

ANTECEDENTES SOBRE USO DE BARRERAS VEGETALES EN BORDE COSTERO



PREVENCION Y MITIGACIÓN DE DAÑOS POR CATÁSTROFES OCEÁNICAS MEDIANTE BARRERAS VEGETALES EN BORDE COSTERO REGIONES DEL MAULE Y BIO BIO

**INSTITUTO FORESTAL
2013**

**PROYECTO INNOVA CHILE
FORTALECIMIENTO DE LAS CONDICIONES HABILITANTES POR
MEDIO DE LA PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE DAÑOS DEBIDO A
CATÁSTROFES OCEÁNICAS, A TRAVÉS DEL ESTABLECIMIENTO DE
BARRERAS VEGETALES EN EL BORDE COSTERO DE LAS REGIONES
DEL MAULE Y BIO BIO**

**ANTECEDENTES SOBRE USO DE BARRERAS
VEGETALES EN BORDE COSTERO**

**Juan Carlos Pinilla S. ¹
Carolina Valenzuela
Santiago Barros A.**

**Instituto Forestal
2013**

¹Ingeniero Forestal, Investigador. Sede Bio Bio. INFOR. jpinilla@infor.cl



INFOR

Instituto Forestal 2013

Sucre 2397, Ñuñoa

Fono: 56 2 3667115

Santiago - Chile

www.infor.cl

ISBN N° 978-956-318-082-4

RESUMEN

En su rol de institución de investigación y desarrollo del Ministerio de Agricultura, el Instituto Forestal inició una investigación orientada a estudiar los potenciales efectos positivos de bosques costeros para mitigar daños causados por eventos marinos, como el reciente tsunami que afectó a gran parte del país, disminuyendo o evitando así las pérdidas de vidas humanas y reduciendo los daños sobre obras civiles, viviendas, industrias y terrenos agrícolas.

Esta investigación se realiza en el marco del proyecto financiado por INNOVA Chile de CORFO *Fortalecimiento de las condiciones habilitantes por medio de la prevención y mitigación de daños debido a catástrofes oceánicas, a través del establecimiento de barreras vegetales en el borde costero de las Regiones del Maule y Bio Bio*, adjudicado a INFOR en el Concurso de Bienes Públicos para la Innovación y Fortalecimiento de Capacidades para la Reconstrucción 2010.

La propuesta en desarrollo por INFOR pretende entregar información para determinar la utilidad de este tipo de barreras vegetales en el país, a través de la recopilación de la información existente a nivel mundial y su análisis para su aplicación en Chile. El proyecto contempla la coordinación con otros organismos del Estado relacionados con el Borde Costero, la selección de especies adecuadas para barreras vegetales en este, la investigación sobre el tipo de planta requerido, su ordenación espacial y arquitectura y el establecimiento de unidades operacionales demostrativas. La iniciativa es acorde con los esfuerzos de Planificación Territorial que están desplegando los Gobiernos Regionales del Maule y Bio Bio, considerando a los árboles como una componente importante del nuevo diseño de organización geográfica en áreas cercanas al borde costero.

Por ello, y como primera actividad, se ha realizado una recopilación de antecedentes que ayude a esclarecer o comprender el real efecto o desempeño de barreras vegetales establecidas en el borde costero.

Estos antecedentes servirán para los planificadores urbanos e instituciones relacionadas con el diseño y uso en el borde costero, como un insumo técnico complementario a todas las obras y acciones que sean consideradas en el plan de mitigación de desastres oceánicos que se decida implementar en el país.

En este documento se espera entregar una primera aproximación a este importante tema en busca de su real aplicabilidad en el borde costero nacional, presentando en primer lugar información sobre la utilización de barreras vegetales para la mitigación de daños costeros por eventos tipo tsunami o inundaciones, mientras que la segunda parte entrega antecedentes de las potenciales especies a utilizar para el establecimiento de este tipo de barreras.

INTRODUCCIÓN

La vida en la Tierra se desarrolla en una permanente interacción con los sistemas naturales y estos con alguna frecuencia adquieren comportamientos de caracteres desastrosos; dados por fenómenos climáticos extremos, actividad volcánica, terremotos y tsunamis asociados, y otros. Los desastres naturales son en general inevitables e impredecibles y alcanzan el nivel de tales cuando afectan seriamente al ser humano, sus actividades y sus obras.

No obstante, los riesgos ante eventos naturales destructivos pueden ser reducidos y los daños que estos generan pueden prevenirse y mitigarse, regulando o limitando el poblamiento y el emplazamiento de costosas obras civiles en áreas de riesgo y evitando así que los eventos adquieran características desastrosas al no haber actividad humana de importancia en estas o, si la hay, que existan y sean conocidos los planes y medidas de mitigación y contingencia adecuados.

Chile es un país que por sus características topográficas y su ubicación geográfica está expuesto a variados riesgos de eventos desastrosos de la naturaleza. El gran desnivel desde la cordillera hacia el mar y la abundancia de cuencas hidrográficas que corren en igual sentido representan un riesgo permanente de aluviones e inundaciones; alrededor de 3 mil volcanes en el territorio nacional, de los cuales más de 500 son considerados geológicamente activos y unos 60 cuentan con registro eruptivo histórico, que indica más de 300 erupciones en los últimos 450 años², son otro riesgo permanente para las poblaciones aledañas; y más de 4 mil kilómetros de costa, sobre el denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, que posee algunas de las zonas de subducción más importantes del Planeta, debido a la fricción entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamérica, que propician una intensa actividad sísmica además de una abundante actividad volcánica, constituyen áreas de gran riesgo frente a eventos marinos.

Según el Servicio Sismológico de Chile³, desde 1570 hasta ahora se han producido en el país 110 terremotos con intensidad $\geq 7^\circ$ Richter, destacando por su magnitud y daños aquellos de 1906 en Valparaíso (8,2 Mw), 1939 en Chillán (7,8 Mw), 1960 en Concepción (7,5 Mw) y Valdivia (9,5 Mw), y el más reciente 2010 en Cobquecura (8,8 Mw). Valdivia 1960 es considerado el de mayor magnitud registrado en el mundo desde que se tienen registros y el reciente de Cobquecura se ubica en el sexto lugar.

² www.emol.com/especiales/volcanes/chile.htm

³ Servicio Sismológico de Chile (s/f). Sismos importantes y/o destructivos (1570 - a la fecha): Magnitud Ms mayor o igual a 7.0. <http://ssn.dgf.uchile.cl/terremoto.html>

Cuando el epicentro de estos grandes sismos se ubica bajo el mar se generan tsunamis (del japonés, literalmente gran ola en el puerto), dados por una ola o un grupo de olas que se producen en el mar por deformaciones del lecho submarino ocasionadas por el terremoto, que desplazan verticalmente el agua de modo que el océano es impulsado fuera de su equilibrio normal y estas olas golpean violentamente la costa.

Es así como, de los 110 grandes sismos registrados desde 1570 hasta ahora, 33 han producido tsunamis, 13 de ellos considerados tsunamis mayores o destructores. De estos grandes sismos, 18 han tenido su epicentro en las Regiones del Maule o Bio Bio y, de los considerados mayores o destructores, 6 han afectado las costas de estas regiones³.

Se estima que cerca de dos tercios de la población mundial, aproximadamente 3,7 mil millones de habitantes, vive en las zonas costeras, y que esta proporción se incrementará para el año 2.025, hasta alcanzar el 75% de la población del planeta. Esto se debe principalmente a que en estas regiones se encuentra gran parte de los ecosistemas más productivos y de mayor biodiversidad. Chile no es una excepción y gran parte de su población se concentra en estos sectores.

Si bien cualquier océano puede experimentar un tsunami, es más frecuente que ocurran en las costas del Océano Pacífico por las razones ya indicadas, cuyas márgenes son más comúnmente escenario de terremotos de magnitudes considerables.

Las recientes catástrofes derivadas del terremoto y tsunami que afectó a gran parte de la zona central del país en febrero del 2010, dejaron una vez más de manifiesto la necesidad de enfrentar con diversas medidas estos eventos, de modo de disminuir o mitigar los importantes daños que un tsunami o fuertes marejadas pueden provocar y, junto con ello, fortalecer las condiciones que permitan a los sectores productivos seguir desarrollando sus actividades.

El terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero de 2010, alcanzó una magnitud de 8,8 (Mw) y su epicentro se ubicó en el Mar Chileno, frente a las localidades de Curanipe y Cobquecura, cerca de 150 kilómetros al noroeste de Concepción, 63 kilómetros al suroeste de Cauquenes y a 30,1 kilómetros de profundidad bajo la corteza.

Debido a la localización submarina del epicentro y su proximidad a la costa, gran parte de los estragos fueron ocasionados por el tsunami asociado al movimiento sísmico sobre las localidades costeras. Esta masa de agua a gran velocidad azotó las costas chilenas en pocos minutos, alcanzando las localidades costeras de las Regiones del Maule y del Biobío. En Constitución, la primera ola del maremoto llegó cerca de media hora después del sismo principal y, según testigos, superó los ocho metros de altura, siendo seguida unos minutos después por una segunda ola, mayor, de unos diez metros, y finalmente una tercera, similar a la primera. El mar ingresó a localidades como Pelluhue y Curanipe, llegando a más de 150 metros al interior en Pichilemu, Iloca, Duao y hasta 200 metros tierra adentro en Coi Coi. En el puerto de Talcahuano, olas de hasta 5 metros penetraron en el casco de la ciudad y el nivel del mar se elevó en más de 2,4 metros. El puerto de Valparaíso enfrentó un alza de 1,7 metros del nivel oceánico. El desastre ocasionó 512 muertos, 16 desaparecidos y 800 mil personas damnificadas. La mayor cantidad de fallecidos fue debido al tsunami. Por ejemplo en la comuna de Pelluhue se registraron 47 muertos, 6 eran pobladores de este lugar y 41 fueron turistas chilenos de verano.

Se demostró la importancia fundamental de la educación y preparación en materia de evacuación inmediata para minimizar pérdidas humanas, y de los programas de sensibilización de la población. Este éxito parcial se vio ensombrecido por la gran mayoría de víctimas del tsunami que eran campistas y turistas. Las evaluaciones realizadas señalan que el tsunami de 2010 presentó un menor impacto global que el de 1960 o que el tsunami del Océano Índico del año 2004 (OPS, 2010; Fritz *et al.*, 2011).

Se hace así imprescindible considerar, dentro de los planes de reconstrucción, medidas permanentes que permitan mitigar los importantes daños que un tsunami o fuertes marejadas pueden provocar en el borde costero.

Una combinación de sistemas de defensas naturales y artificiales se puede utilizar de forma conjunta para proporcionar una mayor protección contra los tsunamis. Así como también medidas no estructurales, tales como la creación de conciencia del riesgo y educación, simulacros de evacuación y cursos de preparación, que junto con la protección natural de las costas, pueden ayudar a prevenir pérdida de vidas humanas (Khazai, *et al.*, 2007). Similar opinión es la de Gallaher *et al.*, (2010) quienes sustentan que un sistema de alerta temprana y un público informado es la pieza fundamental de un sistema estratégico eficaz contra un tsunami. Sin embargo, estos sistemas pueden fallar. Si un tsunami se genera a nivel local, en los primeros instantes, no existe tiempo suficiente para una evacuación.

Por su parte Tanaka *et al.*, (2007) clasifican las técnicas de mitigación en términos generales de dos maneras; los métodos artificiales (soluciones duras) y los métodos naturales (soluciones blandas), como zonas de amortiguamiento natural dadas por vegetación costera, dunas, o arrecifes de coral. Métodos artificiales son principalmente barreras en el mar (Diques, grandes terraplenes, otros). Sin embargo, los costos de construcción de los métodos artificiales pueden ser muy altos, lo que restringe el desarrollo, en muchos casos. Algunos países desarrollados, como Japón, que han sufrido frecuentes amenazas de desastres naturales, han utilizado estas técnicas acompañadas o en combinación con barreras vegetales.

Estas medidas, que van desde planes de evacuación hasta la construcción de obras de envergadura, incluyen el establecimiento de murallas verdes o barreras de protección en base a la disposición de plantaciones de ciertas especies forestales. Estas barreras verdes, en una ordenación espacial y arquitectónica determinada, pueden ayudar a disminuir y disipar la energía destructiva que puedan presentar los eventos marinos, mitigando los daños que puedan ocurrir en propiedades particulares, en obras civiles y, lo más importante, en vidas humanas.

Este tipo de barrera es utilizada en países con extensas líneas costeras, como lo es Japón, señalándose que uno de los métodos más eficaces de protección frente a un tsunami son los árboles, especialmente aquellos que tienen raíces profundas y cobertura densa. Existen antecedentes y metodologías que pueden ser utilizadas en Chile para la mitigación de daños, entregando a su vez beneficios ambientales adicionales, como belleza escénica, sombra, recreación y otros.

