

ENERGÍA EÓLICA Y LA PRODUCCIÓN DE DESECHOS FORESTALES PARA LA PROTECCIÓN DE LOS CAUCES DE AGUAS EN AREAS BOSCOSAS

- (1) Oscar Bustos Letelier, Ingeniero Forestal, Ph.D., obustos@utalca.cl, Fono: 56-71-242815, Fax: 56-71-200428, 2 Norte N°685, Talca, Chile.
- (2) Carlos Mena Frau, Dr., cmena@utalca.cl
- (3) Yony Ormazabal, Ingeniero Forestal, M.Sc., yormazabal@utalca.cl

Resumen

El efecto del viento sobre la caída natural de los árboles de un bosque en áreas de protección de los cauces de agua es una importante fuente de energía de desechos forestales, lo que incide en un mejoramiento del hábitat de los peces y tiene influencia en la morfología del cauce.

El presente trabajo presenta un modelo matemático que permite estimar la velocidad crítica del viento como una fuente de energía en la caída de los árboles hacia los cauces de agua.

Este modelo fue establecido desde una base de datos obtenidos de árboles nativos creciendo en sectores cercanos a cauces de agua permanente. Árboles representativos fueron seleccionados para ilustrar como el modelo puede ser usado.

Introducción

Las áreas circundantes a cursos de agua pueden ser caracterizadas como el área a lo largo del curso de agua donde la vegetación y el microclima son influenciadas por el flujo de agua permanente o intermitente, asociado a altas tablas de agua y humedad en los suelos (Morman 1993). Estas áreas están generalmente forestadas, siendo los árboles adultos los principales agentes de incorporación de desechos forestales, los cuales cumplen con una serie de objetivos, tales como: mantener un hábitat acuático, constituirse como una trampa de sedimentos, y mantener la configuración del curso de agua.

Los desechos forestales son usualmente piezas de árboles, que reúnen un mínimo de longitud y cuyo tamaño permite influenciar las condiciones hidráulicas y morfológicas del cauce y el hábitat de peces (Robison y Beschta 1990). Los desechos pueden ser liberados desde ramas o copas que caen de árboles en pie, como también de árboles que caen directamente hacia el curso de agua (Van Sickle y Gregory 1990 y Steil et al. 2009). Así, los desechos que caen al cauce son una función de la densidad, altura y tipo de especie de los árboles que crecen cerca del curso de agua (Van Sickle y Gregory 1990). Un efectivo manejo de las áreas circundantes a los cauces de agua, requiere de una estimación precisa del actual y futuro tasa de incorporación de desechos como resultado de potenciales intervenciones silvícolas en estas áreas.

La probabilidad de que un árbol caiga hacia el cauce de agua ha sido modelada por varios investigadores. Rainville (1986) generó una estimación probabilística del número de árboles por décadas cayendo hacia los cursos de agua. Ecuaciones geométricas y empíricas basadas en las alturas de los árboles y la distancia entre éstos y el curso de agua fueron desarrolladas por Robison y Beschta (1990), con el objeto de determinar la probabilidad condicional de caída de los árboles en dirección al curso de agua.

Un modelo probabilístico fue desarrollado por Van Sickle y Gregory (1990). Ellos estimaron la probabilidad de aporte de desechos forestales basados en la densidad de árboles por unidad de área, la distribución de los árboles y la probabilidad de caída de los árboles adyacentes a los cursos de agua. También determinaron la distribución del volumen de los desechos, longitud, y la orientación de las piezas desechos.

La probabilidad (Pd) de que una parte del desecho forestal (ramas, copas, etc.) tenga la probabilidad de caer dentro del cauce de agua, considerando una distribución de caída aleatoria de los árboles fue establecida por McDade et al. (1990) y Van Sickle and Gregory (1990), como:

$$Pd = \frac{\cos^{-1}(D/H)}{180^{\circ}}$$

Donde; D= distancia (m.) perpendicular desde la orilla del cauce al árbol
H= altura del árbol (m.)

Un modelo fue desarrollado por Robison y Beschta (1990), la cual determina la probabilidad de que los residuos gruesos de un árbol que excedan un mínimo de 20 cm. caigan hacia el curso de agua, sería:

$$Pd = \frac{\cos^{-1}(D/He)}{180^{\circ}}$$

Donde; He = altura efectiva del árbol a un diámetro mínimo.
D = distancia del árbol hacia el curso de agua ($0 \leq D \leq He$).

