	735	38,8	\$ 50	Colectado por fleteros de la comunidad; vendido a intermediarios de la industria
Pedacería menor con corteza	419	22,2	\$ 0,0	Leña, disposición por quema en húmedo
Aserrín	740	39,0	\$ 37	Venta <i>in situ</i> a la industria, quema
Suma	1 894	100,0		
TATAHUICHI				
Astilla	547	52,4	\$ 391	Venta <i>in situ</i> a la industria
Aserrín	302	29,0	\$ 57	Venta <i>in situ</i> a la industria
Corteza	194	18,6	-\$ 40	Acumulado en patio
Suma	1 044	100,0		

^{1/} Derivado de tabla 4; se asumió una gravedad específica en verde de 0,48 (USDA-FS, 1979).

Los compradores de los productos secundarios son, por lo general, intermediarios de nichos del mercado regional y nacional. Se estimó que en los talleres de secundarios se procesa de 9% a 15% del volumen de trocería que ingresa a los aserraderos de Rocheachi y Tatahuichi, respectivamente. En este último, el valor total de las ventas anuales de estos productos fue de alrededor de 18% en 2006.

Impactos ambientales de los sistemas de gasificación

La producción de gas limpio en los sistemas de gasificación de biomasa es actualmente uno de los objetivos más importantes de la investigación a nivel mundial (Kwant y Knoef, 2004). Los principales contaminantes son: polvo y partículas finas (soot), alquitranes, metales

alcalinos y gases ácidos y alcalinos (Good *et al.*, 2005). La disposición de los alquitranes podría ser mediante reciclado al gasificador o incinerado; otras formas de disposición son inaceptables (Maniatis, 2001). Según las especificaciones técnicas del sistema seleccionado, cama fija y flujo hacia abajo (fixed bed downdraft), de la firma Chongqing Welluck, los residuos de alquitrán y partículas son del orden de <20 mg/m³ de gas producido, el cual se considera de los más bajos en sistemas comerciales.

Análisis financiero

La TIR se incrementó consistentemente al incrementarse la capacidad del sistema. El sistema a 100 kW no mostró resultados positivos en la tasa interna de retorno (TIR) en ningún escenario y se excluye en la figura 3, donde aparecen los resultados

para los sistemas 200, 400 y 800 kW. Hubo una diferencia redondeada de 14 puntos de TIR entre los sistemas de 200 y 800 kW en el escenario intermedio y de 12 puntos en el optimista. Dentro de cada sistema, la TIR tuvo una variación de alrededor de 10 puntos entre el escenario optimista y el pesimista. El sistema a 800 kW fue el único que tuvo una TIR positiva en los tres escenarios. Los resultados muestran claramente el efecto de economía de escala, sin embargo, tal efecto fue no lineal, ya que al duplicar la capacidad de (200 a 400) kW la TIR se incrementa casi nueve veces, pero solamente 0.35 veces al duplicarse la capacidad de (400 a 800) kW.

El sistema a 800 kW, bajo el escenario optimista, es el único que satisface la TREMA de 10%. De este modo, es el sistema que podría potencialmente operar con autonomía financiera en las circunstancias más favorables. Debajo de esta capacidad, sería necesaria la participación de fondos externos al proyecto.

Créditos de carbono

Debido a su flexibilidad y menores costos de transacción, el mercado volun-

tario es actualmente la alternativa más accesible para pequeños proyectos en países en vías desarrollo. Estos son típicamente pequeños proyectos de generación de energía renovable. Para el presente estudio, el mercado voluntario se consideró la opción más viable; el precio considerado US\$ 5/tCO₂e se ubica en la parte baja del rango referido por Green Markets International (2007).

Al integrar al análisis financiero la posibilidad de obtener los bonos del mercado voluntario, correspondientes a la sustituciones estimadas de combustibles fósiles, se contemplaron escenarios para las capacidades mayores, (400 y 800) kW, por ser estas las que presentaron mejores perspectivas económicas (Figura 4). El impacto de los bonos se reflejó en incrementos en la TIR de 1,1% a 1,6% en el sistema de 400 kW y de 2,3% a 2,9% en el de 800 kW. Como puede apreciarse, en este último los bonos de carbono, en los tres niveles de precio considerados, incrementaron la TIR por arriba de 10%, establecido como la TREMA para el análisis. Debido a esto, un proyecto de generación de electricidad con biomasa, bajo las condiciones descritas en este

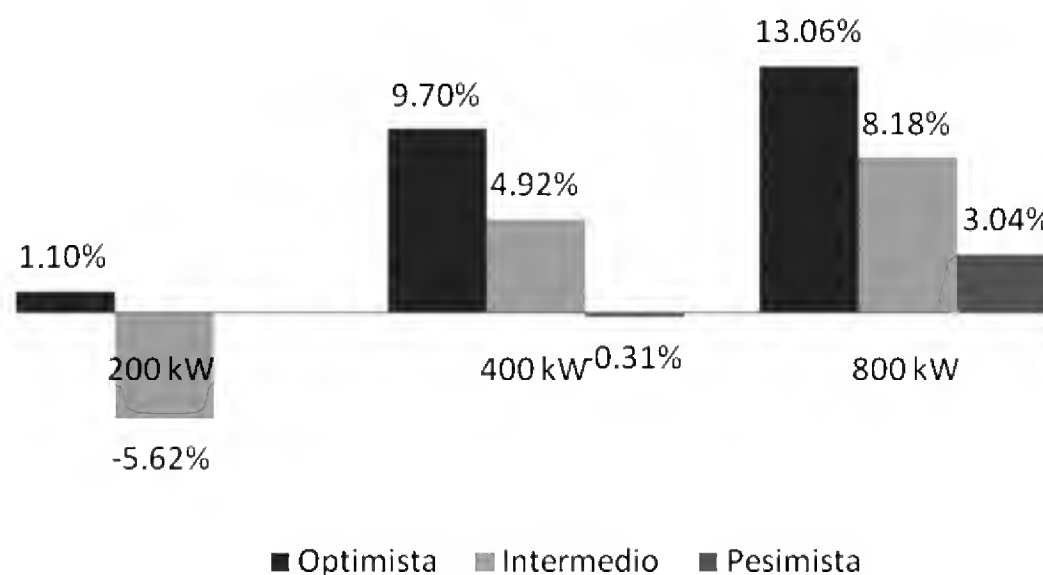


Figura 3. Valores de la TIR en tres escenarios y capacidades de sistema con al menos un valor mayor a cero.

estudio, cumpliría con el criterio de adicionalidad que se requiere en los Mecanismos de Desarrollo Limpio. Capacidades de 400 kW o menores requerirían contar, además de ingresos por bonos de carbono, de subsidios especiales, si su implementación es de carácter estratégico.

Otro indicador afectado favorablemente por los ingresos adicionales de la venta de bonos de carbono, es el tiempo para recuperar la inversión inicial. Nuevamente se tuvo un mayor impacto en los dos sistemas con mayor capacidad, (400 y 800) kW. En general, el tiempo para recuperar la inversión varió de 4,6 años en el sistema a 800 kW con bonos a 6 US\$/t CO₂, a más de 15 años en el sistema a 200 kW sin bonos de carbono. Dentro de cada sistema, el impacto de los ingresos adicionales por bonos de carbono tendió a incrementarse al pasar del escenario optimista al intermedio y al pesimista. En los dos sistemas mayores se observa una reducción máxima de 0,8 años en el escenario optimista a 1,7 y 2,5 años en los sistemas a (400 y 800) kW en el escenario pesimista.

Efecto de cada variable

La figura 5 muestra el efecto del cambio observado en la TIR por la variación en una unidad porcentual en las variables consideradas en los escenarios propuestos en este estudio. La variable más sensible fue sin duda el precio de venta; una variación de $\pm 1\%$ resultó con una oscilación de la TIR en 2,5 unidades porcentuales. Junto al precio de venta, las variables financiamiento y factor de planta son el grupo de variables con un segundo efecto más importante en la TIR. El costo de la materia prima mostró la menor sensibilidad de las cinco variables con alrededor de 0,1% de cambio por cada unidad porcentual de cambio.

El precio de venta se basó en la tarifa 5-A de la Comisión Federal de Electricidad para el alumbrado público. En los últimos 10 años esta tarifa se ha mantenido consistentemente entre 1 y 2 puntos porcentuales por arriba de la inflación. Este hecho refleja el sentido de la política oficial, tendiente a garantizar los resultados financieros positivos para el sector energético y es, por lo tanto, un aspecto que disminuye la incertidumbre natural en este tipo de proyectos.

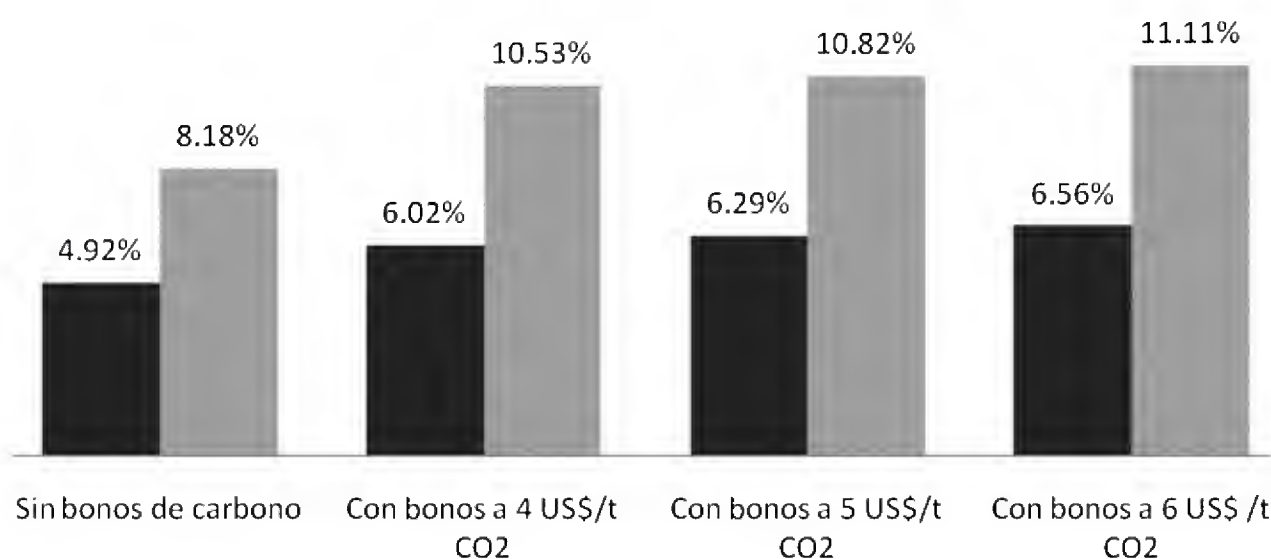


Figura 4. Tasa Interna de Retorno proyectada en el escenario intermedio para los sistemas de 400 y 800kW con y sin bonos de carbono.