Algunos reportes señalan que es conveniente establecer estas barreras cerca de la línea de alta marea, con una protección continua y sin agujeros. Estas medidas, aplicadas especialmente para la protección de villas o poblados, protegen de las inundaciones y los tsunamis, con un equilibrio entre la necesidad de protección y los recursos utilizados. Estas estructuras vegetales se complementan además con obras de mayor envergadura (rompeolas, diques, otros). Incluso, en las zonas con fuerte actividad turística, los planes se basan en fomentar la plantación de árboles bajos en una banda que se extiende prácticamente ininterrumpida a lo largo de toda la costa.

Se ha concluido que los árboles y los bosques costeros pueden ayudar en la atenuación de los impactos de tsunamis. Sin embargo, el grado de su eficacia depende de muchas variables. Los bosques y los árboles costeros no ayudarán en el caso de tsunamis muy severos. La eficacia de árboles y de bosques en la reducción de impactos del tsunami depende del ancho, de la densidad y de la estructura de la vegetación, y evidentemente de la magnitud del evento. Las fajas estrechas de árboles costeros pueden exacerbar el daño si los árboles son derribados y se agregan a los restos flotantes llevados al interior por el tsunami. Según la bibliografía, árboles de perfil alto y delgado, con sistema radicular superficial, proporcionan escasa o nula protección contra tsunamis; por el contrario, bosques densos pueden proporcionar mayor protección. Los humedales han sido eficientes en la atenuación de los impactos de un tsunami. El desarrollo de este tipo de medidas involucra la articulación con Municipalidades, Instituciones, Ministerios y requiere de su inclusión como elemento de planificación urbana.

En este escenario, es posible aprovechar los resultados de las investigaciones de INFOR con especies forestales de rápido crecimiento y la experiencia internacional sobre barreras vegetales existentes en países del Asia principalmente, recopilando y analizando la información necesaria, para hacer posible el desarrollo de modelos adecuados.

Cabe mencionar que una parte importante de la información disponible se basa en estudios realizados tras el tsunami del año 2004 en el Océano Índico, en escenarios de vegetación distintos a los de Chile. No obstante, esta es un punto de partida que, con sus debilidades y fortalezas, señala el camino a seguir para realizar estudios.

FUNCIÓN PROTECTORA DE LOS BOSQUES COSTEROS

Utilización de Barreras Vegetales

Los bosques juegan un importante papel en el mantenimiento del equilibrio ecológico, siendo al mismo tiempo un elemento clave en el paisaje y un suministrador de materias primas y diversos servicios protectores para la sociedad. La erosión costera y la acumulación de sedimentos son procesos naturales que pueden convertirse en problemas debidos a la inadecuada ubicación de actividades humanas en el evento de desastres naturales. Estas situaciones están muy extendidas en la zona costera de Asia y de otros países en los océanos Índico y Pacífico, debido a la frecuente combinación de diversas fuerzas de la naturaleza, el crecimiento demográfico, la deforestación y el desarrollo económico no regulado a lo largo de la costa, tanto en cuencas fluviales como marinas.

Esto ha llevado a importantes esfuerzos para comprender los procesos claves de la dinámica costera en el corto y largo plazo, su compatibilidad con la actividad humana en estas áreas y las posibles medidas de prevención y protección o mitigación ante comportamientos extremos del medio natural. En particular frente la ocurrencia de tsunamis existe la experiencia de países como China, Japón, India, Indonesia, Vietnam, Sri Lanka, Tailandia, Bangladesh y Malasia, entre otros.

En materia de medidas de protección o mitigación, se ha concluido que los árboles y los bosques costeros pueden contribuir a la atenuación de los impactos de tsunamis. Sin embargo, el grado de su eficacia depende de muchas variables. Los bosques y los árboles costeros, al igual que otras estructuras, no ayudarán en el caso de tsunamis de gran magnitud. La eficacia de árboles y de bosques en la reducción de impactos del tsunami depende del ancho, de la densidad y de la estructura de la vegetación, y obviamente de la magnitud del evento.

Con base en estudios y resultados científicos, se señala que la presencia de vegetación en las zonas costeras mejora la estabilidad de taludes, consolida los sedimentos y reduce la energía de las olas en su movimiento en tierra. En algunos casos la vegetación falla porque las condiciones ambientales no favorecen el crecimiento de las especies usadas en el sitio en particular o si se desconocen las técnicas adecuadas de establecimiento de la vegetación para las condiciones dadas. También es posible que las influencias antropogénicas hayan alterado los procesos naturales de la zona. El indicador más claro de las posibilidades del sitio es la presencia de vegetación cada vez más intensa. La vegetación puede ser afectada por otros factores, como pendiente, altitud, amplitud de la marea, salinidad, sustrato y la hidrología local (Clark, 1995; French, 2001).

Se ha reconocido que los bosques y los árboles proporcionan una cierta protección costera y que la tala de bosques y árboles costeros incrementa la vulnerabilidad de las costas a la erosión, como en Vietnam (Mazda *et al.*, 1997a; 1997b; Cat *et al.*, 2006), Malasia (Othman, 1994), Indonesia (Bird y Ongkosongo, 1980; Nurkin, 1994; Tjardana, 1995), Sri Lanka (Samarayanke, 2003), India (Malini y Rao, 2004; Gopinath y Seralathan, 2005), China (Bilan, 1993) y Tailandia (Thampanya *et al.*, 2006). En estos países se ha analizado el papel de los bosques y árboles costeros en la protección de las áreas costeras contra la erosión, así como los aspectos socioeconómicos y ambientales asociados.

Otros autores también han reconocido a la vegetación costera como un método natural para reducir la energía de las ondas de un tsunami (Kar y Kar, 2005; Kathiresan y Rajendran, 2005, Dahdouh-Guebas *et al.*, 2006; Vermaat y Thampanya, 2006; Olwig *et al.*, 2007).

Sin embargo, una barrera de vegetación no puede detener completamente un tsunami y su efectividad depende de la magnitud del tsunami, así como de la estructura de la vegetación (Tanaka, 2009). El mismo autor señala que la vegetación costera, junto con otros elementos naturales, como las dunas y arrecifes sumergidos, implica una inversión de capital relativamente más baja en comparación con medidas artificiales, proporcionan un escenario más armónico con el paisaje y también mejoran las interrelaciones con otros sistemas ecológicos.

Varios modelos matemáticos y estudios han demostrado que la magnitud de la reducción de energía por un bosque depende fuertemente de la densidad de árboles, del diámetro de los troncos y raíces, de la inclinación del suelo, de las características (altura, período, etc.) de las ondas incidentes, y de la etapa de la marea en la que las olas entran en un bosque (Mazda *et al.*, 1997a, 1997b, 2006).

Alongi (2008), por su parte, señala que el grado en el cual los bosques costeros pueden mitigar el efecto de estos eventos depende de factores como el ancho de la franja de bosque, la pendiente del terreno, la densidad de los árboles, el diámetro y la altura de los árboles, la textura del suelo, la ubicación del bosque, el tipo de vegetación y la cobertura de las tierras bajas adyacentes, el tamaño y la velocidad del tsunami, la distancia de eventos tectónicos y el ángulo de incursión del tsunami en relación con la línea de la costa. A similar conclusión llega Srinivas *et al.*, (2007), quienes señalan que la importancia de la vegetación costera se correlaciona con la distancia de un pueblo a la costa, la pendiente, la complejidad topográfica, la historia del uso del suelo, la batimetría cercana a la costa y otros factores.

Danielsen *et al.*, (2005) realizó un estudio sobre el papel de la vegetación en la mitigación de los impactos del tsunami a lo largo de la costa afectada en el distrito de Cuddalore en Tamil Nadu, India. En los resultados de su análisis, las comparaciones estadísticas de daños en las zonas con densidades de vegetación sugieren que los manglares ayudaron a mitigar los daños debido a que las aldeas situadas detrás de los manglares no fueron dañadas en comparación a los pueblos fuera de la protección de estos.

Por su parte Ba-Thuy *et al.*, (2010), agregan que la reducción de los daños del tsunami detrás de un bosque costero depende de las especies vegetales y sus dimensiones (altura del árbol, el diámetro y la densidad), la copa y la disposición del bosque (junto a la longitud de la costa y la anchura transversal a la costa), y las condiciones del tsunami.

Quartel *et al.*, (2007), citados por Khazai *et al.*, 2007, utilizaron la instrumentación de terreno para probar la velocidad de la corriente y del nivel de agua en una planicie expuesta y otra protegida por un manglar. Sus resultados mostraron que la reducción de altura de la ola fue de 5 - 7,5 veces mayor en la zona donde estaba el manglar. La atenuación de la onda radica en que los manglares actúan como sumideros para la suspensión de sedimentos (Woodroffe, 1992; Wolanski *et al.*, 1992; Wolanski, 1995; Furukawa *et al.*, 1997, citados por Kathiresan and Rajendran, 2005).

Tanaka *et al.*, (2007) describieron las posibles funciones que la vegetación costera puede potencialmente cumplir durante el tsunami y señalan que para cualquier futuro manejo de la vegetación costera o proyecto de ordenación del territorio, se deben tener las siguientes consideraciones:

- Efecto de caída suave: Las personas atrapadas en las olas pueden tener una mayor oportunidad de sobrevivencia si los árboles cuentan con ramas densas y hojas.
- El efecto de sumidero: Durante un tsunami, el arrastre de autos y escombros de casas destruidas, incluso de personas heridas, puede ser atrapado por árboles de mayor diámetro. En particular, si un bosque se encuentra detrás de una duna de arena podría atrapar la mayor parte de los escombros y evitar que las viviendas ubicadas detrás del bosque se dañen.
- El efecto de escape: Las personas también pueden escapar de un tsunami trepando a los árboles.

Se ha destacado que una estructura horizontal de los bosques con árboles de diámetro pequeño y grande es eficaz debido a que la densidad de la población de árboles de pequeño diámetro (>10 cm) podría reducir la velocidad de la corriente del tsunami, mientras que los árboles de gran diámetro (> 30 cm) podrían atrapar ramas rotas, autos y escombros. La estructura vertical también es eficaz para personas arrastradas por el tsunami o para la escalada de los árboles (Tanaka *et al.*, 2007). Un grosor moderado de los árboles, especialmente los que tienen raíces profundas y cobertura densa, puede proteger eficazmente contra los tsunamis.

Para la rehabilitación costera, mediante una planificación óptima de los sistemas naturales y su mantenimiento, se requiere dilucidar cuantitativamente los efectos de la vegetación en la reducción del potencial de un tsunami. Esto exige el conocimiento de las limitaciones de los bosques costeros en relación con la magnitud de un tsunami y el mantenimiento de los bosques como zonas de amortiguamiento natural.

Se ha reportado que una brecha abierta en un bosque (camino, río, diferencia en la elevación u otros) puede canalizar y amplificar una fuerte corriente en dicho espacio. Restos flotantes de árboles quebrados también pueden dañar viviendas y personas. Sin embargo, estudios han revelado que estas desventajas pueden superarse con una adecuada planificación y manejo de los bosques costeros, y que la vegetación costera tiene un gran potencial para mitigar los daños en construcciones y salvar vidas humanas, actuando como zonas de amortiguamiento de los eventos naturales extremos.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1998; 2007) afirma que se requiere de un manejo forestal activo para producir esta diversidad de edades de los árboles con un rango de tamaños en todos los niveles para aumentar el potencial de mitigación, ya que este disminuye (da el ejemplo de *Pinus* spp. y *Casuarina* spp) con la edad, debido a la mortalidad natural (auto-raleo) que disminuye la densidad, y debido a que la altura de la copa sobrepasa la altura del agua de un tsunami por su poda natural. Además, se recomienda una combinación de diferentes especies de árboles en un bosque de protección (Tanaka *et al.*, 2007; Tanaka, 2009).

El diámetro del árbol y el efecto de la densidad, son parámetros muy importantes para la estimación del arrastre, por lo que se sugiere no analizarlos de manera independiente. Danielsen *et al.*, (2005) informaron que bosques de *Rhizophora* spp. (manglar colorado) y *Avicennia* spp. (con una densidad de 14 a 26 árboles por cada 100 m²) contribuyó a disminuir el daño en el 96% de los casos estudiados en la India. Pueblos expuestos sufrieron los mayores niveles de daño, y los que estaban detrás de los manglares experimentaron niveles intermedios de daños.

Similares resultados obtuvieron Hiraishi y Harada (2003), quienes llevaron a cabo experimentos basadas en el tsunami de 1998 en Papua Nueva Guinea para estimar la atenuación de la energía del tsunami por los manglares. La respuesta del modelo propuesto fue una reducción de más del 90% de la presión máxima del flujo del tsunami, por un cinturón forestal de 100 metros de ancho cuando la densidad de los árboles es muy alta (30 árboles por cada 100 m²). A su vez, Gallaher *et al.*, (2010) apoyan la hipótesis de que un bosque costero denso con un ancho de al menos 50 metros y una densidad de 1.000 árboles por hectárea puede proporcionar una cierta protección a las estructuras inundadas por un tsunami.

Mazda *et al.*, (2006) concluyeron, en forma similar, que la energía de las olas se redujo en un 50% dentro de los 100 metros de los bosques de *Sonneratia*.