Ambos modelos asumen una dirección de caída aleatoria del árbol. Esta aleatoriedad en la caída es esperada en zonas de protección planas o con una pendiente suave a ondulada, en donde los árboles no presentan una inclinación natural hacia los cursos de agua ni que agentes de mortalidad como el viento no presenta una dirección determinada (Van Sickle y Gregory 1990). El crecimiento de los árboles en pendiente, con un sistema radicular asimétrico y una inclinación natural hacia la pendiente, puede resultar en una alta probabilidad de que el árbol caiga hacia el curso de agua. La importancia de obtener información de la dirección de caída hacia cursos de agua permitiría mejorar la probabilidad de caída de los árboles (Robison y Beschta 1990).

En general, previos estudios no han considerado directamente la inclinación de los árboles ni el efecto del viento como variables relacionadas con la caída natural de los árboles hacia los cursos de agua. Sin embargo, estos autores mencionan estas variables como factores importantes para la determinación de aporte de desechos forestales hacia cursos de agua y los beneficios que esto conlleva.

Por otro lado, muchos investigadores (Day 1950, Fraser 1962, Busby 1965, Alexander 1967, Florentine y Westbrooke 2003) han reconocido que el tipo de suelo y la humedad son importantes factores que contribuyen a la caída de los árboles. La profundidad del suelo, textura, cohesión, y drenaje pueden directamente afectar la profundidad de las raíces y la resistencia del sistema radicular de los árboles. Los árboles que crecen en suelos profundos presentan mayor resistencia que en suelos superficiales. Generalmente, los suelos superficiales generan un sistema radicular débil y superficial, generando con mayor facilidad la caída de los árboles (Gratkowski 1956 y Alexander 1967).

El contenido de humedad y las condiciones de drenaje del suelo afectan la disponibilidad de volumen de raíces. El drenaje refleja la textura del suelo y es un indicador de la potencial caída de los árboles (Moore 1977, Stofko y Kodrik 2008).

La ubicación geográfica de los árboles es importante debido a la relación entre la localización y su exposición a vientos y precipitaciones. La topografía local es un factor que contribuye a la caída de árboles, debido a su efecto en acelerar los vientos causando que éstos lleguen a ser turbulentos. La pendiente es un importante factor que incide en la forma general del sistema radicular (Harris 1999).

Como se mencionó anteriormente, muy pocos estudios han sido efectuados acerca de la fuerza que ejerce el viento sobre los árboles. Muchos autores han investigado la influencia de los diferentes factores meteorológicos y de sitio que producen la caída de los árboles, pero ninguno ha expresado una idea acerca de la velocidad crítica del viento necesitado para la caída de los árboles y como la inclinación natural de los árboles afectan este proceso.

Las condiciones del viento dependen de la localización geográfica del área forestal elevación del terreno, y del grado de refugios geomorfológicos que provee la topografía circundante (Harris 1999). Las intervenciones silvícolas aplicadas a un bosque, tales como espaciamiento inicial y raleos, alteran la estructura del rodal y pueden modificar la vulnerabilidad a la caída de los árboles por el viento (Miller 1985, Veblen et al. 2004, Reyes et al. 2009, Navarro et al. 2010).

La caída de árboles por viento es un problema que puede constituirse en grandes pérdidas económicas. Los daños provocados por el viento dependen de condiciones meteorológicas y de condiciones físicas del árbol (Mayer 1989, Cendoya y Muñoz 2002).

La velocidad del viento que produce la caída de los árboles no es bien conocida, pero ha sido observado que la mayor parte de estos eventos ocurren durante tormentas de vientos normales de inviernos. La velocidad del viento disminuye debido a la fricción sobre los árboles del bosque, la cual es proveída por el dosel y

la velocidad del viento sobre éste. Las mayores velocidades del viento se presentan a una distancia sobre el dosel, sobre una línea imaginaria denominada frontera de fricción, en donde no se presenta el efecto friccional del dosel (Fons 1940).

Todos los autores citados anteriormente, han trabajado en diferentes tópicos relacionado a la estabilidad del árbol, pero no han integrado sus trabajos en determinar la velocidad crítica del viento, el cual genera la caída de los árboles, como tampoco ningún autor ha investigado la inclinación natural de los árboles como un potencial caída de los árboles.

El objetivo general de este estudio es proveer de información básica que permita tener como base de decisión la posibilidad intervenir ciertos árboles ó mantenerlos dentro de las áreas de protección. Mediante el desarrollo de modelos que relacionan la velocidad de viento y la inclinación natural de los árboles, permitir determinar la probabilidad de que los árboles caigan en dirección a los cursos de agua, de manera de mantener el equilibrio del ecosistema.