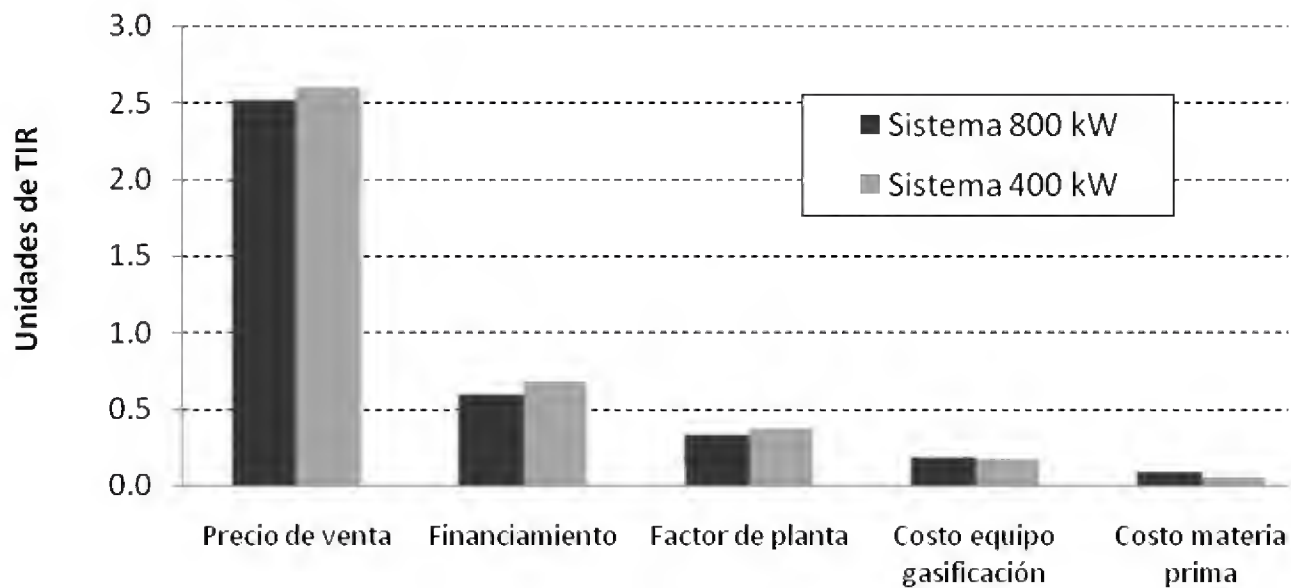


Figura 5. Oscilación entre los escenarios optimista y pesimista en unidades de TIR por cada unidad porcentual de cambio en las variables consideradas en el análisis de sensibilidad.

Costo de producción por kWh

Aunque en gran medida el contexto socioeconómico es un factor determinante de los costos de producción, este indicador permite comparar en qué medida la generación independiente de electricidad puede competir con otras fuentes de energía eléctrica. Los valores absolutos de los costos disminuyeron al incrementar las capacidades de los sistemas configurados. En cada uno de los tres escenarios simulados, los costos de la energía de la capacidad más baja (100 kW) fueron alrededor de 2,7 veces mayores que los de la más alta (800 kW) (Figura 6). Junginger *et al.* (2006), analizaron curvas de aprendizaje en plantas de cama fluidizada a nivel mundial y concluyeron que la economía de escala era el factor que mejor explicaba las reducciones de costos; los costos de electricidad disminuían entre 8% y 9% por cada duplicación de la producción de electricidad.

Faaij *et al.* (1998) compararon las opciones de biomasa y carbón en la generación de electricidad. El costo privado proyectado para 2005 fue de

€0,068 (US\$0,099) y 0,038/kWh (US\$0,099) (miliEuros/kWh) para biomasa y carbón, respectivamente. Sin embargo, si los daños externos y los beneficios cuantificados son incluidos, el rango de costos asciende a 53-70 mECU/kWh y 45-72 mECU/kWh para la biomasa y carbón, respectivamente fue de 1,4619.

Estructura de costos

La figura 7 muestra la participación porcentual de los diferentes rubros de los costos. Los activos productivos incluyen la inversión inicial en obra civil, equipo de gasificación y de transporte; los de interconexión comprenden las cuotas establecidas por la Comisión Federal de Electricidad por conexión y uso de la red alámbrica. La mano de obra es con mucho el insumo más importante en las cuatro capacidades consideradas en el estudio, con un promedio de 30%. Siguiendo en magnitud son los costos de financiamiento y materia prima con 16% y 13%, respectivamente. El diseño del proyecto contempla un amplio uso de mano de obra para el manejo, preparación y transporte de los combustibles biomásicos, así

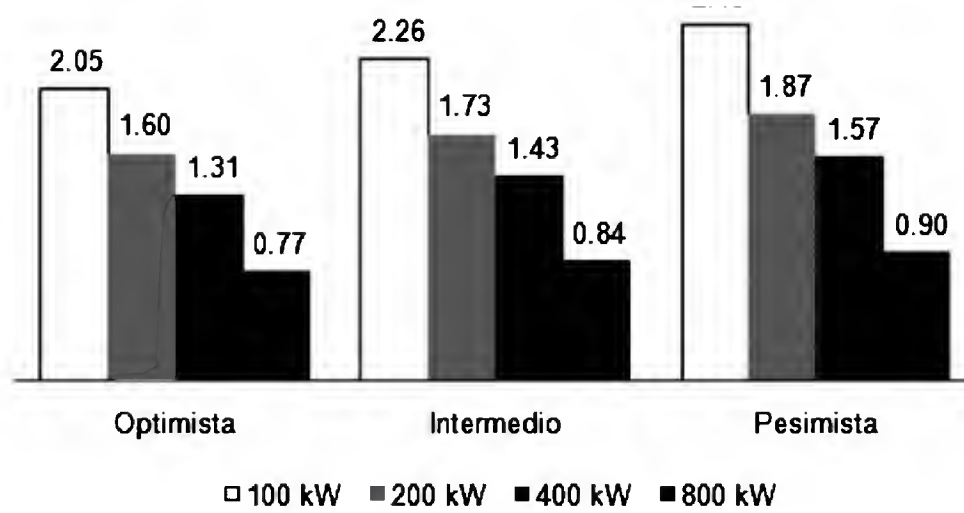


Figura 6. Costo de producción en MX\$/kWh en los tres escenarios de los cuatro sistemas del estudio.

como para la disposición de residuos. Sin embargo, es muy posible que los sistemas de 400 y 800 kW requieran equipo adicional para la carga y descarga de camiones, así como para la reubicación de inventarios y secado del material combustible. La figura 7 muestra que los costos de la materia prima, en caso de los dos sistemas mayores, tienen una alta participación de costos por mano de obra indirecta, un componente contemplado en la fase de transporte.

Los costos de mano de obra, tanto directa como indirecta, constituyen uno de los aspectos de mayor impacto positivo en el entorno socioeconómico de un proyecto de generación de electricidad por biomasa. En caso del sistema a 800 kW, el transporte llega a representar 50% del costo total de la materia prima. Al considerar esto, la derrama económica en mano de obra alcanza a comprender más de la tercera parte de los costos totales en caso de un sistema de 800 kW.

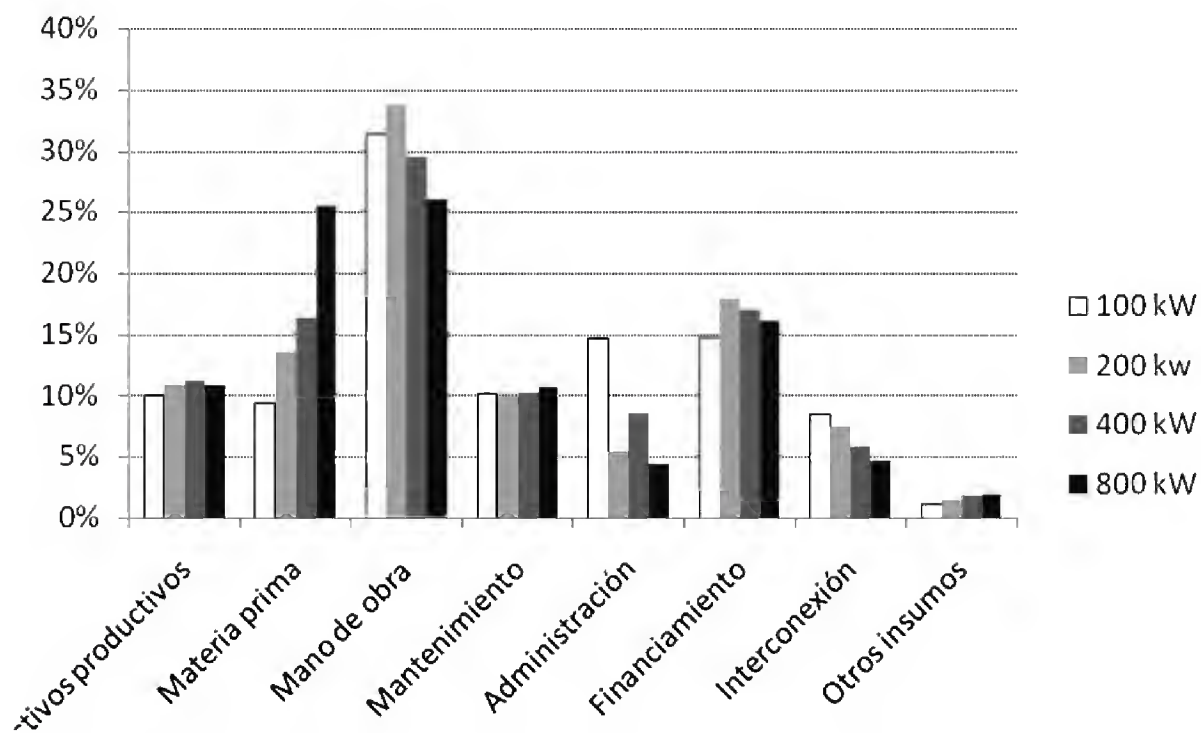


Figura 7. Estructura de costos para los sistemas de generación de electricidad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta zona del estado, con geografía característicamente accidentada, se considera viable la concentración de residuos de aserrío para la operación de una planta de generación de electricidad, con un rango de capacidad entre 400 y 800 kW. En virtud del evidente efecto de escala, una capacidad de 800 kW sería la más viable económicamente.