Estos estudios enfocados en el diseño de los bosques costeros como un elemento de los planes de mitigación de daños por efectos de eventos marinos, han coincidido en ciertos aspectos. Tanaka *et al.*, (2007) lo confirman al señalar que al tener en cuenta las características de algunas especies de árboles establecidos como bosques costeros, es posible proponer lo siguiente:

- Una estructura horizontal de bosques mixtos, que incluyen árboles de pequeño y gran diámetro, con una población densa de árboles de pequeño diámetro ($d > 10\text{cm}$ para soportar un tsunami de al menos 5 m de altura), podría reducir la velocidad de la corriente del tsunami, mientras que árboles de gran diámetro ($d > 30\text{ cm}$) podrían atrapar ramas quebradas y escombros.
- Dos capas de vegetación densa.
- Árboles de latifoliadas detrás de la vegetación densa; de ellos se puede esperar que atrapen escombros y para ayudar a personas a escapar, trepar y tener caídas suaves.

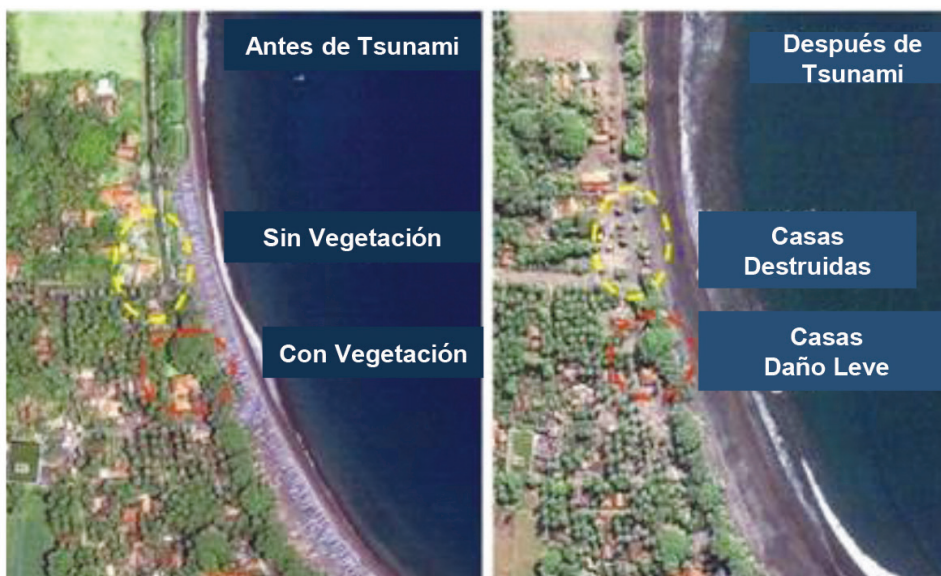
Estas medidas, deben ser complementarias a otras planificadas e implementadas por las entidades responsables, las que incluyen desde planes de evacuación hasta la construcción de obras de envergadura.

Como se ha señalado, estas barreras se establecen cerca de las altas mareas, como una protección continua y sin agujeros, protegiendo a poblados de las inundaciones y los tsunamis, con un equilibrio entre la necesidad de protección y los recursos utilizados, lo que se complementa con obras de mayor envergadura, como rompeolas, diques, y otras. Las Figuras 1 y 2, muestran el efecto luego del tsunami, comparando daños en sectores de árboles y sin ellos. En ambas figuras, una nacional y otra de Japón, es posible observar como disminuyen los efectos dañinos del tsunami por la presencia de una muralla vegetal frente a la costa protegiendo las viviendas o instalaciones.



(Foto: Intendencia Región del Bio Bio)

Figura 1: Arauco, Región del Bio Bio. Chile



(Fuente: Hamzah Latief y Safwan Hadi, The role of forests and trees in protecting coastal areas against tsunamis. <http://www.fao.org/docrep/010/ag127e/AG127E06.htm>)

Figura 2. Antes y Después del Tsunami del Oeste de Java en el Año 2006

Playa de Pangandaran

Existe una fuerte relación entre los problemas de erosión costera y la degradación de la función protectora de los sistemas costeros, como los bosques y árboles costeros. Se ha señalado que una investigación más científica sobre la cuantificación de los procesos físicos y la interacción dinámica del sistema se requiere para entender cómo y bajo qué circunstancias la vegetación costera puede mitigar los daños frente a eventuales eventos marinos. Varios esfuerzos se han centrado en observaciones de campo, experimentos de laboratorio y modelos numéricos y análisis teórico (Figura 3) (Wolanski 1992; Mazda *et al.*, 1997; Massel *et al.*, 1999).

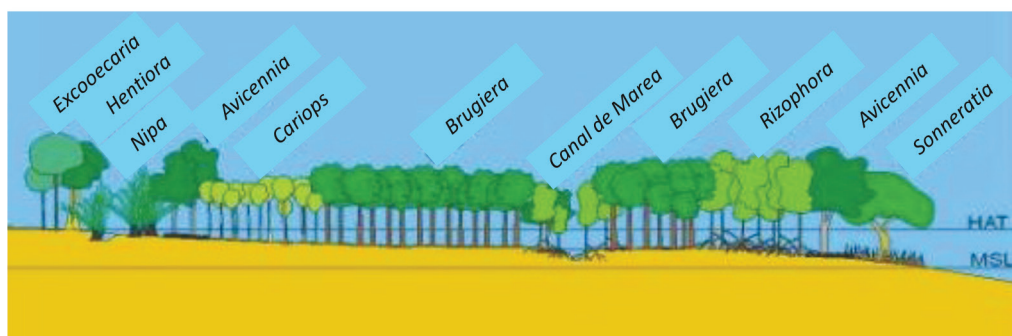
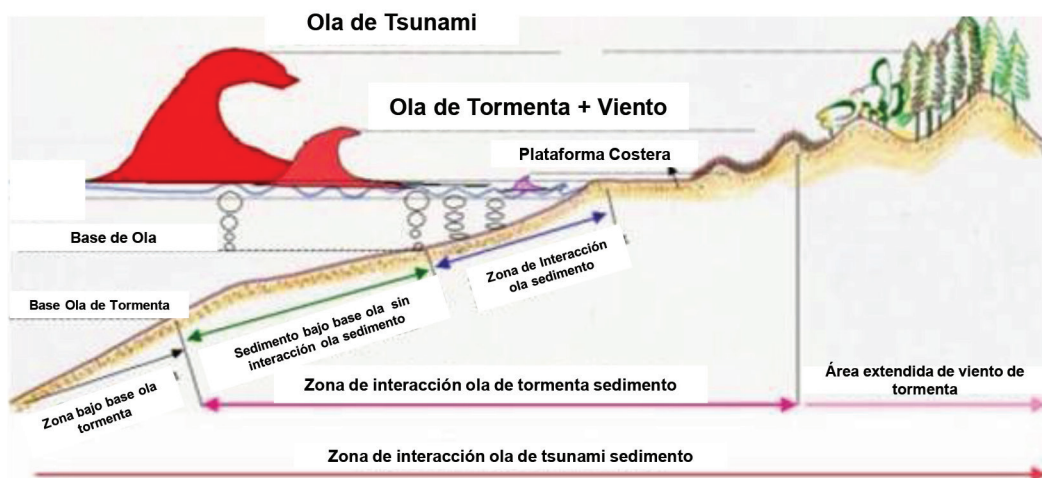


Figura 3. Patrones de Zonificación para Manglares en Sumatra

En algunos casos, la reforestación es necesaria debido a la pérdida de los bosques ribereños, producto de la acción humana, lo que provoca la exposición directa a la acción del oleaje. También hay casos en que se debe establecer diques en alta mar como estructuras temporales de protección para la vegetación.

Algunas aldeas en la India presentaron bajos daños en el tsunami de 2004 porque habían plantado árboles a lo largo de la costa. El pueblo de Naluvadapathy, por ejemplo, estaba protegido por un kilómetro de árboles y no sufrió ningún daño directo del tsunami.

Prasetya (2006) en el reporte de FAO (2007), hace mención al rol de los bosques costeros y los árboles en la protección contra la erosión costera y daños por marejadas o tsunamis, y comenta que en las costas clasificadas como de suelos cohesivos, comunes en estuarios, y donde pueden existir los fenómenos extremos como las tormentas y los tsunamis (Figura 4), la cubierta vegetal juega un papel importante en la protección de la costa y de las inundaciones mediante la reducción de altura de las olas y su energía y la desaceleración del flujo de la velocidad del tsunami, por lo que las fuerzas erosivas y la distancia de inundación se reducen.



(Fuente: Prasetya, 2006, en FAO, 2007)

Figura 4. Costa con Suelos del Tipo Cohesivos donde la Cubierta Vegetal Permite Reducir la Altura de las Olas y la Energía del Tsunami

El mismo autor señala que en las costas de tipo intermareales, que se caracterizan por depósitos sedimentarios de grano fino, predominantemente limo y arcilla que vienen de los ríos, con suave pendiente hacia el mar amplio (Figura 5.), durante las tormentas los bosques y árboles costeros pueden servir como barreras y reducir la altura de ola de tormenta, así como que ofrecer cierta protección a la zona detrás de ellos.



(Fuente: Prasetya, 2006, en FAO, 2007)

Figura 5. Perfil de un Costa del Tipo Fangosa Intermareal donde los Bosques y Árboles Costeros Pueden Servir como Barreras y Reducir la Altura de Ola

Otro tipo de costas que describe Prasetya (2006) en el reporte de FAO (2007), corresponde a las que cuentan con presencia de dunas, se componen de materiales no consolidados, principalmente de arena, algunas piedras y conchas, que puede ser clasificada como una costa suave. Tiene una pendiente leve hacia el mar, playas disipativas que tienen arena fina, amplia y poca inclinación. Su perfil depende de la forma de onda y la energía y dirección del viento.

La reconstrucción de la cubierta vegetal de las dunas de arena cuando ellas la pierden por procesos erosivos o de otro tipo, mejora la estabilidad de las laderas y consolida la arena. Las dunas de arena y su cubierta vegetal son las mejores medidas de protección natural contra las inundaciones costeras y la inundación de tsunamis (Prasetya, 2006, en el reporte de FAO, 2007).

En las costas que se componen de materiales no consolidados, principalmente de arena de los ríos y promontorios erosionados, la pendiente de la playa varía desde suave a empinada, en función de la intensidad de las fuerzas naturales que actúan sobre ella. Los bosques son comunes aquí y durante los eventos extremos (Figura 6) los árboles protegen las costas, en cierta medida por la reducción de altura de las olas y la energía, así como de la erosión costera grave.



(Fuente: Prasetya, 2006, en FAO, 2007)

Figura 6. Costa del Tipo Arenosa donde la Presencia de un Bosque Permite Mitigar el Efecto de las Olas y el Viento

Con base en estudios y resultados científicos, se afirma que la presencia de vegetación en las zonas costeras mejora la estabilidad de taludes, consolida los sedimentos y reduce la energía de las olas en movimiento en tierra, por lo que protege la costa de la erosión. En algunos casos, la revegetación falla porque las condiciones ambientales no favorecen el crecimiento de las especies en el sitio en particular o hay desconocimiento de las técnicas adecuadas para repoblar bajo estas condiciones. Un punto importante a señalar es que los propósitos de la creación de cinturones verdes costeros no debe ser únicamente la prevención de la erosión costera y la mitigación de peligros naturales, sino también abordar la situación socio-económica de las comunidades locales, así como la sostenibilidad ecológica.