Metodología

El lugar de estudio se estableció en quebradas o cauces con agua permanente, en zonas representativas de los tipos forestales nativos de la Cordillera de Los Andes, en la VII región, Chile. El área de estudio quedó definida por una franja a ambos lados del cauce, con una distancia sobre la pendiente, que quedó establecida en base a la altura máxima de los árboles dominantes del área.

A través de un muestreo sistemático se midieron los árboles a ambos lados de los cauces, en base a parcelas rectangulares de 20X50 m., distanciada a 10 m. cada una a largo de la longitud del cauce. En cada parcela se midieron todos los árboles adultos dominantes y codominantes.

En cada parcela de muestreo se midió la inclinación natural de cada árbol, la altura y el DAP. Además se efectuaron las mediciones de la distancia perpendicular a favor de la pendiente desde cada uno de los árboles a la orilla más cercana del cauce. El mismo método fue aplicado para medir la distancia desde cada árbol hacia el cauce, considerando la dirección de inclinación natural de éstos. Además se midieron los azimut, con el objeto obtener el ángulo de la distancia perpendicular al cauce y el ángulo de la distancia de inclinación natural del árbol al cauce.

A través de un modelo físico se representó un intento inicial de integrar las variables viento, estructura del árbol, y el momento de resistencia de las raíces. El efecto del viento, como vector fuerza, se asumió que actuó en el centro de la copa del árbol (Mayer, 1989). Por lo que el primer momento, M1, se calculó en base a:

$$M1 = K1 * Hc$$

Donde, Hc es la altura al centro de la copa en donde actúa el viento, y K1 es el vector fuerza del viento.

La inclinación natural del árbol también crea un segundo momento alrededor de la base de éste, M_2 , el cuál será calculado por $M_2 = W_t * L_d$, donde W_t es el peso del árbol y L_d es el torque que produce la inclinación del árbol entre la base y el peso del árbol en un punto determinado (Fig. 1).

El momento resultante del árbol será la suma vector del momento causado por el viento y la inclinación natural del árbol. En este estudio se asumió un análisis de la fuerza estática usando solamente la fuerza inicial del viento y la inclinación natural del árbol, pero no se intentó modelar el torque adicional causado por la deflexión del árbol debido al efecto del viento.

El modelo permitió determinar la velocidad del viento para generar un específico torque combinado entre la inclinación natural del árbol y la dirección del viento, el cual se producirá en la base del árbol. Para calcular el efecto de la fuerza del viento sobre el árbol, se utilizó una ecuación física.

Por otro lado, el desarrollo de un modelo probabilístico permitió determinar en conjunto la probabilidad de una velocidad crítica de viento ocurriendo desde una particular dirección y la probabilidad que el árbol durante la caída alcance el cauce de agua.

Para el establecimiento del modelo se debió determinar la probabilidad que para una dada velocidad de viento, ésta será excedida dentro del período de un año. Para el caso de este estudio fue necesario conocer la probabilidad de excedencia, que es la probabilidad de exceder una velocidad de viento crítica, viniendo éste, desde una específica dirección.

La probabilidad de excedencia $P(e)$ para una determinada velocidad crítica de viento sobre un período de tiempo, fue calculada en base a:

$$P(e) = 1 - ((Tr-1)/Tr)^n$$

Donde, $P(e)$ = probabilidad de excedencia; Tr = período de retorno (años);
 n = período de tiempo (años).

La probabilidad de caída $P(f)$ queda definida como:

$$P(f) = [P(e)_i * P(d)_i]$$

Donde, $P(e)_i$ = Probabilidad de excedencia para una velocidad crítica del viento para una dirección del viento i .

$P(d)_i$ = Probabilidad del viento para una dirección i .

La probabilidad de caída del árbol hacia el cauce $P(fs)$ es:

$$P(fs) = [P(e)_i * P(d)_i] * P(s)$$

Donde, $P(s)$ representa la probabilidad condicional que un árbol en pie de una altura H caiga hacia un cauce a una distancia dada.

De esta forma, combinando la probabilidad de excedencia y la probabilidad de dirección del viento, se obtuvo la probabilidad de caída del árbol para una particular dirección del viento. Posteriormente se determinó la probabilidad de caída de un árbol y la probabilidad que éste alcance el cauce de agua.

Resultados

Para determinar la velocidad crítica del viento de un árbol cayendo hacia un cauce de agua durante un específico período de tiempo, es necesario, para cada dirección de viento, calcular la velocidad crítica del viento requerido para exceder la máxima resistencia del sistema radicular del árbol. Para ello, se consideraron 16 direcciones potenciales del viento. Para ilustrar el procedimiento, se considero la información dendrométrica de un árbol representativo del área de estudio (Tabla 1).