Se encontró que la TREMA es alcanzable si se consideran los ingresos adicionales que generarían los bonos de carbono, incluso a un precio de US\$ 4/tCO₂e, por el sistema a 800 kW en un escenario intermedio. Dado esto, un proyecto con estas características satisface el criterio de adicionalidad que demanda el mercado regulado de carbono. Se considera que el proyecto tendría mejores posibilidades dentro del mercado voluntario, donde la colocación de los bonos de carbono apoyaría con ingresos adicionales del orden de (4 a 6) US\$/tCO₂e y totales de US\$10,639 a US\$15,958 por año. Otro beneficio sería su impacto en la economía local a través del empleo que genera directamente en la operación de la planta e indirectamente en la maniobra y transporte del combustible biomásico.

En cuanto a los beneficios ambientales, un proyecto de conversión bioenergética de residuos como el presente, conllevaría la eliminación de prácticas con impactos ambientales negativos como la quema incontrolada y la disposición de residuos en condiciones que liberan contaminantes al agua y a la atmósfera. Algunos de esos impactos, como las emisiones de gases de invernadero por quema no controlada, pueden ser estimados e incorporados a la línea base del proyecto. Sin embargo, quedarían por resolver los posibles impactos

negativos causados por la operación de una planta de gasificación. En forma importante podrían ser los causados por la disposición de los residuos orgánicos (alquitranes) en las aguas de desecho, producto de la limpieza del gas de síntesis, así como de partículas en suspensión en el área de gasificación. En los primeros puede existir el riesgo de contaminación de agua y en el segundo caso un riesgo a la salud de los operadores. La búsqueda de soluciones es un tema principal de investigación. Por lo anterior, se recomienda revalorar mediante experiencias en campo con gasificación en pequeña a mediana escala, las tecnologías para el manejo de estos riesgos. Esta condición resulta imprescindible para la continuidad de un proyecto de esta naturaleza.

Los resultados encontrados indican que la generación de electricidad a partir de la biomasa de residuos de la industria del aserrío, tiene potencial para solucionar los problemas ambientales que actualmente ocasiona su disposición; contribuir a la mitigación del cambio climático y al desarrollo regional con una actividad económica que genera empleo para los habitantes de las comunidades forestales. Es necesario coordinar esfuerzos entre dependencias federales, estatales, municipales y académicas para la implementación de un proyecto piloto a nivel regional donde se validen la legislación y políticas que en materia de energía renovable ya han sido dadas a conocer por el gobierno federal.

RECONOCIMIENTOS

A la UACH y al PROMEP por la beca y apoyo financiero al primer autor para realizar estudios de doctorado. Al Conacyt-CIMAV, por las facilidades brindadas, en especial a la Dra. María Teresa Alarcón, el Dr. Alejandro Robau y la MC Miriam Moreno;

al despacho de servicios forestales del IAF Baldemar Beltrán B.; al C. Martín Solís, Presidente Municipal de Guachochi; al Ing. José Luis Ibarra N., de la Secretaría de Obras Públicas, Gob. del Edo. de Chihuahua y a las autoridades políticas y administrativas de los ejidos Rocheachi y Tatahuichi por los datos y facilidades aportados para la realización del estudio.

REFERENCIAS

- Abe, H., A. Katayama, B.P. Sah, T. Toriu, S. Samy, P. Pheach, M.A. Adams y P.F. Grierson. 2007. Potential for rural electrification based on biomass gasification in Cambodia. *Biomass and Bioenergy* 31:656-664.
- Brewer, D.T., S.J.M. Blaber, G. Fry, G.S. Merta y D. Efizon. 2001. Sawdust ingestion by the tropical shad (*Tenuulosa macrura*, Teleostei: Clupeidae): implications for conservation and fisheries. *Biological Conservation* 97:239-249.
- Capoor, K. y P. Ambrosi. 2007. State and Trends of the Carbon Market 2007. World Bank, Washington, D.C. 45p. http://carbonfinance.org/docs/Carbon_Trends_2007_-_FINAL_-_May_2.pdf.
- Clean Air Conservancy. 2008. Air travel CO2 emissions. <http://www.cleanair-conservancy.org>.
- De Buen, R.O. y M.J.E. Aguillón. 2006. Estrategias para la promoción de la bioenergía en México. In: La Bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable. Conafor, Red Mexicana de Bioenergía, A.C. Mundi-Prensa México. 119 p.
- EIA. Voluntary reporting of greenhouse gases program. Fuel and energy source codes and emission coefficients. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/coefficients.html>.
- EPA. 1999. Storm water management fact sheet. Non-storm water discharges to storm sewers. EPA 832-F-99-022. Washington, D.C. 5 p.
- Faaij, A.B., W. Meuleman, A. Turkenburg, A. van Wijk, Bauen, F. Rosillo-Calle y D. Hall. 1998. Externalities of biomass based electricity production compared with power generation from coal in The Netherlands. *Biomass and Bioenergy* 14:125-147.
- FAO. 1990. Conservación de la energía en las industrias mecánicas forestales. Forestry Paper 93. Roma. <http://www.fao.org/docrep/t0269e/t0269e08.htm>
- FAO. 2008. Forests and energy: Key issues. FAO forestry paper 154. 56p. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0139e/i0139e00.pdf>.
- García, E. 1990. Carta de Climas. Atlas Nacional de México Instituto de Geografía, UNAM.
- Ghilardi, A.A., E. Riegelhaupt y F.R. Saldaña. 2006. Los recursos bioenergéticos de México. In: La Bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable. Conafor, Red Mexicana de Bioenergía, A.C. Mundi-Prensa México. 119 p.
- Good, J., L. Ventress, H. Knoef, U. Zielke, P.L. Hansen, W. van de Kamp, P. de Wild, C. Coda, S. van Passen, J. Kiel, K. Sjöstrom, T. Lilliedahl, Ch. Unger, J. Neeft, M. Soumalainen y P. Simell. 2005. Sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases. Technical Report. CEN BT/TF 143. 44p. http://www.tarweb.net/results/pdf/Technical-Report-version-3_8-final.pdf

- Green Markets International. 2007. The Voluntary Carbon Market: Status & Potential to Advance Sustainable Energy. Arlington, MA. <http://www.green-markets.org/Downloads/vCarbon.pdf>.
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). Consultado en abril, 2008. <http://www.inafed.gob.mx>.
- INE. 2006. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002, México, Resumen Ejecutivo.
- Juárez, T.P. 2000. Las pérdidas causadas por el uso tradicional del sistema inglés de medición, aserraderos circulares y excesos de refuerzo. INIFAP-SAGAR.
- Juárez, T.P., F.J. Campeán, G., O.R. Armendáriz, A.H.O. Rubio, S.J. Hernández, R.M. Cano y S.M. Martínez. 2003. Identificación de los factores de ineficiencia en la industria de aserrío en Chihuahua. INIFAP-Conafor-Sagarpa. Folleto Técnico núm. 20. 27 p.
- Junginger, M., E. de Visser, K. Hjort-Gregersen, J. Koorneef, R. Raven, A. Faaij y W. Turkenberg. 2006. Technological learning in bioenergy systems. *Energy Policy* 34:4024-4041.
- Kollmuss, A., H. Zink y C. Polycarp. 2008. Making sense of the voluntary carbon market. A comparison of carbon offset standards. WWF-Stockholm Environment Institute-Tricorona. 119p. http://assets.panda.org/downloads/vcm_report_final.pdf.
- Knoef, H.A.M. 2000. The UNDP/World Bank monitoring program on small scale biomass gasifiers (BTG's experience on tar measurements). *Biomass and Bioenergy* 18(1):39-54.
- Kwant, K.W. y H. Knoef. 2004. Status of biomass gasification in countries participating in the IEA and GasNet activity. <http://gasnet.uk.net/files/289.pdf>.
- Maniatis, K. 2001. Progress in biomass gasification: an overview. European Commission, Directorate for Energy and Transport. 31 p. http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/bioenergy/km_tyrol_tony.pdf.
- Masera, C.O. y G.A.F. Fuentes. 2006. Estado actual de la bioenergía en México. In: La Bioenergía en México. Un catalizador del desarrollo sustentable. Conafor, Red Mexicana de Bioenergía, A.C. Mundi-Prensa México. 119 p.
- Meraz, L., I. Kornhauser y F. Rojas. 2003. A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition. *Fuel* 82:1499-1507.
- Orta G.V.R. y T.P. Juárez. 2000. Cuantificación y clasificación de desperdicios generados en la industria de aserrío de la región de Bosque Modelo Chihuahua. SAGAR, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto Técnico núm. 13. 21 p.
- Price, D.M. 2006. Thermogravimetry. IPTME, Loughborough University. <http://www.sump4.com/downloads/TGA.ppt>.
- Saha, N.C. y A. Kaviraj. 1996. Acute and chronic toxicity of tannic acid and spent bark of cinchona to tilapia *Oreochromis mossambicus*. *Aquaculture* 145:119-127.

Tomaselli, I. 2007. Forests and energy in developing countries. FAO, Rome. 32 p.

USDA-FS. 1979. General Technical Report FPL 29. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr29.pdf>

Zavala Z., D. y R. Hernández C.. 2000. Análisis del rendimiento y utilidad del proceso de aserrío de trocería de pino. *Madera y Bosques* 6(2):41-55.

Recibido el: 10 de febrero de 2010
Aceptado el: 17 de febrero de 2011

Este documento se debe citar como: Balderrama-Castañeda, S., C. Luján-Álvarez, D.K. Lewis, J.A. Ortega-Gutiérrez, B.H.J. de Jong y T. Nájera-Ruiz. Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México. *Madera y Bosques* 17(2):67-84.

Properties of laminated curves manufactured with steamed veneers from fast-growth tropical wood in Costa Rica

Propiedades de curvas laminadas construidas con chapas vaporizadas con maderas de árboles de plantaciones de rápido crecimiento

Mahyar Shirazinia¹, Róger Moya¹ y Freddy Muñoz¹

ABSTRACT

The laminated curves (LC) made with steamed veneers make possible to obtain smaller curvature radius (RC) than when this process is not applied. This research shows the behavior of *Alnus acuminata*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, *Terminalia oblonga* and *Swietenia macrophylla* –all originated from fast growth plantations– in the manufacture of laminated curves with radii of (4, 6, 8, 10, 12 and 14) cm. The results show that it was possible to reach RC of 4 cm in all species except for *T. grandis* in which it was only possible to reach RC of 6 cm. The steam process increased the moisture content of the veneer in a range from 3.3% to 10.2%. The adhesive makes possible that bondline for RC smaller than 10 cm do not open, while for RC of 12 and 14 cm the bondline tends to get open (1% as maximum) for all the species. Nevertheless, the bondline opening gets stabilized 4 days after it is fabricated. The veneer delaminations occurred mainly in the interval of RC from 4 to 8 cm. The highest delaminations values take place in the *T. grandis* and *T. oblonga*. The shear stress values varied from 7.5 MPa to 11.2 MPa in all tested species. The aging test of adhesive did not alter significantly the shear stress, but delaminating due to the failure of the bondline increased in all species.