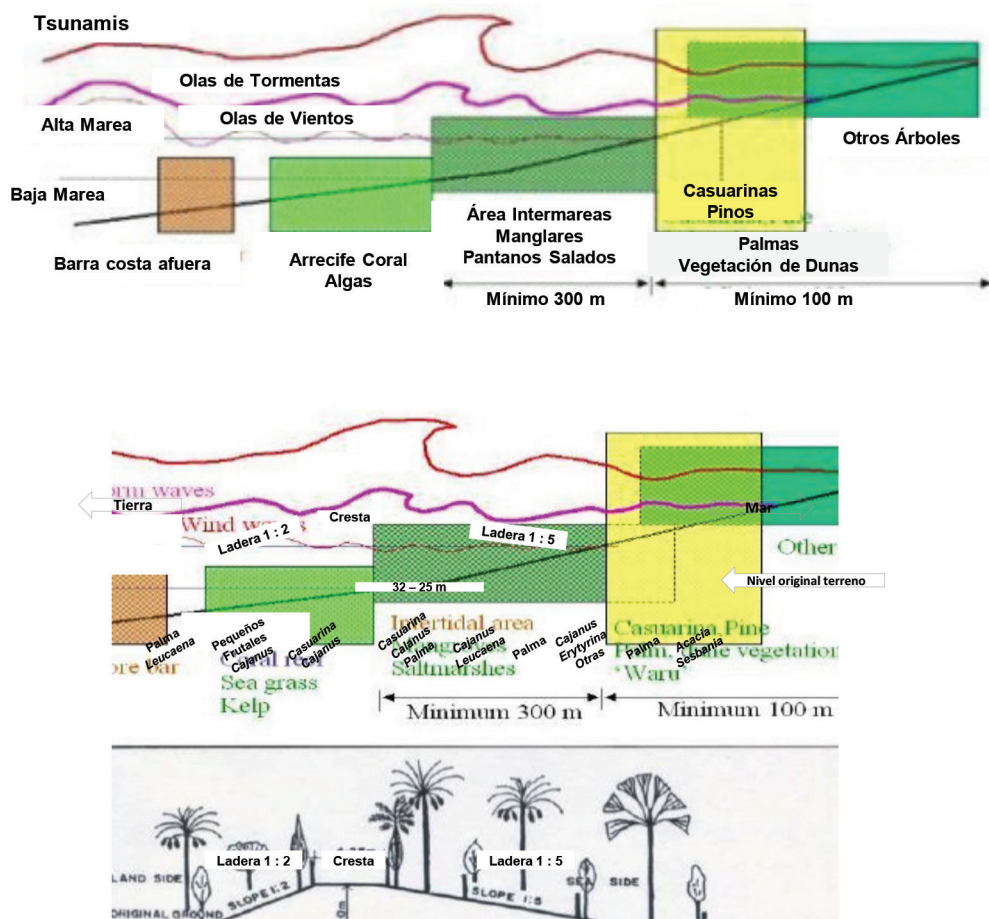
Los bosques costeros deben servir también para:

- Controlar, estabilizar y retener los sedimentos y consolidar tierras en áreas tales como marismas intermareales y costas de arena fina con diferentes especies vegetales, árboles, arbustos, herbáceas, según zonas agroecológicas.
- Ofrecer un atractivo y una fuente de alimentos, materiales e ingresos para las comunidades locales.
- Favorecer la biodiversidad y crear corredores de hábitat para la fauna en áreas que se puedan utilizar para actividades de conservación y desarrollo del ecoturismo.

En general, los conceptos subyacentes a la creación de zonas verdes o zonas de amortiguamiento, son según Clark (1995):

- Silvicultura social: Esta no debe ser considerada como una fuente de ingresos, sino como apoyo al desarrollo de los medios de subsistencia sostenibles en la comunidad costera.
- Ecodesarrollo: Esto es un efecto beneficioso para las actividades de conservación y las oportunidades educativas y recreativas.
- Planificación participativa, implementación y seguimiento: El conocimiento indígena y/o de las comunidades locales debe ser utilizado en la toma de decisiones.

La selección de la vegetación para la creación del cinturón verde o zona de amortiguamiento debe tener en cuenta la función natural de protección del sistema costero, como se ilustra en la Figura 7.



(Fuente: Clark, 1995 citado por Latief y Hadi, 2006, en FAO, 2007)

Figura 7. Las Funciones Protectoras Naturales de los Bosques (superior) y Árboles Costeros Combinando Diferentes Tipos de Árboles, Incluyendo Árboles Frutales, que Benefician a las Comunidades Locales (inferior)

Se debe analizar la línea costera para el establecimiento de la vegetación que se encuentra de forma local en cada tipo de costa. En la mayoría de los casos el ancho de la zona de amortiguamiento para los rangos del delta del intermareal es entre 300 y 500 metros, dependiendo de la pendiente del terreno. Luego se debe seleccionar la vegetación de playa que se encuentra de forma local en cada tipo de costa. El ancho de la zona de amortiguamiento debería tener un mínimo de 100 metros para el área plana, incluso con dunas de arena o terraplenes costeros.

Como ejemplo, en Hawaii se adoptó una política de crear un bosque de mitigación a lo largo de la costa Keaukaha, planificando un escudo arbóreo con múltiples propósitos, proporcionando protección contra las tormentas recurrentes y tsunamis (Preuss, 2006, en FAO, 2007).



(Fuente: Preuss, 2006, en FAO, 2007).

Figura 8. Área de Planificación con Integración de un Cinturón de Bosques a lo Largo de la Costa Keaukaha, Hawaii

Según Wolanski (2007), los bosques costeros se deben crear o restaurar para mejorar la capacidad de los estuarios y aguas costeras y proporcionar servicios ecológicos a la población humana que vive en sus orillas, así como para proteger la costa de daños por el viento, la sal, la erosión costera, los tifones, e incluso para salvar vidas humanas durante un tsunami. El autor señala que estos escudos no pueden proporcionar una protección completa, sino que deben ser parte del plan regional para reducir el riesgo de pérdida de vidas, bienes e infraestructura a un nivel aceptable. La elección adecuada de la vegetación depende de la gravedad de los peligros naturales, la batimetría y el clima, el uso local de la tierra, y las opciones disponibles para sobrevivir a los eventos extremos.

El mismo autor señala que la solución para proteger la costa contra los peligros naturales no es sólo local, sino que también la vegetación se debe utilizar para proteger a la población costera de deslizamientos de tierra en las zonas de montaña y a lo largo de las orillas del río.

FAO (2007) entrega algunos antecedentes acerca del rol de los bosques en las zonas costeras, señalando que estos pueden, bajo ciertas condiciones, actuar como escudos protectores de la vida y de valiosos activos contra los peligros costeros, entre ellos los tsunamis, los ciclones, el viento y la niebla salina y la erosión costera. También agrega que el grado de protección ofrecido por estas barreras costeras dependerá de las características del peligro, del sitio (batimetría, geomorfología costera) y de aquellas propias del bosque costero (tipo de bosque / árbol, ancho, altura y densidad del bosque).

FAO (2007) también advierte que se debe evitar hacer generalizaciones acerca de la función protectora de los bosques y los árboles basada en la evidencia de una o unas pocas áreas, los muchos factores que influyen en la función protectora de los bosques y árboles deben ser comprendidos y tomados en consideración antes de ser aplicados en otros lugares.

En sus conclusiones FAO (1998; 2007) agrega que los bosques costeros no son capaces de proporcionar una protección eficaz contra todo tipo de riesgos, como las grandes olas de un tsunami extremo y que otras formas de protección deben ser consideradas, evitando crear una falsa sensación de protección frente a amenazas costeras.

En su reporte FAO también señala que es reconocida la importancia de la incorporación de la protección costera, como parte integral de la planificación de estas zonas, y que las opciones de protección requieren de una combinación de ellas. Si ninguna de estas resulta apropiada y viable, puede ser necesario evitar el uso de la tierra en esa zona costera evitando los asentamientos y la construcción de activos valiosos en la zona vulnerable.

Sobre la composición de estos bosques costeros, FAO recalca y recuerda que es importante que coincidan las especies con el sitio con el fin de evitar la mortalidad. Algunos tipos de bosques y especies de árboles no pueden sobrevivir o prosperar en áreas expuestas a determinados riesgos costeros, por lo tanto no serán candidatos para ser incluidos en medidas de protección. El desarrollo de estos escudos no es posible en todas las situaciones debido a limitaciones biológicas, espacio, incompatibilidad con la tierra y usos prioritarios, costos prohibitivos y otras causas.

Finalmente, el documento de FAO indica que el nivel de conocimiento y comprensión de las funciones de los bosques y los árboles en la zona costera y su rol de protección sigue siendo insuficiente y que existe un déficit de investigación interdisciplinaria y de cooperación en este campo. Las áreas específicas que necesitan mayor atención incluyen la investigación en la costa del comportamiento de los bosques, la colecta de datos y el desarrollo de modelos sobre la interacción entre lo físico y los parámetros ecológicos.

Furukawa (2011)⁴ menciona que los bosques de manglares reducen la energía del oleaje por la interacción con el movimiento orbital de las partículas de agua y las raíces complejas, y que no se cuenta con normas de diseño ya que la situación varía según el lugar.

En forma resumida Furukawa señala que el ancho de diseño típico de los bosques debe ser varias veces mayor que la longitud de onda de espera (100 - 1000 m) y que las especies plantadas deben tener suficiente densidad y una adecuada altura de elevación (por ejemplo, *Ceriops sp*, *Sonneratia sp*, *Rhizophora sp*). La silvicultura (gestión) de los bosques también es importante para que la estructura permanezca sana (mantener la circulación del agua, algunas veces para ayudar a las plantaciones de reforestación después del daño). Reitera que algo muy importante es la participación de la población local en el proyecto. La educación y el conocimiento acerca de las funciones de los bosques son primordiales y el conocimiento sobre tsunamis y procedimientos de evacuación en el caso debe ser compartido.

Según Furukawa e Hiraishi (2006), si se cuenta con las especies adecuadas, la densidad y el ancho de un cinturón verde mitigarán los efectos de un tsunami, en términos tanto micro como macro. Sin embargo, la condición cambiará de lugar en lugar y esto crea situaciones diferentes para los procesos de mitigación. Por lo tanto, el proceso de diseño con respecto a un modelo de proceso físico es muy recomendable.

⁴Keita Furukawa, 2011. (Dr. Eng.). Head of Marine Environment Division, National Institute for Land and Infrastructure Management, Japan. Comunicación personal.

Los estudios señalan un resultado de reducción de la velocidad con la zona del bosque, en la parte delantera y en la parte posterior, mitigando el flujo de los procesos de un tsunami de manera significativa. Además, la onda de presión en frente del bosque es más grande que sin la presencia de él, lo que significa que el bosque se convierte en una barrera para el flujo de tsunami, mediante la transformación de la energía cinética en energía potencial. La presión máxima del tsunami por detrás del bosque se redujo a la mitad en relación a una situación sin protección. Esto significa que el proceso se mitiga por la presencia del bosque desde el un punto de vista macro (en el más amplio ámbito de la escala de 100 – 1000 m), mientras que el proceso de flujo se atenuó desde el punto de vista micro (escala de 1 -10 m).

Según Prasetya (2006) en FAO (2007), los problemas sociales y ambientales causados por el efecto del agua sobre el borde costero son relevantes y fáciles de observar, con un alto impacto en infraestructura, productividad, empleos, turismo y zonas urbanas. El problema se agrava cuando las medidas de protección de la costa han sido mal diseñadas, construidas y mantenidas, o cuando se establecen en lugares no apropiados, como delante de los hoteles o propiedades para proteger sus propias playas, lo que desprotege a la costa en general (Figura 9).



(Fuente: Prasetya, 2006, en FAO, 2007)

Figura 9. Esfuerzos de Protección Costera para Proteger el Turismo en Tanto la Costa Adyacente Tiene una Protección Mínima

Estas soluciones crean más problemas que respuestas, las medidas de protección deben integrarse, teniendo en cuenta las condiciones socioeconómicas y los procesos naturales que existen en la región.

Existe consenso en que se debe crear conciencia en el público a fin de garantizar una protección eficaz de sus hogares y negocios, la percepción pública de la seguridad es crítica. Durante el proceso de planificación, es frecuente que las personas señalen que se siente mucho más seguro detrás de un muro de hormigón que detrás de una playa y el bosque. En este contexto, una combinación de estructuras duras y blandas es aconsejable (Prasetya, 2006, en FAO, 2007).

Clark (1995) reitera que durante la planificación del uso de bosques y árboles costeros como medidas de protección de la costa es muy importante la participación de la comunidad al igual que en la implementación de estas medidas y su supervisión posterior, dado que esto aumentará la conciencia y conocimiento sobre estas soluciones y los beneficios para el ecosistema y todos los interesados. Este autor señala que bosques que han sido integrados a diques costeros, utilizan una variedad de árboles que otorgan no sólo una protección contra posibles riesgos, sino que también ofrecen diversos beneficios como frutas, paja, combustible y postes.

Este tipo de investigación científica, sobre la forma en que la vegetación costera proporciona protección al litoral, ha coincidido en sus resultados a través de diversos autores (Sale, 1985; Kobayashi *et al.*, 1993; Mazda *et al.*, 1997a y 1997b; Massel *et al.*, 1999; French, 2001; Blasco *et al.*, 1994; Moller *et al.*, 1999; Wu *et al.*, 2001; Baas, 2002; Jarvela, 2002; Méndez y Losada, 2004; Lee, 2005; Dean y Bender, 2006; Daidu *et al.*, 2006; Moller, 2006; Turker *et al.*, 2006).

Estos autores han demostrado que los bosques y otros tipos de vegetación costera de cierta densidad pueden reducir considerablemente la altura de ola y proteger la costa contra la erosión, y que pueden servir como un sistema de defensa costera cuando crecen en equilibrio con la erosión y la acumulación de procesos generados por las olas, los vientos y otras acciones naturales.

En base a estos estudios de campo, se ha determinado que en un evento mayor, la elevación de marea sube más rápido en la primera etapa de la marea y cae más lentamente en la fase posterior de reflujo debido a los efectos de la resistencia al flujo por la vegetación frondosa y el lodo del fondo.

Mazda *et al.*, (1997a) observaron los procesos físicos en los bosques en las zonas costeras de Thuy Hai y Truong Thuy, provincia de Binh Tailandia, y en Vietnam, en el delta del Golfo de Tonkin. El tamaño de la onda disminuye considerablemente a través de áreas de bosques (manglares) más densos, y en las zonas de manglares bien desarrollados, los efectos sobre la reducción de la ola no disminuyen con la profundidad del agua cada vez mayor, lo que tiene importantes implicaciones prácticas.