KEYWORDS:

Laminated curves, delamination, steamed veneers, shear stress, curvature radius.

RESUMEN

Las curvas laminadas fabricadas con chapas vaporizadas permiten obtener radios de curvatura más pequeños que cuando no se aplica este proceso. En este estudio, se presentan el comportamiento de madera de *Alnus acuminata*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, *Terminalia oblonga*, *Alnus acuminata* y *Swietenia macrophylla* provenientes de plantaciones de rápido crecimiento en la fabricación de curvaturas con radios de (4, 6, 8, 10, 12 y 14) cm. Fue posible obtener radios de curvaturas de 4 cm, a excepción de *T. grandis* de donde solo fue posible obtener radio de 6 cm. El proceso de vaporizado aumentó el contenido de humedad de la chapa en un rango de 3.3% a 10.2%. El adhesivo permite que el radio de la curva fabricada se mantenga en radios menores a 10 cm y en radios de 12 cm y 14 cm la curva tiende a abrirse (máximo 1%), para todas las especies, no obstante, la abertura se estabiliza al día 4 luego de fabricada. Las delaminaciones de las chapas se producen principalmente en los radios de 4 cm a 8 cm y se presentan con mayor incidencia en la *T. grandis* y *T. oblonga*. La resistencia en cizallamiento de 7.5 MPa-11.2 MPa y no se alteró al someter a pruebas de envejecimiento, pero hay una mayor delaminación en todas las especies.

PALABRAS CLAVE:

Curvas laminadas, delaminación, chapas vaporizadas, cizallamiento, radio de curvatura.

¹ Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. c.e.: osemun@hotmail.com, rmoya@itcr.ac.cr, fmunoz@itcr.ac.cr

INTRODUCTION

Laminated curves (LC) are commonly built with veneers of a uniform thickness between 2 mm and 4 mm, which allows a better bending. For this veneer curved technique, each laminate is glued and placed in the mold, then pressure is applied to join the set of laminates until the adhesive hardens. In this way it is obtained smaller RC than the ones that could be got with a solid piece of wood (Stevens and Turner, 1970). The laminated curves are found in diverse uses, especially in the construction of boats or sailboats and furniture (Wu *et al.*, 1999).

Each wood species that is put under the bending will behave in a different way to the RC that is applied (Wagenführ *et al.*, 2006), which depends on many intrinsic properties of the wood, such as its anatomical properties of bending or spiral grain among others. (Stevens and Turner, 1970). The steam application plasticized wood making it flexible in order to get smaller RC during bending (Wu *et al.*, 1998; Lam, 2001). The applied technique to solid wood to obtain curves where wood is firstly steamed, then curved and pressed (Peck, 1955). Wood plasticizing is consequence of its inner temperature increment and its thermal linear coefficient expansion; as a result it allows a greater flexibility in its structure. A widely accepted hypothesis is that the softening of lignin largely dominates the effect of temperature and moisture (Kärenlampi, 2005).

The lignin and the hemi-celluloses are the polymers more affected by the temperature and humidity produced by the steam during the steaming (Cousins, 1977; Kärenlampi, 2002). The softwood and hardwood of tropical climates have been par excellence the species widely used in the manufacture of curves with solid wood. However, in recent years the wood shortage of high commercial value and natural durability has allowed that

species with less commercial value as well as wood from fast growth plantations be preferred in the wood industry (Wu *et al.*, 1998). In Costa Rica, Teak (*Tectona grandis*), Birchwood (*Gmelina arborea*), Yellow-wood (*Terminalia oblonga*), Aliso (*Alnus acuminata*), and Mahogany (*Swietenia macrophylla*) are some of the most important species in reforestation and raw material for wood industry.

T. grandis, and *G. arborea*, were introduced in Costa Rica, are species of great potential due to their adaptation easy to diverse environmental and site conditions (Moya and Tomazello, 2008; Moya and Pérez, 2008; Piotta *et al.*, 2003) and together with *S. macrophylla* have their importance in the national and international market of tropical woods. The native species like *A. acuminata* and *T. oblonga* have the potencial for commercial reforestation because of their excellent growth in highlands, besides that, they are well known species in the national market.

On the other hand, the adhesives polyurethane type has been used lately in the construction of structural wood elements (Vick and Okkonen, 1998, 2000; Widsten *et al.*, 2006). However, the application of this type of adhesive in tropical wood steamed veneers for the manufacture of laminated curves is not well known yet.

The present work, under the concept to innovate with new wood products from fast growth species in tropical regions, will evaluate the behavior of 5 species used in the commercial reforestation of Costa Rica (*Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, *Swietenia macrophylla*, *Alnus acuminata*, and *Terminalia oblonga*) in the development of laminated-steamed curves with adhesive of type one-part polyurethane, establishing the minimum RC, moisture increment of the steamed veneer, opening

percentage (OP) and delamination percentage (PD) of the veneers after vacuum and pressure condition. Also shear stress in the bondline and delamination before and after submitting glued samples to aging in every tested species.

METHODOLOGY

Wood samples: Five species were used, *T. grandis*, *G. arborea*, *S. macrophylla*, *T. oblonga* and *A. acuminata*. Four of them, used in low heights reforestation zones, and *Alnus acuminata* used in the high zones. The plantations age rank oscillates between 9 to 10 years, and plantation density between 338-575 trees per hectare. The plantation conditions and the forestry management of the plantations are shown in table 1. Initial spatial arrangement was 3 m x 3 m (1110 n/ha) in all species.

Veneers preparation: Nine trees were selected to represent all the diameter range in the plantation: thinner, average and big diameter. From each one of selected trees, logs of the base of the tree were cut, obtaining veneers 3 mm thick by peeling process, then they were dried to 9,5%-13,3% of moisture content (Table 2). The selected veneers were free of knots and fungi presence. Then they were conditioned at 22 °C and 60% relative humidity during several weeks until they reached a moisture content of 11%-12%. Other veneers samples were also cut with the purpose to determine the initial wood moisture content (MC) without steaming process. From each tree a disc at DBH was cut and then, from each disc it was obtained a central radial strip 3 cm wide through pith from north to south direction. Specific gravity and pH were measured on these samples according with ASTM D-2395 (ASTM 2003a) and D-2395 (ASTM, 2003a) respectively. Another log was cut between the DHB and 2,5 m of height. Then, from this log a central block

6 cm thick was obtained. From the block (5 x 5 x 76) cm samples were obtained to determine the modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) in static bending at 12% or air-dried, according with D-143-91 (ASTM, 2003b).

Mold construction: Round segments were drawn with radius of (4, 6, 8, 10 and 14) cm on a plywood laminate. A 180° bent angle of curvature was drawn. After that, 4 laminates 1,5 cm-thick were joined with PVA to give the molds the necessary height (Figure 1a). Once the adhesive was hardened both the mold and against-mold were sandpapered in order to get a finished surface and to calibrate their RC. The mold consists of the following parts: mold, against-mold, support and base (Figure 1a).

Veneers Steaming Process: The steam chamber (200 cm x 30 cm x 30 cm) was constructed with wood, complemented with an electrical heater (non ferrous material) with capacity for 19 liters of water which will be boiled to generate the steam inside the chamber (Figure 2b). The temperature within the chamber can reach 95 °C. Before steaming process, the chamber was previously heated for 1 hour, after the veneers were introduced and steamed during 3 hours.

Process of gluing and bending the veneers: It was used as an adhesive of type one-part polyurethane Titebond®, whose main characteristics are: applicable to wood with moisture content between 15%-40%, density of 1,15 g/cm³, solids percentage 100%, ignition point of 93 °C, joint time of 20 minutes at 21 °C and 50% of relative humidity. The thickness and moisture content of veneers were 3 mm and 9.5%-13.3% respectively. Immediately after the veneer steamed process, the adhesive was applied quickly in order to keep wood flexibility. The amount of adhesive applied was 200 g/m² on one face of the veneer by using a hand

Table 1. Information of the conditions and management of the used plantations.

Specie	Trees age (years)	Plantation density (n/ha)	Total height (m)	DHB (cm)	Management
<i>A. acuminata</i>	9	338	19	36,7	2 selective thinning was applied to trees at 4 and 7 years old. Not pruning
<i>S. macrophylla</i>	10	480	16,7	21,5	A sanitary and selective thinning was applied at 3 to 9 years old with pruning at 50% of total height of the tree.
<i>G. arborea</i>	10 - 12	368	25,1	28	2 selective thinning was applied to trees at 4 and 8 years old with pruning
<i>T. oblonga</i>	10	495-575	22,1	24,1	A sanitary and selective thinning was applied at 3 to 9 years old with pruning at 50% of total height of the tree.
<i>T. grandis</i>	12 - 13	475	21,85	25,15	2 selective thinning was applied to trees at 4 and 8 years old with pruning

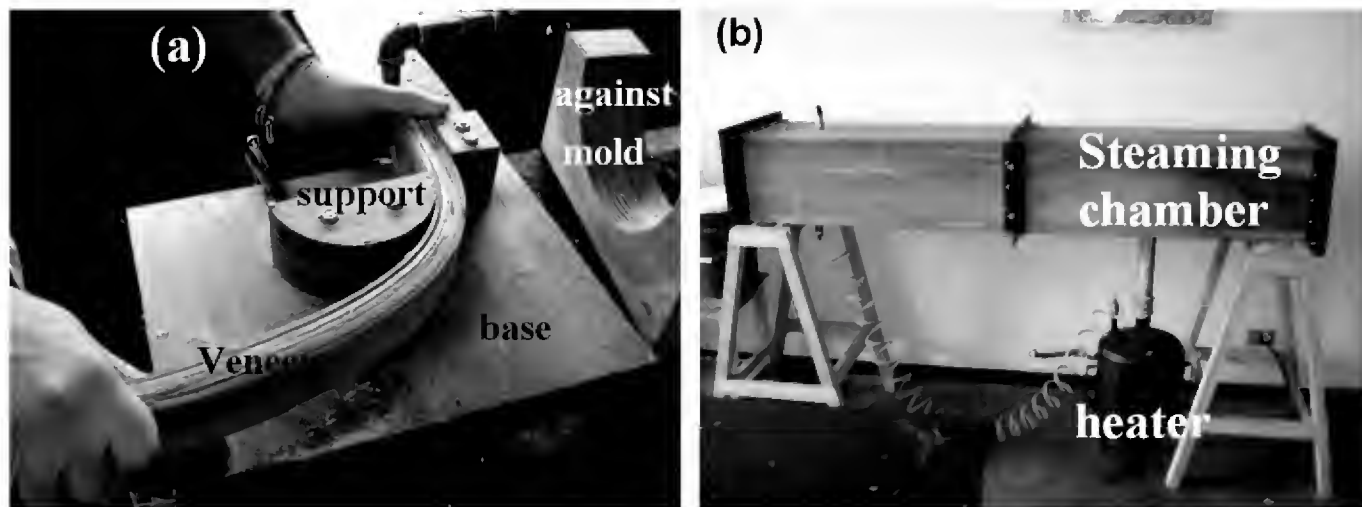


Figure 1. (a) General view of a mold built to curve veneers (RC= 12 cm in this case) and (b) steam chamber pilot

roller. A set of 7 veneers were glued to make a curve (23-24) mm thick, then the set of veneers was bended and pressed in the mold. The press time was 4 hours at room temperature (21 °C). A total of 116 curves were fabricated, 4 replicates by each RC and by each specie (5 species x 6 RC x 4 repetitions). For the evaluation of the laminated curves, several parameters were defined to establish bend susceptibility of veneers, such as:

Minimum RC: This parameter was established during the bend and press process. It is defined as the radio where each one of the veneers were properly bended and did not present failures such as check, shear, twist or tensile. Once the press was retired, the excess of adhesive was removed from the laminated curves and sandpapered with the purpose to obtain clean surfaces. Later, the evaluation of the laminated curves was made considering the parameters below:

Increase on the moisture content (MC): Before steaming process, 4 sample veneers were chosen randomly in order to determine the MC of the wood. Right away after removing the laminated curve from the mold, its MC was evaluated. Two samples of (2,5 cm long) were cut from

both extremes of the LC. The MC was determined following the standard D4442 (ASTM, 2003c).

Opening Percentage (OP): It is defined as the difference between initial radius and final radius expressed in percentage of the initial radius (Figure 2) (Equation 1). The opening percentage was daily measured from 0 to 8 days after press process.

Percentage of delamination (DP): It is defined as the separation between veneer and bondline and also adjacent. The total delamination in laminated curves are counted and they are calculated as percentage of total bondline in the laminated curve. 2 samples of 7,5 cm long were extracted, one located in the central part of the laminated curve, and the other one in the lateral side. All of the bondline were numbered from 1 to 6, locating the bondline 1 in the outside of RC, while number 6 at the most internal RC of the laminated curve (Figure 2). When present, the position of delamination was identified with both numbers veneer and bondline; they were classified as in "dry" condition. Afterwards, all the samples were exposed to vacuum-pressure (Va-Pr) according with D2559-

Table 2. Some wood properties from fast growth species in Costa Rica, used to obtain veneers and make laminated curves.

Parameters	<i>A. acuminata</i>	<i>S. macrophylla</i>	<i>G. arborea</i>	<i>T. oblonga</i>	<i>T. grandis</i>
Minimum RC obtained (cm)	4	4	4	4	6
Veneer failure (%)	2,6	0	0	0	0
Density Basic	0,59	0,34	0,56	0,54	
at 12% in MC*	0,45	0,57	0,46	0,52	0,65
Moisture content (%)					
Before bending	9,5	13,3	11,5	10,5	11,1
Alter bending	19,7	16,6	17,8	19,2	16,8
Increment	10,2	3,3	6,3	8,7	5,7
Modulus of Elasticity x 10³ MPa	6 700	7 850	7 000	6 100	11 800
Modulus of Rupture MPa	45,4	61,8	29,9	49,0	88,3
pH	6,04	5,23	6,14	4,13	5,18

* includes adhesive and wood weight

76 (ASTM, 2003d), and denominated like emptiness- pressure (VPR). Delamination presence was evaluated and localized again in bondline and veneer position.

$$\text{Opening percentage} = \frac{\text{Final radius (R}_f\text{)} - \text{Inicial radius (R}_i\text{)}}{\text{Inicial radius (R}_i\text{)}} \times 100$$

Evaluation of adhesive in shear stress and aging test: The adhesive (bondline) was evaluated in shear stress test as in samples with and without aging or accelerated cyclic exposure, with the purpose to evaluate the adhesive behavior toward the species. Additionally for this test 5 samples of 2 cm x 5 cm x 30 cm were prepared according to D-905-03 (ASTM, 2003e). Three 6,3 cm long samples were cut out of the before mentioned specimens. The samples were divided in two groups of equal amount. The first half was used to determine the resistance to shear stress in the bondline number 4 which is located in the central part. This test was denominated shear stress in the dry condition (SH-Dry). The other half of the specimens was used to measure the shear stress after aging. After aging

process, the shear stress was measured in bondline number 4 and this test was denominated as shear stress in humidity conditions (SH-Wet).

RESULTS

Bending susceptibility

The table 2 shows some physical and mechanical properties of the species studied and the parameters evaluated in laminated curves. In *A. acuminata*, *G. arborea*, *S. macrophylla*, and *T. oblonga* it was obtained the proposed minimum RC (4 cm), while with *T. grandis*, the minimum RC just reached 6 cm. The MC before steaming process was smaller than 13% for all species. MC increased in all species after steaming, however, in *T. grandis* and *S. macrophylla* the increment was less than in the others. And also, these species were the ones with the highest specific gravity. Related to the behavior of the different species, it was observed that just *A. acuminata* was susceptible to produce failures in the veneers after the bending process. A 2,6% of the total veneers (*A. acuminata*) showed failures in some

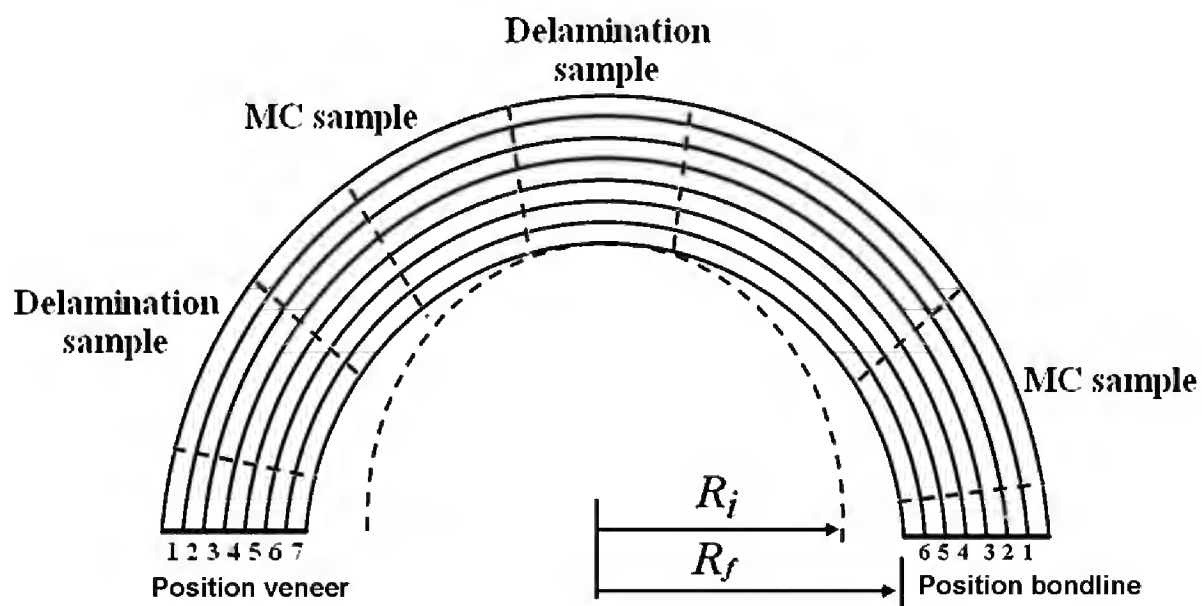


Figure 2. Veneer and bondline position in RC for OP and delamination determination.

sections, and the veneers outside RC were the most susceptible to have failures because these are the ones exposed to higher tension efforts. For the other species, it was not observed failure problems in veneers.

Opening percentage of laminated curves

The RC (4, 6, 8 and 10) cm treated in this study did not show any opening of RC after 8 days of having been made the laminated curve. While in RC 12 cm and 14 cm there were found opening problems, with the exception of *A. acuminata* and *G. arborea* for their OP was constant (0,3%) in the case of RC 12 cm. On the other hand, for the same species but in RC 14 cm the OP for *A. acuminata* was constant during the period of 8 days (Figure 3a) and in the case of *G. arborea* the OP value stabilized on the second day reaching approximately 0,08% (Figure 3b). For the rest of the species, it was observed that the OP in both RC (12 cm and 14 cm) started stabilizing in a maximum period of 4 days (Figure 3a and 3b). According to these results we might

say that the adhesive one part polyurethane hardens completely after 96 hours, from that moment on the OP variation pattern keeps constant for all the species. It is important to notice that in RC smaller than 10 cm and RC of 14 cm for *A. acuminata* and *G. arborea*, the laminated curves do not lose their RC that is to say their OP is equal to 0%. In the case of RC 12 cm for *T. oblonga*, *S. macrophylla* and *T. grandis*, after removing the molding pressure, the curvature presented small openings (Figure 3a).