Según la investigación, la eficacia de los manglares de altura (de tres a cuatro años de edad) en la reducción de altura de la ola por cada 100 metros se elevó al 20 % y aumentó a 95 % cuando los árboles tenían seis años de edad. A esta edad, un metro de altura de ola en la costa abierta se reducirá a 0,05 metros en la costa en comparación con 0,75 metros, sin manglares.

La altura de la vegetación, su densidad, y el ancho de la zona a plantada son factores importantes en la reducción de altura de ola y la protección de la costa de la erosión. El efecto de la reducción de la onda es considerable, incluso cuando la profundidad del agua aumenta debido a la alta densidad de vegetación.

Mazda *et al.*, (2002) también analizan la erosión costera causada por las fuerzas de marea en Loang Hoa, Vietnam del Sur, que se encuentra en un amplio abanico aluvial y entre dos grandes ríos de marea; el Mui Nai y el Nga Bay. Con base en estudios de campo y numéricos, se encontró que la degradación de los manglares a lo largo de los ríos de marea llevó a la intensificación de las corrientes de marea en la desembocadura de los ríos y de la erosión en la costa.

Othman (1994) señala que una franja de 50 metros de ancho es suficiente para reducir las olas de un metro a una altura inferior a 0,3 metros. Señala que *Avicennia sp* (árbol de los manglares) es una especie pionera que desacelera corrientes a través de su sistema radicular y, junto con su tronco, atenúa la altura de las olas.

Cuanto más cerca están los árboles uno al otro, mayor es la energía de las olas que se reducirá. Un crecimiento de cinco años de *Avicennia sp* puede servir como un atenuador de onda eficiente. En el área de estudio detrás de la zona con *Avicennia sp*, especies de *Rhizophora* y *Bruguiera* contribuyen a reducir la altura de las olas y su velocidad.

Experimentos de Laboratorio

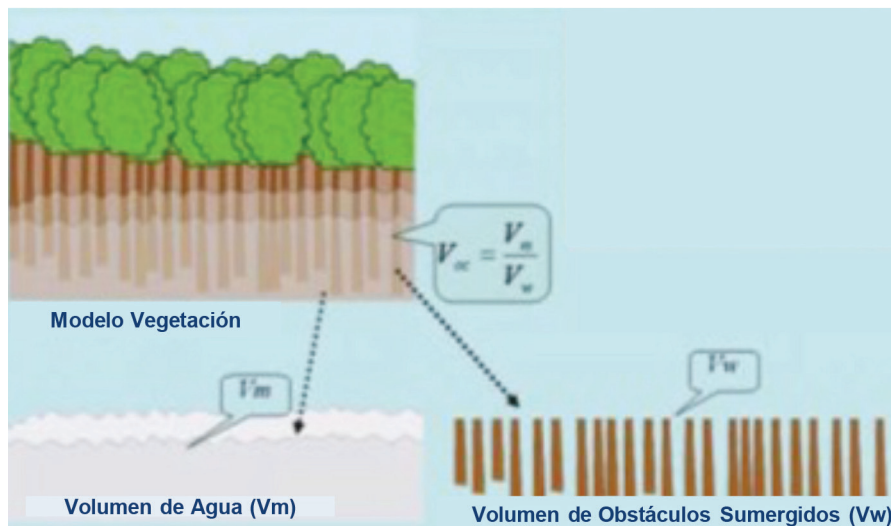
La capacidad de los bosques para mitigar el impacto de un tsunami ha sido estudiada por diversos investigadores, los que señalan que ella puede ser estimada por modelos de dinámica de fluidos.

Según lo expresan Latief y Hadi (2006) en FAO (2007), estos modelos examinan la relación hidrodinámica de un fluido en movimiento a través de la vegetación y requieren parámetros y coeficientes asociados a la estimación de la resistencia de los bosques a los tsunamis de diferentes alturas y presiones.

Los antecedentes más importantes se refieren a la ocupación volumétrica y los coeficientes de resistencia, inercia y rugosidad. Estos son estimados a partir de mediciones del diámetro y la altura de los troncos de árbol, la altura y la densidad de la cubierta, y la densidad de árboles.

En la Figura 10 se muestra que la ocupación volumétrica es una función del volumen de agua en relación con el volumen de los árboles sumergidos.

Una corriente de agua que golpea el tronco de un árbol y la transmisión de impacto y las fuerzas de fricción, junto con los coeficientes asociados a la inercia y arrastre, es lo que se representa en la Figura 10.



(Fuente: Latief y Hadi, 2006 en FAO, 2007)

Figura 10. Cuantificación del Volumen de Agua Modificado por la Presencia de Bosques en el Área Costera

El entorno de laboratorio controlado permite la medición de parámetros de las ondas que no son fácilmente mensurables en las condiciones naturales. Coops *et al.*, (1996) realizaron un estudio experimental en un tanque de oleaje para evaluar la interacción entre las olas, la erosión de las orillas y la vegetación emergente. Utilizaron dos especies *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steudel y *Scirpus lacustris* L., y dos tipos de sedimentos (arena y arena limosa) en un tanque de oleaje. Sus resultados mostraron que la menor erosión neta se midió en la zona cubiertas por la vegetación que en el área donde no había vegetación. La mayor atenuación de oleaje se midió en la vegetación plenamente desarrollada de las dos especies.

Struve *et al.*, (2003) combinaron experimentos de laboratorio (en canal de oleaje) y un modelo numérico de dos dimensiones (2D) para investigar la rugosidad adicional debida a la vegetación como un factor importante para influir en la velocidad y niveles de agua en los estuarios de manglar.

Los efectos de variar el diámetro del tallo y la densidad fueron probados y también se analizaron modelos lineales de distribución de los árboles. Los resultados del estudio mostraron que el cambio de velocidad a lo largo del canal de flujo está relacionada con la superficie de los árboles modelo. Una comparación entre la distribución del modelo de árbol escalonada y lineal indicó que el sistema tuvo un efecto basado en el tamaño y la interferencia de la onda.

Turker *et al.*, (2006) examinaron un cambio de perfil de playa bajo la protección de la vegetación emergente (*Phragmites australis* sin hojas) a través de diversas condiciones de las olas en un laboratorio. Los hallazgos mostraron que la vegetación emergente es un elemento relevante para la protección de playas, que tiende a minimizar la erosión e incluso llevarla a cero.

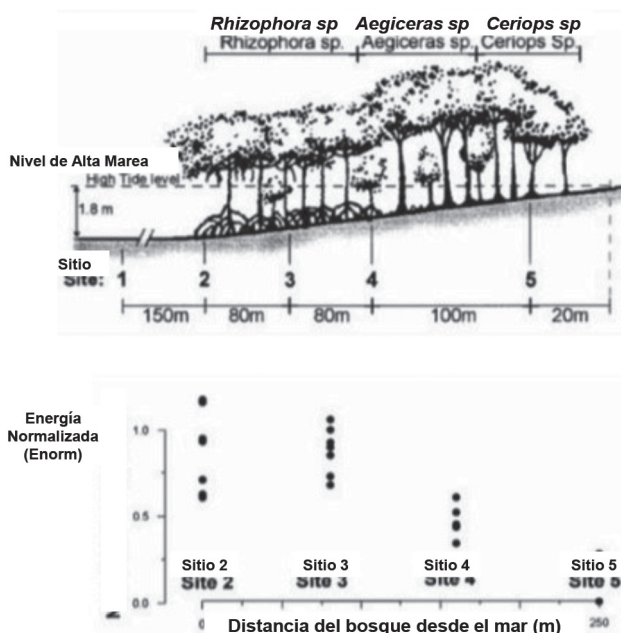
El área de vegetación absorbe energía de las olas considerablemente debido a la fricción y la fuerza de arrastre, el análisis experimental indicó que la cantidad de erosión es directamente proporcional a la altura de las olas, e inversamente proporcional a las partículas de sedimento y la densidad de la vegetación.

Modelo Numérico y Analítico de Estudios

Massel *et al.*, (1999) utilizaron un enfoque teórico para predecir la atenuación en el oleaje irregular en la superficie de bosque. La geometría de los troncos de manglar y su ubicación fueron tomadas en cuenta, mientras que la interacción entre los troncos y las raíces de mangle se utilizó a través de la modificación de los coeficientes de arrastre. Ejemplos de cálculos numéricos, basados en observaciones de la atenuación de ondas a través del bosque de manglar, demostraron que la tasa resultante de atenuación de energía de las olas depende en gran medida de la densidad del bosque, el diámetro de las raíces y los troncos.

Con una densidad muy baja de los árboles y las características del oleaje mismo, la energía de las olas se transmite con relativa facilidad a través del bosque de manglar, sin embargo, aproximadamente el 86% de la energía sigue siendo disipada por el bosque.

Las observaciones de campo (Figura 11) muestran casi los mismos resultados sobre cómo los bosques pueden atenuar las ondas de manera significativa a una distancia relativamente corta. La energía de las olas se reduce en un 75% a través de 250 m de árboles.



(Fuente: Massel et al., 1999)

Las mediciones en los sitios 2-5 muestran la disminución de la transmisión de ondas de energía a través del bosque de Manglar.

Figura 11. Atenuación de la Onda por un Bosque de Mangle (*Rhizophora sp.* *Aegiceras sp.*, *Ceriops sp.*).

Se reconoce la necesidad de analizar otros bosques y árboles costeros, como *Pandanus*, *Casuarina* y especies de *Pinus*, que no interactúan directamente con las olas en condiciones normales, pero lo hacen durante los eventos extremos como grandes tormentas y tsunamis. El conocimiento actual es suficiente para obtener una orientación general sobre la función protectora del bosque ribereño en la lucha contra la erosión costera. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la eficacia de cada especie en la protección de la costa de la erosión es muy específica del sitio.

En las zonas donde hay turismo, se ha señalado que se debe fomentar la plantación de árboles en una banda que se extienda prácticamente en forma ininterrumpida a lo largo de toda la costa. Esta banda de árboles tendrá un efecto positivo sobre el turismo también porque añade a la belleza natural de las áreas y proporciona sombra.⁵

⁵ <http://web.mit.edu/12.000/www/m2009/teams/2/rz.htm>

Se han realizado esfuerzos a gran escala para plantar cinturones de árboles exóticos en las costas expuestas, con la esperanza de proteger a las personas de futuros tsunamis o tempestades producidas durante las tormentas tropicales, como el huracán Katrina o el ciclón Nargis, concluyendo que existe evidencia de que la vegetación costera ofrece una protección significativa ante estos eventos, debiéndose en todo caso cuidar que la plantación introducida con árboles exóticos, bioshields, no cause un daño ambiental. Igualmente se señala que estas medidas se deben asociar a la educación, la alerta temprana y planes de evacuación⁶, recordando que los bosques pueden disminuir las inundaciones, pero no evitarlas.

Comentarios sobre el Rol Protector de los Bosques Costeros y su Aplicabilidad en Chile

Cifras recientes, derivadas del terremoto y tsunami de febrero del 2010 en Chile, ubican en cerca de US\$ 298 millones la inversión necesaria en recuperación de daños solo en la ciudad de Talcahuano y en cerca de US\$ 171 millones la necesaria para reconstruir 18 localidades costeras de la Región del Bio Bio.

Ello significa incurrir en montos elevados para reparación y reconstrucción, sin contar las pérdidas de ingresos que han percibido actores deprimidos de los sectores costeros entre las Regiones del Maule y Bio Bio.

La instalación de adecuadas y validadas barreras vegetales, es decir bosques y parques de mitigación, específicos para cada localidad, en conjunto con otras medidas de mitigación que se pueden abordar en forma conjunta, como elementos de disminución de daños, podrían disminuir en un importante porcentaje los impactos de las olas en un evento marino.

Los estudios revisados coinciden en la utilidad de este tipo de estructuras y en la necesidad de ser utilizadas en conjunto con otras obras de mitigación, haciendo partícipe a la comunidad local en su importancia, uso y cuidados.

La investigación en Chile aún no aborda este componente y en especial, las especies más indicadas para el uso en este tipo de estructura, existiendo alguna información o antecedentes en base a la experiencia o situaciones específicas localizadas, pero sin una investigación que apoye estas intervenciones.

⁶ http://www.redorbit.com/news/science/1803247/coastal_trees_poor_protection_against_tsunamis

Se requiere entonces, a nivel regional y nacional, la investigación, adopción e incorporación de nuevas tecnologías con especies forestales adecuadas a cada sitio. Se debe además, fomentar y difundir las potencialidades basadas en las características propias de las especies; posibilidad de desarrollar actividades comerciales de producción conjunta (turismo), y posibilidad de obtener productos no madereros (frutos, flores y hongos).