Although openings of the curvature appear with time, the measured OP value was always less than 1%, being a little significant percentage. The highest OP value reached was 0,79% in RC of 12 cm for *T. grandis*; which means that the increment in the radius was 0,75 mm. Then, in RC 14 cm for *T. grandis* and *T. oblonga* the highest values were measured again being 0,17% for both species. Variance analysis (ANOVA) showed that in spite these species displayed the highest OP values; they were not statistically different from those obtained for *G. arborea*, *S. macrophylla* or *A. acuminata* in the

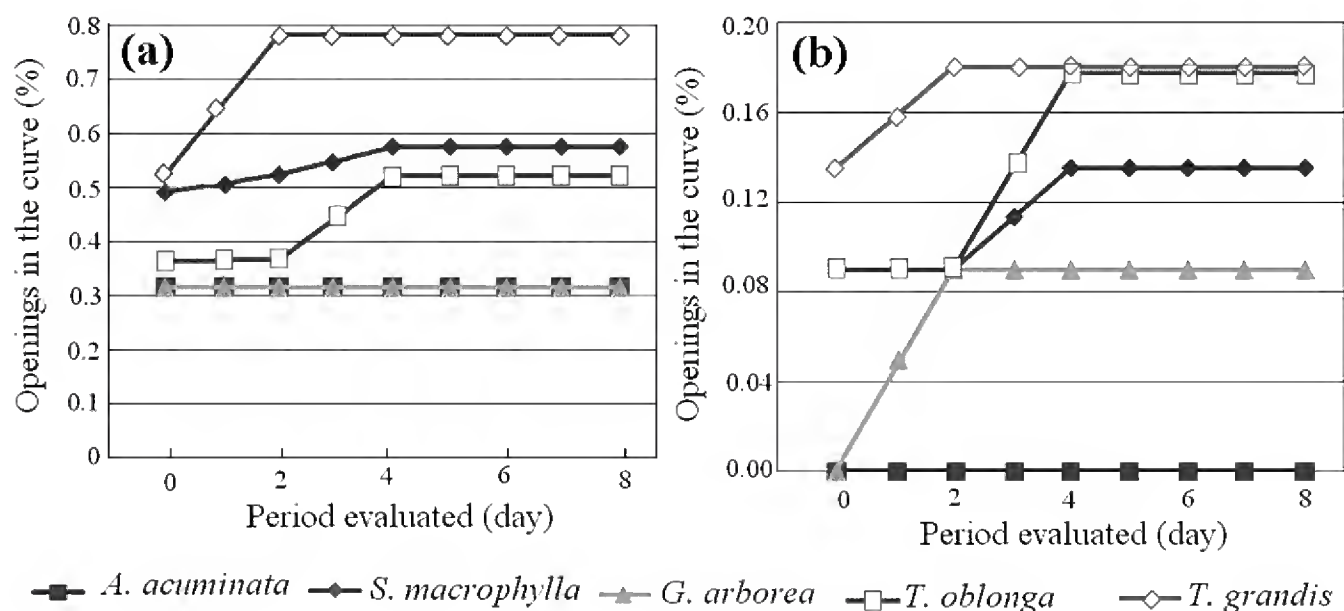


Figure 3. Opening percentage vs. time (a) RC 12 cm (b) RC 14 cm for different species from fast growth plantation used to make laminated curves.

same RC. In relation to the OP vs. time, the ANOVA also showed that there is no significant difference between OP values in measurement days 0, 2, 4, 6 and 8 for the 5 species in the RC 12 cm or 14 cm.

Veneer Delamination

The highest DP value obtained was in *G. arborea* laminated curves, that is to say 1,9%, *T. oblonga* was the second highest with 1,5 %, and subsequently followed by *A. acuminata*, *S. macrophylla*, and *T. grandis*, with values of 0,9%, 0,6% and 0,45% respectively (Figure 4a). DP increased with vacuum-pressure (Va-Pr) treatment (Figure 4a). Although *T. grandis* presented the lowest values of DP after curving veneers in dry condition, it was the species with the highest DP values after applying vacuum pressure treatment (Figure 4a). It was determined that 17,2% (336 veneers analyzed) of *T. grandis* presented delamination problems, followed in descendant sequence by *T. oblonga*, which presented similar values to *T. grandis*. On the other hand, *G. arborea*, *S. macrophylla* and *A. acuminata* obtained lower delamination values, in Va-Pr condition (Figure 4a).

The lowest values of DP were found in *A. acuminata* in dry condition in different RC and veneer position of the laminated curve, finding delaminations in RC 4 cm and 6 cm (Figure 5a). These delaminations were located at veneers 1, 2, 4 and 5 of laminated curve for Va-Pr condition. The DP for *A. acuminata* varied from 12,5% to 37,5% (Table 3). Another species with low DP was *S. macrophylla*. Although, the delamination were found in all RC for this species (Figure 5b), the highest value was found in RC 4 cm and located in the tension zone of the laminated curve, specifically in the veneer positions 5, 6 and 7 (Table 3). The DP for *S. macrophylla* varied from 12,5 to 50,0%. The species with higher DP values, compared with *A. acuminata* and *S. macrophylla*, was *G. arborea*, however it obtained lower values than *T. oblonga* and *T. grandis*. RC 12 cm and 14 cm were the radius with fewer problems of delamination for most of the species except for *T. grandis*, while the highest DP values appeared in RC 4 cm and 10 cm, mainly in Va-Pr condition (Figure 5c) and located in the veneer positions 1, 2, 4, 5, and 7 of the laminated curve (Table 3). On the other hand, *T. oblonga* and *T. grandis* were the species with highest values in

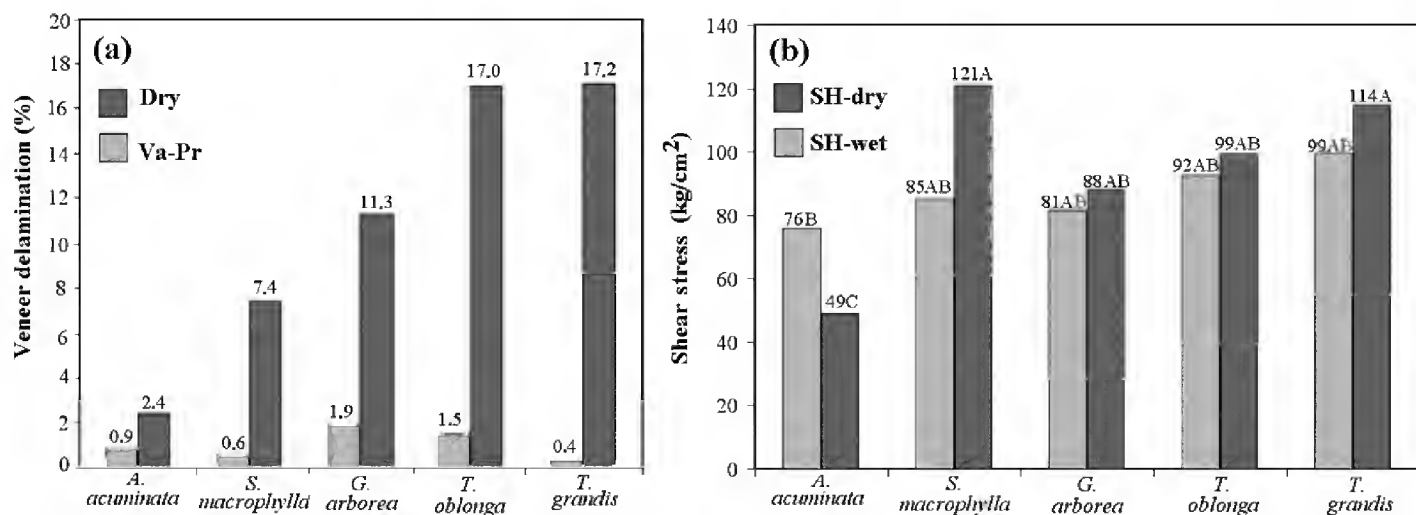


Figure 4. (a) Delamination percentage (b) and shear stress for laminated curves before and after the aging process.

Table 3. Delamination percentage, according to veneer position and RC.

Species	RC	Veneer 1		Veneer 2		Veneer 3		Veneer 4		Veneer 5		Veneer 6		Veneer 7	
		DRY	Va-Pr	DRY	Va-Pr	DRY	Va-Pr	DRY	Va-Pr	DRY	Va-Pr	DRY	Va-Pr	DRY	Va-Pr
<i>A. acuminata</i>	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	-	-	-	-
	4	37,5	37,5	-	25	-	-	12,5	-	-	-	-	-	-	-
<i>S. macrophylla</i>	14	-	-	-	12,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	-	-
	10	-	-	-	-	-	12,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	25	12,5	25	-	12,5	-	25	-	12,5	-	25	-	50
<i>G. arborea</i>	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	25	-	37,5	-	25	-	37,5	-	25	-	-	-	37,5
	8	-	-	-	25	-	-	-	12,5	-	-	-	-	-	-
	6	-	25	-	12,5	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-
	4	25	62,5	12,5	25	-	-	12,5	25	12,5	-	-	25	-	12,5
<i>T. oblonga</i>	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	-	12,5	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	12,5	87,5	-	12,5	-	-	12,5	37,5	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	12,5	12,5	37,5	-	25	12,5	12,5	-	-	-	-
	6	-	12,5	-	-	-	-	12,5	12,5	-	25	-	37,5	-	12,5
	4	-	50	-	50	-	75	-	37,5	-	50	-	37,5	-	50
<i>T. grandis</i>	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	-	12,5	-	12,5	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	50	-	37,5	-	12,5	-	12,5	-	-	12,5	37,5	-	12,5
	8	-	75	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	-	75	-	-	-	62,5	-	-	25	-	-	37,5	-	12,5
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Note: (-) not found delamination problem

delamination. These values were measured in RC 4 cm and 6 cm respectively. After that, DP in RC 12 cm varied from 5,4% to 23,2% (Figure 5d and 5e). In the case of *T. grandis* the highest delamination values were found in RC 6 cm specifically in veneers position 3 and 6 for laminated curved in Va-Pr condition (Table 3).

Shear stress in bondline

The figure 4b shows the laminated curves shear stress in bondline before (SH-dry) and after aging process (SH-wet). In the case for samples SH-dry the shear stress varied from 7,6 MPa to 9,7 MPa in for all wood species. *S. macrophylla* and *T. grandis* were the species of greater resistance and *A. acuminata* had the lowest value. Shear stress values in *T. oblonga* and *G. arborea* were intermediate values. Although, there were differences in resistance values among the species, ANOVA analysis showed that statistical difference (P-valor < 0,05) was only found between *S. macrophylla* and *A. acuminata* and between *T. grandis* and *A. acuminata* (Figure 4b). In SH-wet condition data varied from 4,8 MPa to 11,9 MPa and it was determined that the maximum sharp force increased in relation to the SH-dry condition for all species (P-valor < 0,05), with the exception of the *A. acuminata* (Figure 4b). However, these values were not statistically significant (P-valor<0,05).

The only exception was *A. acuminata* that displayed inferior statistical values in SH-wet condition than in SH-dry condition (Figure 4b). Shear stress values for *T. grandis*, *S. macrophylla*, *T. oblonga* and *G. arborea* were not significantly different in SH-wet condition (P-valor<0.05). The *A. acuminata* was the species that statistically showed inferior resistance compared to the rest of the species (Figure 4b).

DISCUSSION

Using steamed veneer obtained from the 5 studied species the results obtained in RC in most of the cases were even inferior to 6 cm (Table 2). According to the reports from Forest Products Research Laboratory of USA for these species or others with the same genus using veneer 2 mm-3 mm thick they got superior values to those obtained in this study (Peck, 1955). For example, for *T. grandis*, the FPRL reports minimum RC of 14,7 cm while our minimum RC was 6 cm using the same species. In *T. ivorensis* (the same genus that *T. oblonga* and *T. amazonia* but with a lower density) the FPRL reports minimum RC of 19,1 cm in comparison with RC of 4 cm obtained in this study. On the other hand, in *Alnus glutinosa*, same genus as *Alnus acuminata*, FPRL reports 18,8 cm as the minimum RC, which is bigger than minimum RC of 4 cm obtained in this study. Finally for the *Swietenia* genus, it is reported there are different ranges of radius from 14,7 to 23,6 cm, which are higher than the minimum RC 4 cm got in this study for *S. macrophylla*. According to a study carried out in Mexico with 34 tropical species with specific gravity between 0,19 and 0,90, using not-steamed (just upgraded to 12% MC) 3 mm thick veneers, they found that only 3 tropical species (*Ceiba pentandra*, *Pseudo-bombax ellipticum* and *Quercus sartorio*) presented minimum RC from 6 cm to 4 cm (Martínez and Martínez, 2008), being these values similar to the ones obtained with the 5 species studied in this research. This demonstrates that the steam effect on the veneer allows more flexibility which results on smaller RC compared to veneer in natural condition that has not been plasticized with steam (Stevens and Turner, 1970). The steaming process, among other advantages in the manufacture process, allows using wood of lesser quality or with bad bending properties to be used as internal parts of laminated wood products with curved profiles (Peck, 1957).

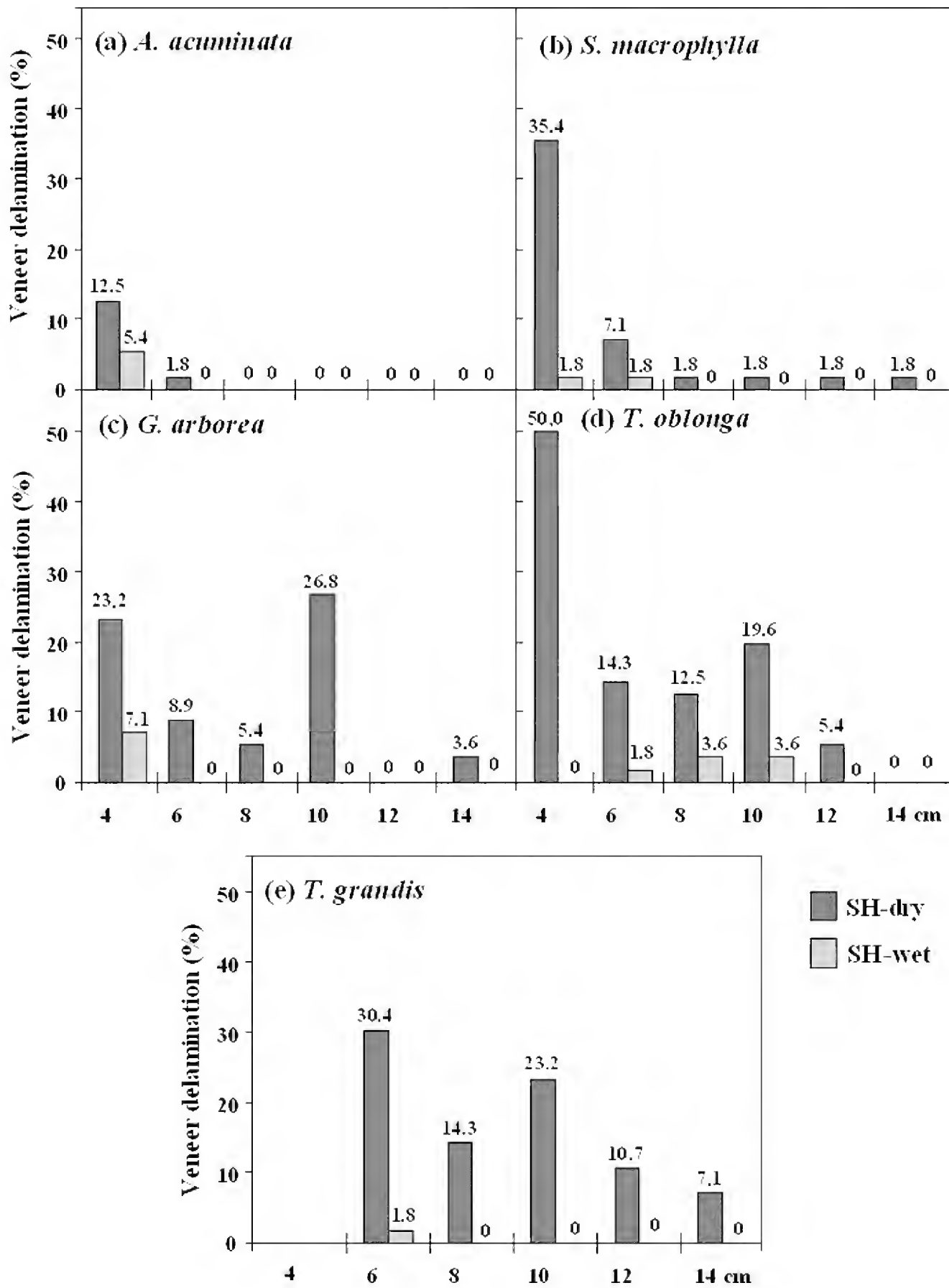


Figure 5. Delamination percentage for all species studied at different RC and two experimental conditions of aging process.

The bending behavior in five species was very similar, since all species managed to reach the proposed minimum RC, the only exception was *T. grandis* which did not reach the minimum RC (Table 2), and this suggests that the degree of flexibility of steamed veneer obtained from the studied species is very similar. However, when analyzing the parameters DP, OP, Shear stress in bond-line and MC, there are differences among these tropical species (Figures 3, 4a, 5 and Table 2). These differences could be explained as follow:

(i) Each species of wood is a complex matrix of polymers mainly composed by cellulose, hemicelluloses and lignin (Pereira *et al.*, 2003), the proportion and morphological arrangement of these polymers differences occur between species of wood (Karenlampi, 2005). Other opinions, Cousins (1978) and Salem (1984) mention that when there is a higher moisture presence in hemicelluloses, the wood tends to plasticize and when there is higher presence of lignin and cellulose, the wood fibers tend to stiffen. Our view is that wood is a composite material which consists of cellulose that is the reinforcing fiber that gives it structure. Lignin is a matrix or natural adhesive that supports these reinforcing fibers and hemicelluloses are additives that improve links between cellulose and lignin, when this complex matrix of polymers is not only subjected to the steaming process for a increase the MC, but also it is exposed to a combination of time and temperature causing the wood to reach its glass transition temperature (Tg) and its structure begins the thermoplasticization. The moisture decreases the energy of breaking bonds between hemicellulose, lignin and cellulose by modifying the value of wood elastic modulus (especially into radial and tangential direction), making it more flexible. The Tg is the point at which the

elastic modulus (MOE) of viscoelastic materials, such as wood, is very low which means that fibers wood are more flexible or elastic.

Under the concept of viscoelasticity and rheology of the materials, crystalline or semi-crystalline polymers such as cellulose (Tg 60 °C - 70 °C) do not plasticize. The thermoplasticization occurs only in amorphous polymers such as lignin (Tg 65 °C at Fiber Saturation Point) and hemicellulose (Tg 50 °C - 55 °C at Fiber Saturation Point). According to Rice and Lucas (2003) there is still considerable controversy about the glass transition temperature of these polymers, due to the different testing procedures, pretreatments and methods of isolating the wood components and finally that the Tg depends on wood MC, for example the Tg for the lignin, hemicelluloses and cellulose isolated from dry wood is (127-235) °C, (150-220) °C and (220-255) °C respectively, at 20% wood MC the Tg range for lignin is (72-128) °C, for hemicelluloses is (54-142) °C and for cellulose is (190-230) °C (Cornejo and Baettig, 2009). Therefore, it could be speculated that variations in the amount of these polymers within wood and the steam exposition, time and temperature affect the behavior of veneer bending. However, a chemical analysis and steaming to different times and temperatures ranges for the studied species was not made to correlate the Tg with elastic modulus.

(ii) Differences in anatomical structure could produce differences among wood species in bending properties. Hepworth *et al.* (2002) established that the variations in the resistance of the wood in hardwood species could be explained in the amount and frequency of the vessels and the fiber presence. They mentioned that a bigger diameter vessel has less capacity to absorb energy. Also, studies in *Fagus sylvatica*, *Acer pseudo-platanus* and *Juglans nigra* agreed with

these and our own results. It was shown that the LC properties were related with anisotropy produced by the orientation of the cellular elements in the bending of those species (Wagenfuhr *et al.*, 2006). Davies (1962) reviewed wood bending experiments carried out by the USDA Forest Products Laboratory, twenty-five hardwood species were tested and rated by the percentage of successful bends and it concluded, that in general, the ring porous woods yielded better results than the diffuse porous woods.

One important aspect to consider when steamed laminated curves are finally made is to stabilize its final MC to acquire dimensional stability, because that steaming process increased the veneers MC (Table 1).

The values obtained in static bending test and specific gravity showed the relationship between MOR and MOE with the bending properties of wood. *T. grandis*, for instance presented the highest values of MOE, MOR and specific gravity, followed by *S. macrophylla* and *T. oblonga*. It is important to note that this tendency was found properties of LC. The produced efforts in flexion and tension are associated with the flexibility of the wood (Wagenfuhr *et al.* 2006) and that these at the same time are associated to specific gravity values (Wu *et al.*, 1998).

The highest values in MOE and MOR of *T. grandis*, indicate that this wood is quite rigid (Table 2), therefore it was not possible to achieve the proposed minimum RC with this specie, additionally *T. grandis* also had severe problems in OP and DP in RC 12 and 14 cm (Figure 3, Figure 4a). *G. arborea* and *A. acuminata* with the smallest values of MOE and MOR confirm that species with low values in the flexion parameters display better performance in the curved veneer. In the case of *A. acuminata*, the number of veneer fail-

ures in the laminated curves was higher, which could be linked to the inclined grain in wood, influenced by the mismanagement of prunings applied to the sampled plantations (Table 1).

The delaminations present in the LC were caused by loss of adhesiveness between the adhesive and the adherent in the bondline zone, which can be associated to anatomical factors or chemical incompatibility of some extractives with the adhesive or the pressing process (Wagenfuhr *et al.*, 2006; Gardner, 2006). Besides the chemical incompatibility between wood and adhesives, other factors like the manufacture and shaped curves could also cause variation among species (Wu *et al.*, 1999). Also, the fact that the bondline was submitted to two different type of stress, one located in the external part of the LC (tension stress) and the other in the internal zone under compression stress (Wu and Furuno, 1999), making the bonline susceptible to delamination.