PROPUESTA INICIAL DE ESPECIES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE BOSQUES COSTEROS

En Chile no existe información ni experiencia previa sobre establecimiento de bosques costeros con fines de protección ante eventos marinos y sobre especies a utilizar en ellos. En consecuencia, esta primera propuesta se basa en especies probadas y empleadas en el control de dunas costeras en diferentes regiones del país (debido a la similitud de sitio) y en el conocimiento que INFOR tiene sobre el comportamiento de una cantidad de especies a lo largo del país, resultado de diversas líneas de investigación anteriores relacionadas con introducción y selección de especies, viverización de plantas, técnicas de establecimiento de plantaciones y manejo de estas con diferentes fines, y más recientemente, mejoramiento genético de diversas especies.

Es posible así proponer especies y técnicas de establecimiento y manejo acordes con las características de los bosques costeros que indica la bibliografía a fin de obtener barreras con las estructuras adecuadas para lograr un buen nivel de protección o mitigación ante eventos marinos extremos.

De las revisiones realizadas se desprende que existen especies forestales que INFOR y una serie de otros autores recomiendan para su establecimiento en la costa. Los autores diferencian entre las líneas frontales y otras de segundo nivel, considerando que algunas especies no son tan resistentes a la niebla salina y la exposición directa al mar (“marea”), pero pueden tener también un papel en la protección.

Existe una amplia gama de opiniones sobre la categoría de especies, siendo la más recomendada aquella de los manglares, sin embargo lamentablemente las especies que constituyen estas formaciones vegetales no se adaptan a las condiciones ambientales de la costa chilena ni las características de esta permiten ese tipo de formaciones vegetales.

En el país se está trabajando en el tema de la reconstrucción y recuperación de daños, con los llamados planes maestros, los cuales incluyen medidas de protección y mitigación a futuro, como parques de inundación y bosque de mitigación.

Son muchos los proyectos en marcha en las localidades mayormente afectadas por el tsunami del 27 de febrero de 2010, como Dichato, Puerto Saavedra, Llico y Constitución.

Especies Potenciales

Diversos ejemplos de especies que potencialmente pueden ser empleadas en la formación de bosques costeros, según diferentes autores y fuentes de información, son incluidos a continuación.

A lo largo del país y en áreas costeras susceptibles y sensibles a eventuales tsunamis, se podrá encontrar una variedad de sitios, dada por las condiciones generales de suelo y clima. Sabido es que las precipitaciones medias en general ascienden de norte a sur y un comportamiento inverso se registra con las temperaturas medias, que descienden hacia el sur. Variables estas que son determinantes en el sitio forestal y, en consecuencia, en las posibilidades de éxito y crecimiento de las especies.

Los suelos por su parte son también variables en sus principales propiedades físicas y químicas, varias de ellas también determinantes en la respuesta de las diferentes especies posibles de emplear.

Además, en las regiones en estudio es frecuente la presencia de extensas dunas costeras, estabilizadas o parcialmente estabilizadas, con una superficie de unas 54.000 ha (unas 18.000 ha en Maule y unas 36.000 ha en Bio Bio), áreas en las cuales los suelos arenosos y el eventual movimiento de arenas constituyen limitantes al establecimiento de plantaciones (Barros y Gutiérrez, 2011). No obstante, estas áreas en general probablemente no serán de interés en términos de establecimiento de bosques costeros de protección, dado que la elevación de estas dunas es por sí una protección y los trabajos de contención y forestación antes realizados complementan este efecto.

- Instituto Forestal

En 1962, con la creación del Instituto Forestal, se da inicio a un programa sistemático de introducción de especies forestales al país. Se efectúa una zonificación geográfica general sobre la base de grandes grupos de suelos y, entre los años 1962 y 1975, se cubre el país con más de 60 ensayos, entre las Regiones de Coquimbo y Aysén, en los cuales se prueba unas 200 especies, tanto coníferas como latifoliadas. En más de 8 mil parcelas pequeñas, de 49 plantas en los ensayos de la parte norte (hasta la Región de Valparaíso) y 100 plantas en aquellos de la parte sur, en un diseño de parcelas al azar con 3 repeticiones, se evalúa la adaptabilidad y desarrollo de una gran cantidad de especies durante más de 20 años.

Barros *et al.*, (1979 y 1979a) hacen una evaluación completa de estas experiencias, destacan los resultados a lo largo del país de acuerdo a una nueva zonificación del país con la que determinan la cobertura geográfica de los ensayos.

La zonificación se obtiene mediante la sobre posición cartográfica de los Grandes Grupos de Suelos (Roberts y Díaz, 1960. Cit. por Barros *et al.*, 1979a) y las Regiones Climáticas (Di Castri, 1975. Cit. por Barros *et al.*, 1979a) y se obtiene una subdivisión de país, desde Coquimbo a los Lagos, en tres grandes regiones; de norte a sur Mediterránea Semiárida, Mediterránea Central y Oceánica de Los Lagos, y cada una de estas subdividida a su vez en las que fueron denominadas Unidades Edafoclimáticas, dentro de cada una de las cuales se asume una cierta uniformidad de condiciones generales de suelo y clima. De estas unidades, aquellas que tenían al menos un ensayo representativo dentro de sus límites fueron consideradas unidades cubiertas por el programa.

Respecto de las áreas costeras de las Regiones del Maule y Bio Bio, la Unidades Edafoclimáticas ahí presentes son, de norte a sur; Constitución, Tomé y Lebu, en todas ellas la componente suelos está dada por el gran Grupo Praderas Costaneras y la de clima por la Región Mediterránea Húmeda Septentrional, Meridional y Perhúmeda, respectivamente, y abarcan una faja costera de unos 5 km de ancho.

La Unidad Constitución abarca desde Matanzas en la Región de O'Higgins hasta el límite sur de la Región del Maule, dentro de esta unidad la temperatura media anual es cercana a 14 °C y las precipitaciones medias de norte a sur son de 500 a 900 mm/año.

La Unidad Tomé, más pequeña, se extiende desde el límite sur de la Región del Maule hasta las cercanías de Tomé en la Región del Bio Bio. La temperatura media anual es de 12,3 °C y las precipitaciones medias de norte a sur varían de 900 a 1.500 mm/año.

La Unidad Lebu en tanto se ubica entre las cercanía de Tomé y la localidad de Tirúa, próxima al límite sur de la Región del Bio Bio. La temperatura media anual es de alrededor de 12 °C y las precipitaciones son algo mayores que las de la unidad anterior.

Estas unidades costeras en general no presentan grandes limitaciones climáticas para el establecimiento de plantaciones, salvo en la parte norte donde el período seco estival se hace muy notorio, aunque la influencia marina lo atenúa en parte. Desde el punto de vista de los suelos tampoco hay limitaciones, con la excepción de campos de dunas costeros y otros sectores de fuerte erosión en donde los contenidos de materia orgánica son bajos, especialmente en la parte norte de la unidad Constitución. Hacia el sur, en las Unidades Tomé y Lebu, los sitios son de buena calidad para el establecimiento de plantaciones con la excepción de los campos de dunas, principalmente en la Unidad Lebu (Figura 12).

Dado el escaso ancho de la faja costera que ocupan estas unidades, en la zonificación desarrollada por Barros *et al.*, (1979a) sólo se consideró cartográficamente cubierta por ensayos la Unidad Constitución, por el ensayo ubicado en Las Cañas, algo al sur de Constitución, y no así las Unidades Tomé y Lebu.

No obstante, la información obtenida en ensayos como San Antonio de Petrel (Unidad Paredones), levemente al interior de la faja costera cercano a Pichilemu, en la Región de O'Higgins; en Leonera (Unidad Concepción), algo al interior de Tomé; Antiquina (Unidad Arauco) algo al interior de la faja costera al sur de Cañete; y Amuley Cullinco (Unidad Arauco) en similar situación cercano a Tirúa, son confiablemente extrapolables a las unidades costeras (Figura 12).

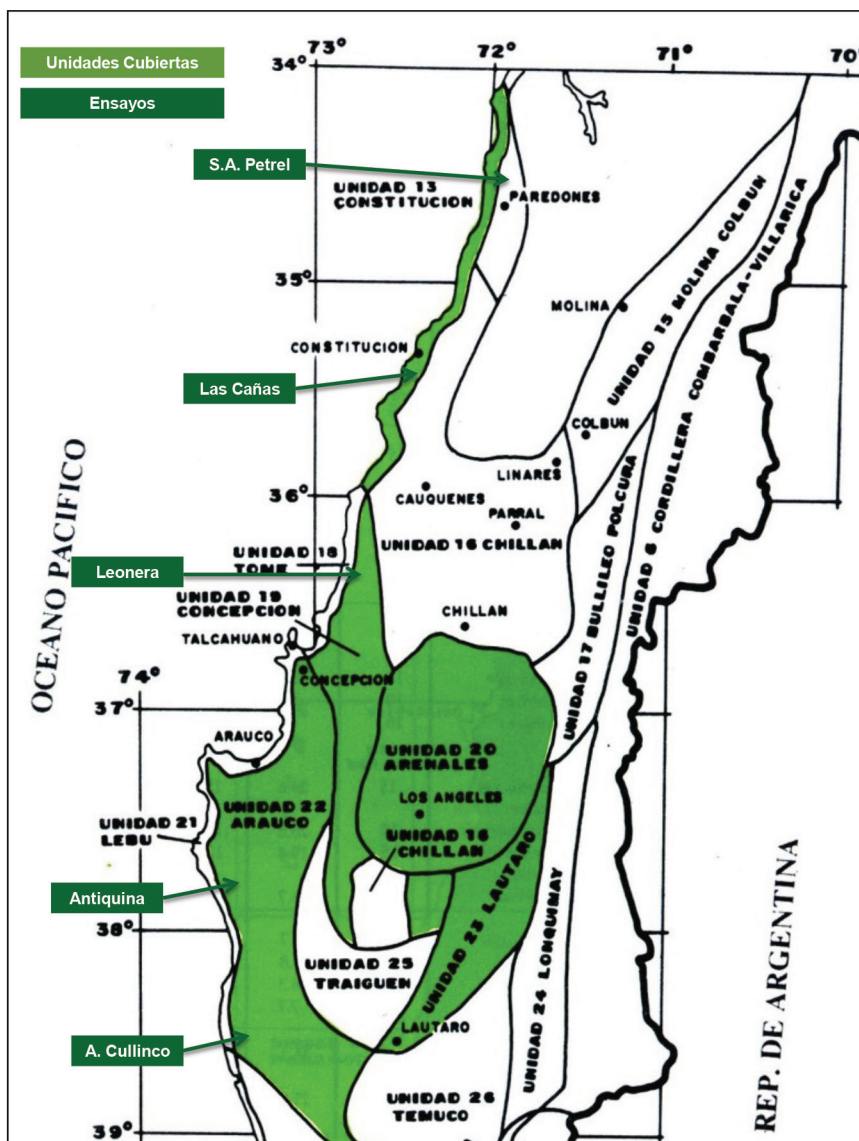


Figura 12. Unidades Edafoclimáticas Costa Regiones del Maule y Bio Bio
Constitución, Tomé y Lebu

Barros *et al.*, (1979a) recomiendan en forma general especies para la forestación en las distintas unidades sobre la base de los resultados obtenidos en los ensayos en ellas ubicados. Las especies señaladas de interés son las que se indica en el Cuadro 1, incluyendo la extrapolación de información indicada anteriormente desde ensayos ubicados en áreas algo más interiores, en la zona costera pero no en la faja costera definida por el Gran Grupo de Suelos Praderas Costaneras.

**Cuadro 1. Especies Arbóreas Sugeridas para Forestación Costa
Regiones de Maule y Bío Bío**

Unidades Edafoclimáticas	Constitución		Tomé	Lebu	
Ensayos	San Antonio de Petrel	Las Cañas	Leonera	Antiquina	Amuley Cullinco
Especies					
<i>Cupressus arizonica</i>		X			
<i>Eucalyptus bicostata</i>			X		
<i>Eucalyptus bosistoana</i>			X		
<i>Eucalyptus cornuta</i>	X		X		
<i>Eucalyptus delegatensis</i>	X		X	X	X
<i>Eucalyptus fastigata</i>	X	X	X	X	
<i>Eucalyptus globulus</i>	X	X	X	X	X
<i>Eucalyptus gomphocephala</i>	X				
<i>Eucalyptus grandis</i>	X		X	X	
<i>Eucalyptus maidenii</i>	X	X	X		
<i>Eucalyptus melliodora</i>	X	X			
<i>Eucalyptus nitens</i>	X	X	X	X	
<i>Eucalyptus obliqua</i>	X		X		
<i>Eucalyptus regnans</i>	X	X	X	X	X
<i>Eucalyptus resinifera</i>	X				
<i>Eucalyptus saligna</i>	X	X	X		
<i>Pinus contorta</i>	X			X	
<i>Pinus coulteri</i>	X				
<i>Pinus elliotii</i>				X	
<i>Pinus leiophylla</i>		X	X	X	
<i>Pinus muricata</i>		X	X	X	
<i>Pinus patula</i>			X		
<i>Pinus ponderosa</i>		X			
<i>Pinus radiata</i>	X	X	X	X	X
<i>Pinus taeda</i>				X	
<i>Pseudotsuga menziesii</i>		X			

(Fuente: Barros et al., 1979a)

- Otras Fuentes de Información

Diversas otras fuentes proporcionan información sobre especies recomendables para emplear en bosques costeros.

Ian Nicholas⁷ (2012) y ARC (2000) entregan ejemplos de posibles especies para el uso en zonas costeras con tolerancia a la sal, listado que se presenta en el Cuadro 2. Matthews (1905) (Cit. por Nicholas, 2011) indica un listado de árboles, arbustos y pastos apropiados para plantaciones costeras (Cuadro 3). La Forestry Commission de New South Wales (1970) Australia, recomienda algunas especies adecuadas para igual fin (Cuadro 4) y Pottinger (1981) entrega también información al respecto (Cuadro 5).

Cuadro 2. Especies Potenciales para su Uso en Bosques Costeros

Especie	Tolerancia Costera	Potencial Comercial
<i>Casuarina glauca</i>	****	***
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	***	***
<i>Eucalyptus botryoides</i>	****	****
<i>Eucalyptus pilularis</i>	***	****
<i>Eucalyptus leucoxylon</i>	***	****
<i>Cupressus macrocarpa</i>	****	****
<i>Metrosideros excelsa</i>	****	**
<i>Acacia melanoxylon</i>	**	****
<i>Pinus muricata</i>	***	***
<i>Pinus pinaster</i>	***	***

(Fuente: Ian Nicholas, Com. Pers.)

⁷ Ian Nicholas, Consultor Forestal, New Zeland, Comunicación personal.

Cuadro 3. Árboles, Arbustos y Pastos Recomendados para Sitios Costeros

Árboles	Arbustos	Pastos
<i>Acer pseuoplatanus</i> (Sycamore)	<i>Coprosma baueri</i>	<i>Arundo conspicua</i>
<i>Acacia pyracantha</i> (Golden Wattle)	<i>Cytisus scoparius</i>	<i>Elymus arenarius</i>
<i>Alnus glutinosa</i> (Common Alder)	<i>Eunonymus japonicus</i>	<i>Mesembryanthemum</i>
<i>Araucaria</i> (all species)	<i>Escallonia macracantha</i>	<i>Phormium tenax</i>
<i>Corynocarpis laevigata</i>	<i>Hippophae rhamnoides</i>	<i>Psammna arenaria</i>
<i>Cordyline australis</i>	<i>Lavatera arborea</i>	
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i> (Lawson Cypress)	<i>Lycium afrum</i>	
<i>Cupressus macrocarpa</i> (Monterey Cypress)	<i>Olearia aviceunifolia</i>	
<i>Casuarina quadrivalvis</i> (She, or Swamp Oak)	<i>O. colensoi</i>	
<i>Griselinia littoralis</i> (Broadleaf)	<i>O. traversii</i>	
<i>Laburnum vulgare</i> (Laburnum)	<i>O. forsterii</i>	
<i>Myoporum laetum</i>	<i>Pittosporum</i>	
<i>Pinus austriaca</i>	<i>Plagianthus divercatus</i>	
<i>P. canariensis</i>	<i>Rhamnus frangula</i>	
<i>P. virginiana</i> (Scrub Pine)	<i>Senecio huntii</i>	
<i>P. radiata</i> (Monterey Pine)	<i>S. rotundifolius</i>	
<i>P. muricata</i> (Prickly Coned Pine)	<i>S. muellerii</i>	
<i>P. rigida</i> (Pitch Pine)	<i>Tamarix gallica</i>	
<i>P. halepensis</i> (Aleppo Pine)	<i>Ulex europaeus</i>	
<i>P. laricio</i> (Corsican Pine)	<i>Veronica elliptica</i>	
<i>P. pinaster</i> (Cluster Pine)	<i>V. arborea</i>	
<i>P. cembra</i> (Stone Pine)	<i>V. benthamii</i>	
<i>Populus spp.</i> , most species (Poplar)	<i>V. liquustrifolia</i>	
<i>Pyrus aucuparia</i> (Rowan Tree)	<i>V. macrocoura</i>	
<i>Quercus ilex</i> (Evergreen Oak)	<i>V. salicifolia</i>	
<i>Q. stellata</i> (Post Oak)		
<i>Salix spp.</i> (Willows)		
<i>Thuja occidentalis</i> (Arborvitae)		
<i>Ulmus montana</i> (Scots Elm)		

(Fuente: Matthews, 1905. Citado por Nicholas, 2011)

Cuadro 4. Especies Recomendadas para Sitios Costeros

Especie	Altura a los 10 Años (m)
<i>Acacia cyanophylla</i>	3
<i>A. longifolia</i>	6
<i>Albizia lophantha</i>	4
<i>Araucaria heterophylla (A.excelsa)</i>	30+
<i>Callistemon salignus</i>	5
<i>Casuarina distyla</i>	5
<i>C. incana</i>	9
<i>C. glauca</i>	18
<i>C. stricta</i>	6
<i>Elaeodendron australe</i>	12
<i>Eucalyptus botryoides</i>	18
<i>E. ficifolia</i>	9
<i>E. gummifera</i>	24
<i>E. leucoxylon var. macrocarpa</i>	9
<i>E. robusta</i>	18
<i>Hymenosporum flavum</i>	12
<i>Lagunaria patersonia</i>	9
<i>Leptospermum laevigatum</i>	3
<i>L. petersonii</i>	5
<i>Melaleuca halmaturorum</i>	3
<i>M. hypericifolia</i>	3
<i>M. pubescens</i>	6
<i>M. quinquenervia</i>	6
<i>Myoporum insulare</i>	5
<i>Pittosporum undulatum</i>	8
<i>Tristania laurina</i>	12
<i>Metrosideros excelsa</i>	9
<i>Pinus elliottii</i>	24
<i>Quercus ilex</i>	12

(Fuente: Forestry Commission of New South Wales, 1970)

**Cuadro 5. Especies Recomendadas para Protección
según Resistencia a la Salinidad**

Especie	Altura al Año 10 (m)
Mayor Tolerancia a la salinidad	
<i>Atriplex</i> spp.	1-3
<i>Coprosma repens</i>	3
<i>Cortaderia selloana</i>	2
<i>Metrosideros</i> spp.	8-20
<i>M. excels</i>	20
<i>Myoporum serratum</i>	5
<i>Olearia traversii</i>	8
<i>Phormium tenax</i>	2-3
<i>Teucrium fruiticans</i>	2
Tolerancia a la salinidad	
<i>Araucaria excelsa</i>	10
<i>Banksia integrifolia</i>	10
<i>Buddleia salvifolia</i>	5
<i>Coroklia macrocarpa</i>	4
<i>Cupressus macrocarpa</i>	20
<i>C. macrocarpa</i>	8
<i>Cupressus sempervirens stricta</i>	8-10
<i>Cytisus proliferous</i>	5
<i>Eunonymus japonica</i>	2-5
<i>Griselinia littoralis</i>	3
<i>Lagunaria patersonii</i>	7
<i>Olearia albida</i>	5
<i>O. angulata</i>	5
<i>Pittosporum</i> spp.	3-8
<i>P. crassifolium</i>	8
<i>P. tenuifolium</i>	5
<i>Pomaderris apetala</i>	5
<i>Pseudopanax lessonii</i>	7

(Fuente Pottinger, 1981).

Como se aprecia en los cuadros precedentes, tanto de las experiencias de INFOR en el país como de las recomendaciones de diversas fuentes del exterior existe una gran cantidad de especies utilizables para el diseño y establecimiento de bosques costeros. En el desarrollo del proyecto se está ahora recopilando mayor información sobre las especies, tanto en lo que se refiere a su aplicabilidad a las condiciones de suelo y clima de las Unidades Edafoclimáticas del área de estudio, aspecto ya probado en aquellas sugeridas por INFOR, como de sus características estructurales para la conformación de barreras vegetales de protección costera.



Casuarina cunninghamiana



Acacia melanoxylon



Pinus pinaster



Eucalyptus pilularis



Araucaria excelsa



Cupressus sempervirens var stricta



Cupressus macrocarpa

COMENTARIOS FINALES

La erosión costera y la acumulación de material de arrastre en la costa son procesos naturales, sin embargo, pueden convertirse en un problema cuando las áreas de riesgo de desastres naturales como los tsunamis son pobladas y ocupadas por obras de infraestructura, industrias y otras. Esta situación está muy extendida en las zonas costeras de Asia y otros países en los océanos Índico y Pacífico. La combinación de diversas fuerzas latentes de naturaleza con el crecimiento demográfico y el desarrollo económico no regulado a lo largo de la costa, genera situaciones de alto riesgo de pérdidas humanas y materiales en zonas que se sabe serían afectadas por los eventos marinos asociados a grandes sismos.

Chile no es la excepción, las áreas costeras concentran población y actividad económica prácticamente al nivel de mar o a escasos metros sobre este. El país es de alto riesgo, en promedio desde 1570 se produce cada 4 años un terremoto de magnitud 7 o más y cada 14 uno que provoca tsunami. Son conocidas las zonas de mayor riesgo a lo largo del país y no se regula su uso, los únicos planes de contingencia adoptados en el borde costero son los referentes a cierta educación en cuanto al procedimiento ante emergencias y las rutas de escape.

En otras áreas de riesgo en diferentes países existe cierta experiencia respecto de medidas de protección, mitigación y entre estas se cuenta el establecimiento de bosques costeros que den cierta protección ante los tsunamis reduciendo en alguna medida la altura y energía con que las olas entran a tierra.

En el desarrollo del proyecto se ha reunido información sobre estos métodos y sobre especies vegetales a emplear para establecer bosques costeros en el caso chileno, información que se resume en el presente documento de trabajo.

Los pasos siguientes, que están en desarrollo, se enfocan a reunir la información sobre estas especies, no solo desde el punto de vista de su desarrollo en las áreas costeras sino que de su aptitud o utilidad en términos de la estructura y el efecto de las barreras vegetales protectoras que se pueda crear con ellas. Realizado esto, se diseñarán y establecerán un par de bosques costeros piloto en áreas de riesgo en las Regiones en estudio.

Algunas conclusiones son posibles de extraer de la información recopilada en cuanto al rol que los bosques y árboles costeros pueden desempeñar en la lucha contra la erosión costera y la mitigación de daños ante eventos marinos extremos.

- Existe consenso respecto que este tipo de estructuras proporcionan alguna protección al litoral y que la extracción de la vegetación en donde la había ha incrementado la vulnerabilidad de las costas.

- Con base en los hallazgos científicos, se puede afirmar que la presencia de vegetación en las zonas costeras mejora la estabilidad de taludes, la consolidación de los sedimentos y disminuye la cantidad de energía de las olas en movimiento en tierra, aumentando así la protección de la costa.

- Se ha determinado que si el objetivo es reducir el movimiento hacia el interior y la velocidad de las ondas de un tsunami, una de las estrategias de manejo debe enfocarse en conservar o restablecer la vegetación de las dunas de protección y en la plantación de bosques en el litoral. Estas acciones deben insertarse en las políticas de uso de la tierra.

- Existe un mayor interés en las opciones denominadas blandas (uso de bosques y árboles costeros) para la protección costera y estas están predominando y se deben sumar a esto conocimientos más avanzados sobre los procesos costeros. Esto se debe a que las opciones denominadas duras son en general satisfactorias en el corto plazo, mientras que las opciones blandas son eficaces en el mediano y largo plazo.

- Una combinación de soluciones duras y blandas a veces es necesaria para mejorar la eficiencia de las opciones y para proporcionar un sistema ambiental y económicamente aceptable de protección costera.

- Se requiere a nivel país un proceso de investigación de la aplicabilidad de este tipo de barreras.

- Es necesario identificar las especies apropiadas para su uso en el establecimiento de las barreras vegetales en Chile, según las distintas situaciones que se presenten en el borde costero a lo largo del país.

- En términos de protección contra los tsunamis, la investigación señala que, como regla general, el bosque costero debe presentar una ancho de 200 a 500 metros y con una cobertura densa para poder ofrecer protección de vidas humanas frente a un tsunami no superior a cuatro metros de altura. Se reconoce además, que estos bosques no protegerán de la misma forma ante tsunamis más grandes. Por ello, la decisión de crear este tipo de estructuras vegetales requiere necesariamente ser complementada por otro tipo de medidas, tales como alarmas de alerta temprana, educación ante riesgos y planes de evacuación, entre otros.

REFERENCIAS

Alongi, D. M. 2008. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76:1-13. Consultado el 12 de abril de 2011. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/1694/169414455005.pdf>).

ARC. 2000. Auckland regional council, 2000. Technical Publication No. 130. Coastal Erosion Management Manual.

Baas, A. C. W., 2002. Chaos, Fractals and Self-Organization in Coastal Geomorphology: Simulating Dune Landscapes in Vegetated Environments. *Geomorphology*, 48: 309–328.

Ba-Thuy A, Katsutoshi Tanimoto B, Norio Tanaka. 2010. Flow and potential force due to runup tsunami around a coastal forest with a gap – experiments and numerical simulations. *Science of Tsunami Hazards*, V.29 (2): 43.