The LC manufactured with Costa Rican fast growth tropical wood was not susceptible to delamination, considering that DP was less than 2% in the bondline (Figure 4a). However, the LC delaminations in SH-wet condition increased significantly in all species (Figure 4a). But shear stress values were not affected, with the exception of *A. acuminata* (Figure 4b), suggesting that the delaminations are related to the compatibility between wood and adhesive. The delaminations in *T. grandis* and *T. oblonga*, were around 17%, being this value higher than the rest of the other species (Figure 4a).

Probably, the physico-chemical affinity between wood-adhesive –in the case of these species– was not the best. *T. grandis* is considered a species with wettability problem (Chen and Wangaard, 1968; Custodio *et al.*, 2008), problem that

could be the cause for a high DP in the *T. grandis* LC. Recently, it has been demonstrated that lipophenolic and phenolic extractives produce lower wettability between adhesives like the one-part-polyurethane and wood (Widsten *et al.*, 2006). *T. oblonga* has the most acid pH of all species in this study (pH=4,13). A low value of pH inhibits the polymerization of the adhesives, resulting in resistance problems in the bondline (Mantanis and Young 1997; Serneck *et al.*, 2008).

Even though the *A. acuminata*, DP was low, this was species with the lowest shear stress after ageing process. The power adherence of the adhesive is influenced by other factors related to wood (Stevens and Turner, 1970), such as extractives content and low wood density (Vick and Okkonen, 1998, 2000; Kishino and Nakano, 2004), and it may favor delamination in the LC *A. acuminata* wood.

CONCLUSIONS

The steaming process favored the wood veneer flexibility allowing to reach smaller curvature radius. Only these species *A. acuminata*, *S. macrophylla*, *G. arborea*, *T. oblonga* reached the minimum curvature radius. *T. grandis* did not reach the minimum radius, due to both the high specific gravity and stiffness.

The laminated curves with curvature radius less than 10 cm did not lose their shape after removing the molding pressure. However, the laminated curves manufactured with wood veneers of *S. macrophylla*, *T. oblonga* and *T. grandis* stabilized their shape 4 days after removing the molding pressure. The laminated curves manufactured with veneers of *G. arborea* and *A. acuminata*, with curvature radius of 12 cm and 14 cm did not present openings.

The region of the laminated curve under tension stress (external veneers) is the most susceptible to produce delamination compared to compression stress zone (internal veneers).

The steamed veneer glued with one-part polyurethane adhesive allows to obtain laminated curves with few delaminations and quite stable resistance for the species *S. macrophylla* and *G. arborea*. Meanwhile some openings or failure veneer and low shear stress values were obtained after the Va-Pr process, in *A. acuminata*.

Considering the results obtained, we can conclude that using steamed veneers from fast growth tropical wood and one-part polyurethane adhesive the result is high quality laminated curves and excellent performance. Applicable to manufacturing of other composite materials with curved profiles and laminated curves with radius small enough like the ones used frequently by furniture industry.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) for financial support.

REFERENCES

- ASTM Standard. 2003a. D 2395-02, Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials.
- ASTM Standard. 2003b. D 143-94, Test methods for small clear specimens of timber.
- ASTM Standard. 2003c. D4442, Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials.

- ASTM Standard. 2003d. D 2559 Standard specification for adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (Wet Use) exposure conditions.
- ASTM Standard. 2003e. D-905-03, Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading.
- Cornejo, J. and R. Baettig. 2009. Evolución del modulo de elasticidad longitudinal entre 10 y 100 °C en piezas de *Pinus radiata* usando una técnica no destructiva. *Maderas Ciencia & Tecnología* 11(2):153-160.
- Cousins, W.J. 1978. Young's modulus of hemicellulose as related to moisture content. *Wood Science Technology* 12:161-167.
- Custódio, J., J. Broughton, H. Cruz and A. Hutchinson. 2008. A review of adhesion promotion techniques for solid timber substrates. *The Journal of Adhesion* 84:502-529.
- Chen, C. and F.F. Wangaard. 1968. Wettability and the hysteresis effect in the sorption of water vapor by wood. *Wood Science Technology* 2:177-187.
- Davis, E.M. 1962. Machining and related characteristics of United States hardwoods. Tech. Bull. 1267. USDA Forest Serv., U.S. Gov. Printing Office, Washington DC. 68 p
- Gardner, D.J. 2006. Adhesion mechanisms of durable wood adhesive-bonds. In Stokke, D.D., Groon, L.H. Cellulosic cell wall. Blackwell Publishing CRC Press, USA, 2006
- Hepworth, D.G, J.F. Vincent, G. Stringer and G. Jeronimidis. 2002. Variations in the morphology of wood structure can explain why hardwood species of similar sensity have very different resistances to impact and compressive loading. *Philosophical Transactions of Royal Society A* 360 (1791):255-272.
- Kärenlampi, P.P. 2005. Viscoplasticity of steamed wood. *Mechanics of Time-Dependent Materials* 9:161-172.
- Kishino, M. and T. Nakano. 2004. Artificial weathering of tropical woods. Part 1: Changes in wettability. *Holz-forschung* 58:552-557.
- Lam, F. 2001. Modern structural wood products. *Progress in Structural Engineering and Materials* 3(3):238-245.
- Mantanis, G.I. and R.A. Young. 1997. Wetting of wood. *Wood Science Technology* 31:339-353.
- Martínez, J.L. and E. Martínez D. 2008. Laminado de 34 tipos de madera de México: radios mínimos que se pueden obtener con cada una de ellas. GDM 360°. Accessed June 18th, 2008. Available online: http://www.mexicandesign.com/revista/doblado_maderas.htm
- Moya, R. and L.D. Pérez. 2008. Effect of physical and chemical soil properties on wood characteristics of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 20:47-155.
- Moya, R. and M. Tomazello. 2008. Variation in the wood anatomical structure of *Gmelina arborea* trees at different ecological conditions in

- Costa Rica. *Revista Biología Tropical* 56:689-704.
- Peck, E. 1955. Bending solid wood to form. U. S. Department of Agriculture, Forest Service. Agriculture Handbook No. 125
- Pereira, H., J. Graça and J.C. Rodrigues. 2003. Wood chemistry in relation to quality. In: Barnett, J.R., Jeronimidis, G. Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing CRC Press, USA.
- Piotto, D., F. Montagnini, L. Ugalde and M. Kanninen. 2003. Performance of forest plantations in small and medium sized farms in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 175: 195-204.
- Rice, R.W. and J. Lucas. 2003. The effect of moisture content and bending rate on the work required to bend solid red oak. *Forest Products Journal* 53(2):71-77.
- Salmén, L. 1984. Viscoelastic properties of in situ lignin under water-saturated conditions. *Journal Material Science*. 19:3090-3096.
- Sernek, M., M. Boonstra, A. Pizzi, A. Despres and P. Gérardin. 2008. Bonding performance of heat treated wood with structural adhesives. *Holz als Roh-und Werkstoff* 63:173-180
- Stevens, W. and N. Turner. 1970. Wood bending handbook. Ministry of Technology. London, England
- Vick, C.B. and E.A. Okkonen. 1998. Strength and durability of one part polyurethane adhesive bonds to wood. *Forest Products Journal* 48(11/12):71-76.
- Vick, C.B. and E.A. Okkonen. 2000. Durability of one-part polyurethane bonds to wood improved by HMR coupling agent. *Forest Products Journal* 50(10):69-75.
- Wagenführ, A., R. Buchelt and A. Pfriem. 2006. Material behavior of veneer during multidimensional moulding. *Journal of Wood Science* 64:83-89.
- Wu, Z., T. Furuno and B. Zhang. 1998. Properties of curved laminated veneer lumber made from fast-growing species with radiofrequency heating for use in furniture. *Journal of Wood Science* 44:275-281.
- Wu, Z. and T. Furuno. 1999. Stress distributions and failure types of curved laminated veneer lumber for use in furniture under loading. *Journal of Wood Science* 44:134-142.
- Wu, Z., T. Furuno and H. Yoshihara. 1999. Calculation models of pressure and position of laminated veneer lumber on molds during pressing. *Journal of Wood Science* 45:213-220.
- Widsten, P., F. Gutowski, S. Li, T. Cerra, S. Molenaar, M. Spicer. (2006) Factors influencing timber gluability with one-part polyurethanes-studied with nine Australian timber species. *Holzforshung* 60:423-428.

Recibido el: 11 de agosto de 2009

Aceptado el: 09 de mayo de 2010

Este documento se debe citar como: Shirazinia, M., R. Moya y F. Muñoz. Properties of laminated curves manufactured with steamed veneers from fast-growth tropical wood in Costa Rica. *Madera y Bosques* 17(2):85-101.

MADERA Y BOSQUES Vol. 17 Núm. 2

Se terminó de imprimir en el mes de noviembre de 2011
en los talleres de Editorial Cromocolor S.A. de C.V.
Miravalle 703 Col. Portales C.P. 03570, México, D.F.

La edición consta de 300 ejemplares
más sobrantes para reposición.



Madera y Bosques 17 (2), 2011

CONTENIDO

3 **Editorial**

Forum

- 7 Conservation and restoration of Mexican forests in the global change scenario: a shared responsibility with multiple benefits
Ernesto I. Badano

Artículos de investigación

- 19 Análisis de la abundancia e infección por muérdago en Sierra Fría, Aguascalientes, México
Ricardo Clark-Tapia, Brenda Torres-Bautista, Cecilia Alfonso-Corrado, Juan Valdez-Hernández, Gabriel González-Adame, Jorge Bretado-Velázquez y Jorge Campos-Contreras
- 35 Proliferación de embriones somáticos de *Nothofagus alpina*: efecto de la fuente de nitrógeno orgánico exógena
Hermes Castellanos, Darcy Ríos, Manuel Sánchez-Olate, Christian Wehenkel y Javier Corral
- 47 Utilização de resíduos de *Pinus* spp., metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira
Adauto José Miranda de Lima, Setsuo Iwakiri y María Guadalupe Lomelí-Ramírez
- 67 Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México
Salvador Balderrama-Castañeda, Concepción Luján-Álvarez, David K. Lewis, Juan A. Ortega-Gutiérrez, Ben H.J. de Jong y Tonatiuh Nájera-Ruiz
- 85 Properties of laminated curves manufactured with steamed veneers from fast-growth tropical wood in Costa Rica
Mahyar Shirazinia, Róger Moya y Freddy Muñoz

Guía de autores