Barros, S.; Rojas, P.; Barros, D.; Navia, P.; Vita, A.; Toro, J. y Cogollor, G., 1979. Informe I. Situación Actual de los Programas de Introducción de Especies Forestales en Chile. Proyecto CONAF/PNUD/FAO/CHI – 76 – 003. Instituto Forestal – Universidad de Chile. 386 p. Mapas y Anexos.

Barros, S.; Prado, J.A.; Elgueta, H.; Rojas, P.; Barros, D.; Navia, P.; Vita, A.; Cogollor, G.; Toro, J. y Caldentey, J., 1979a. Informe II. Áreas Cubiertas por Ensayos de Introducción de Especies y Ubicación de Nuevas Experiencias. Proyecto CONAF/PNUD/FAO/CHI – 76 – 003. Instituto Forestal – Universidad de Chile. 90 p. Mapas y Anexos.

Barros S, y Gutiérrez, J. O., 2011. Control y Forestación de Dunas Costeras en Chile. En: *Ciencia e Investigación Forestal*. Instituto Forestal, Chile. Vol.17 N° 1. Abril 2011.

Bird, E. C. F. & O. S. R. Ongkosongo, 1980. Environmental Changes on the Coast of Indonesia. NRTS-12/UNUP-197. Tokyo Japan, The United Nation University. 55 pp.

Bilan, D., 1993. The Preliminary Vulnerability Assessment of the Chinese Coastal Zone due to Sea Level Rise. *Proceedings of the IPCC Eastern Hemisphere Workshop*, Tsukuba, Japan 3–6 August 1993.

Blasco, F., Janodet, E. & M. F. Bellan, 1994. Natural Hazards and Mangroves in the Bay of Bengal. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No.12: 277–288.

Cat, N. N., Tien, P. H., Sam, D. D. & N. N. Bien, 2006. Status of Coastal Erosion of Vietnam and Proposed Measures for Protection.

Clark, J. R.. 1995. Coastal Zone Management Handbook. Lewis. 695 pp.

Coops, H., Geilen, N., Verheij, H.J., Boeters, R. and Van der Velde, G., 1996. Interaction Between Waves, Bank Erosion and Emergent Vegetation: An Experimental Study in a Wave Tank. *Aquatic Botany*, 53: 187–198.

Dahdouh-Guebas, F., Jayatissa, L.P., Di Nitto, D., Bosire, J.O., Lo Seen, D., Koedam, N, 2006. How effective were mangroves as a defence against the recent tsunami? *Current biology* 15, R443ER447

Daidu, F., Guo, Y., Wang, P. & J. Z. Shi, 2006. Cross-Shore Variations in Morphodynamic Processes of an Open-Coast mudflat in the Changjiang Delta, China: With an Emphasis on Storm Impacts. *Continental Shelf Research*, 26: 517–538.

Danielsen, F., Sorensen, M.K., Olwig, M.F., Selvam, V., Parish, F., Burgess, N.D., Hiraishi, T., Karunagaran, V.M., Rasmussen, M.S., Hansen, L.B., Quarto, A., Suryadiputra, N., 2005. The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation. *Science* 310, 643.

Dean, R. G. & C. J. Bender, 2006. Static Wave Setup with Emphasis on Damping Effects by Vegetation and Bottom Friction. *Coastal Engineering*, 53: 149–156.

FAO. 1998. Integrated coastal area management and agriculture, forestry and fisheries. FAO document repository, www.fao.org.PART C.

FAO, 2007. Proceedings of the Regional Technical Workshop Coastal Protection in the Aftermath of the Indian Ocean Tsunami: What Role for Forests and Trees?. Compiled and edited by Susan Braatz, Serena Fortuna, Jeremy Broadhead and Robin Leslie. Khao Lak, Thailand, 28–31 August 2006.

Forestry Commission of NSW. 1970: Trees and Shrubs 1969-1970. New South Wales Forestry Commission Tree Nurseries

French, P. W. 2001. Coastal Defences: Processes, Problems & Solutions. Florence, KY, USA, Routledge. <http://site.ebrary.com/>

Fritz, H.; Petroff, C.; Catalán, P.; Cienfuegos, R.; Winckler, P.; Kalligeris, N.; Weiss, R. et al. 2011. Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. Pure and Applied Geophysics: 168:1989-2010.

Furukawa, K. and Hiraishi, T., 2006. Overview of Physical Characteristics of the Wave-Mangrove Interaction. Proceedings of the international conference and exhibition on mangroves of Indian and western pacific oceans, 21 – 24 August 2006 Kuala Lumpur. p. 137-155

Gallaher, T.; Kaufman, A.; Irvine, A. Towards, 2010. A Tsunami Bio-Shield Design for the Pacific: Observations from Upolu, Samoa. University of Hawai i at Manoa.
http://www.pacificdisaster.net/pdnadmin/data/original/WSM_2010_Bioshield_Tsunami_poster.pdf

Gopinath, G. & P. Seralathan, 2005. Rapid Erosion of the Coast of Sagar Island, West Bengal – India. Environment Geology, 48: 1058–1067.

Hiraishi, T., Harada, K., 2003. Greenbelt tsunami prevention in south pacific region. Report of the Port and Airport Research Institute 42, 1E23. Consultado el 6 de abril de 2011. Disponible en: http://eqtap.edm.bosai.go.jp/useful_outputs/report/hiraishi/data/papers/greenbelt.pdf.

Huq, S., Karim, Z., Asaduzzaman, M. & F. Mahtab (Eds.), 1999. Vulnerability and Adaptation to Climate Change in Bangladesh. Dordrecht, the Netherlands, J. Kluwer Academic Publishers. 147 pp.

Jarvela, J., 2002. Flow Resistance of Flexible and Stiff Vegetation: a Flume Study with Natural Plants. Journal of Hydrology, 269: 44–54.

Kamphuis, J. W., 2002. Introduction to Coastal Engineering and Management. Advance Series in Ocean Engineering. World Scientific. 437 pp.

Kar. R and R. Kar. 2005. Mangroves can check the wrath of tsunami. Current Science, 88(5):675, 2005.

Kathiresan, K., Rajendran, N., 2005. Coastal mangrove forests mitigated tsunami. Estuarine, Coastal and Shelf Science 65, 601-606.

Khazai, B., Ingram, J. & D. Saah. 2007. The protective role of natural and engineered defense systems in coastal hazards. Report prepared for the Kaulunani urban and community forestry program of the department of land and natural resources, Hawaii, 69 p.

Kobayashi, N., Raichle, A. W. & T. Asano, 1993. Wave Attenuation by Vegetation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(1): 30–48.

Latief, H. and Hadi, S. 2006. The Role of Forests and Trees in Protecting coastal Areas Against Tsunamis. *Proceedings of the Regional Technical Workshop: Coastal protection in the aftermath of the Indian Ocean tsunami: What role for forests and trees?.* Khao Lak, Thailand, 28–31 August 2006.

Lee, T. M. 2005. Monitoring the Dynamics of Coastal Vegetation in Southwestern Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 111: 307–323.

Malini, B. H. & K. N. Rao, 2004. Coastal Erosion and Habitat Loss along the Godavari Delta Front. A Fallout of Dam Construction ?. *Current Science*, 87 (9): 1232–126.

Massel, S. R., Furukawa, K. & R. M. Brinkman, 1999. Surface Wave Propagation in Mangrove Forests. *Fluid Dynamics Research*, 24: 219–249.

Mazda, Y., Wolanski, E., King, B., Sase, A., Ohtsuka, D. & M. Magi, 1997a. Drag Force due to Vegetation in Mangrove Swamps. *Mangroves and Salt Marshes*, 1: 1993–1999.

Mazda, Y., Magi, M., Kogo, M. & N. P. Hong, 1997b. Mangroves as a Coastal Protection from Waves in the Tong King delta, Vietnam. *Mangroves and Salt Marshes*, 1: 127–135.

Mazda, Y., Magi, M., Nanao, H., Kogo, M., Miyagi, T., Kanazawa, N. & D. Kobashi, 2002. Coastal Erosion due to Long-Term Human Impact on Mangrove Forests. *Wetlands Ecology and Management*, 10: 1–9.

Mazda Y, Magi M, Ikeda Y, Kurokawa T, Asano T. 2006. Wave reduction in a Mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp.. *Wetlands Ecology and Management* 14: 365–378.

Mendez, F. J. & Losada, I. J., 2004. An Empirical Model to Estimate the Propagation of Random Breaking and Nonbreaking Waves over Vegetation Fields. *Coastal Engineering*, 51: 103–118.

Moller, I., Spencer, T., French, J. R., Leggett, D.J. & M. Dixon, 1999. Wave Transformation over Salt Marshes: A Field and Numerical Modeling Study from North Norfolk, England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49: 411–426.

Moller, I., 2006. Quantifying Saltmarsh Vegetation and its Effect on Wave Height Dissipation; Results from a UK East Coast Saltmarsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, XX: 1–15.

Nicholas, I., 2011. Species Selection for Coastal Situations. Internal Report. Rotorua, New Zeland, 8p.

Nurkin, B., 1994. Degradation of Mangroves Forest in South Sulawesi, Indonesia. *Hydrobiologia*, 285: 271–276.

Olwig, M.F., Sorensen, M.K., Rasmussen, M.S., Danielsen, F., Selvam, V., Hansen, L.B., Ryborg, L., Vestergaard, K.B., Parish, F. and Karunakaran, V.M., 2007. Using remote sensing to assess the protective role of coastal woody vegetation against tsunami waves. *International Journal of Remote Sensing*, 28, pp. 3153–3169.

OPS, 2010. Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS) 2010. El Terremoto y Tsunami del 27 de Febrero en Chile. Crónica y Lecciones Aprendidas en el Sector Salud. Disponible en: <http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc18151/doc18151-contenido.pdf>

Othman, M. A., 1994. Value of Mangroves in Coastal Protection. *Hydrobiologia*, 285: 277–282.

Pottinger, B., 1981: Shelter Recommended Species for Coastal Farming Regions Aglink FPD390. Media Services, MAF, Private Bag, Wellington

Sale, E. V., 1985. Forest on Sand, the Story of Aupouri State of Forest. The New Zealand Forest Service.

Samarayanke, R. A. D. B., 2003. Review of National Fisheries Situation in Sri Lanka. In: G. Silvestre, L. Garces, I. Stobutzki, M. Ahed, R.A. Valmonte-Santos, C. Luna, L. Lachica-Alino, P. Munro, V. Christense & D. Pauly (Eds.) Assessment, Management and Future Direction of Coastal Fisheries in Asian Countries, pp. 987–1012. World Fish Center Conference Proceedings 67. 1120 pp.

Struve, J., Falconer, R. A. & Y. Wu, 2003. Influence of Model Mangrove Trees on the Hydrodynamics in a Flume. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58: 163–171.

Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M.L.M., Jinadasa, K. B. S. N., Homchuen, S. 2007. Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: 49 Experience of the recent Indian Ocean tsunami. *Landscape and Ecological Engineering* 3:33-45.

Tanaka, N. (2009). Vegetation Bioshields for Tsunami Mitigation: Review of effectiveness, limitations, construction, and sustainable management. *Landscape and Ecological Engineering*, Vol. 5(1): 71-79.

Thampanya, U., Vermaat, J. E., Sinsakul, S. & N. Panapitukkul, 2006. Coastal Erosion and Mangrove Progradation of Southern Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68: 75–85.

Turker, U., Yagci, O. & M.S. Kabdasl, 2006. Analysis of Coastal Damage of Beach Profile under the Protection of Emergent Vegetation. *Ocean Engineering*, 33: 810–828.

Vermaat, J.E., Thampanya, U., 2006. Mangroves Mitigate Tsunami Damage: A further response. *Estuarine. Coastal and Shelf Science* 69: 1-3.

Wolanski, E., 1992. Hydrodynamics of Mangroves Swamp and their Coastal Waters. *Hydrobiologia*, 247: 141–161.

Wolanski, Eric, 2007. Protective Functions of Coastal Forests and Trees against Natural Hazards. In: *Coastal Protection in the Aftermath of the Indian Ocean Tsunami: What Role for Forests and Trees?* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand, pp. 157-179. <http://www.fao.org/docrep/010/ag127e/ag127e00.HTM>

Wu, Y., Falconer, R.A. & J. Struve, 2001. Mathematical Modeling of Tidal Currents in Mangroves Forests. *Environmental Modelling & Software*, 16: 19–29.

OFICINA DIAGUITAS

Km 5 costado aeródromo La Florida, La Serena
Fono / Fax: (56-41) 543627

SEDE METROPOLITANA

Sucre 2397, Ñuñoa, Santiago
Fono: (56-2) 23667100 - Fax: (56-2) 23667131

SEDE BIO BIO

Camino a Coronel km 7,5, San Pedro de la Paz, Concepción
Fono / Fax: (56-41) 2853260

SEDE VALDIVIA

Fundo Teja Norte s/n, Valdivia
Fono: (56-63) 218968

OFICINA PATAGONIA

Camino Coyhaique Alto km 4, Coyhaique
Fono: (56) 98831860