En base a un programa computacional se calculó la velocidad crítica del viento para diferentes direcciones del viento. Los resultados son mostrados en la Tabla 2, y la fuerza del viento por dirección del viento y para una velocidad crítica del viento en Tabla 3. La probabilidad de excedencia y la probabilidad de que un árbol alcance el cauce de agua se muestran en Tabla 4.

Conclusión

Los modelos fueron desarrollados para calcular la velocidad crítica del viento como fuente de energía, con el objeto de estimar la probabilidad la caída de los árboles hacia el cauce durante un período específico de tiempo. Adicionalmente, futuros trabajos podrían también incluir efectos de cambios del diámetro de los árboles, altura, y tipo de corona e incluirlos hacia los modelos propuestos.

Los presentes modelos asumen árboles en estado de madurez, y evalúa la probabilidad de un viento crítico ocurriendo dentro un específico período de tiempo. Sin embargo, si se modificaran las alturas de los árboles, posiblemente árboles de baja altura hoy en día, podrían crecer y alcanzar el cauce durante un período de tiempo determinado.

En conclusión, este estudio debe ser considerado solamente como un paso inicial hacia el entendimiento de cuales factores pueden influir en la posibilidad de como los desechos forestales puedan alcanzar el cauce de agua.

Bibliografía

Alexander, R.R. 1967. Windfall after clearcutting on Fool Creak-Fraser Experimental Forest, Colorado. U.S.D.A. Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station Research Note R.M.-92. 11 pp.

Busby, J.A. 1965. Studies on the Stability of Conifer Stands. *Scottish Forestry*, Vol. 19 N°2, pp: 86-102.

Cendoya, P. y F. Muñoz. 2002. Modelamiento del efecto del viento sobre árboles jóvenes de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque*, Vol. 23 N° 2, pp. 51-56

Day, W.R. 1950. The Soil Conditions which determine windthrow in Forests. *Forestry*, Vol. 23 N°2, pp: 90-95. Fraser, A.I. 1962. The soil and Roots as Factors in Tree Stability. *Forestry*. Vol 35(1): 117-127.

Florentine, S.K., and M.E. Westbrooke. 2003. Effects of windthrow on a stand of *Eucalyptus delegatensis* (Myrtaceae) and early understorey succession at Snowy River National Park, Victoria S.K. School of Science and Engineering, Centre for Environmental Management, University of Ballarat, PO Box 663, Victoria 3350, Australia.

Fons, W.L., 1940. Influence of Forest Cover on Wind Velocity. *Journal of Forestry*, Vol.38 N°2, pp. 117-127.

Gratkowski, H.N. 1956. Windthrow Around Staggered Settings in 80 Old Growth Douglas-fir. *Forest Science*, Vol. 2 N°1, pp:60-74.

Harris, A.S. 1999. Wind in the Forests of Southeast Alaska and Guides for Reducing Damage. Forest Service Pacific Northwest Research Station General Technical Report PNW-GTR-244.

Mayer, B.H. 1989. Windthrow. In proceedings of A Royal Society Discussion Meeting. *Forest, Weather and Climate*: 93-107.

McDade, M.H., F.J. Swanson, W.A. Mckee, J.F. Franklin, and J. Van Sickle. 1990. Source distances for coarse woody debris entering small streams in western Oregon and Washington. *Canadian Journal of Forestry Research*. 20(3) :326-330.

Miller, K.F. 1985. Windthrow Hazard Classification. *Forestry Commission* 85. 14 pp.

Moore, M.K. 1977. Factors contributing to blowdown in streamside leave strips on Vancouver Island. Land Management Report N°3. Province of British Columbia, Ministry of Forest, Information Division Legislative Buildings. Victoria. 30 pp.

Morman, D. 1993. Riparian rule effectiveness report. Forest Practices Program, Oregon Department of Forestry, Salem, OR. 189 pp.

Rainville, R.P. 1986. Riparian silvicultural strategies for fish habitat emphasis. In proceedings of the 1985 Technical Session of the Wildlife and Fish Ecology Working, Society of American Foresters National Convention, July 1985, Fort Collins, CO. Society of American Foresters, Bethesda, MD. 5AF86-07. pp 23-32.

Reyes, R, P. Donoso, C. Donoso, y C. Navarro. 2009. Crecimiento de renovales de *Drimys winteri* después de 16 años de aplicados distintos tratamientos de raleo en las cordilleras de Los Andes y de la Costa en Chile. Revista Bosque v.30 n.3: pp.117-126.

Robison, E.G. and R.L. Beschta. 1990. Identifying trees in riparian areas that can provide coarse woody debris to streams. Forest Science. Vol. 36, N°3, pp. 790-801.

Steil, J.C., C. R. Blinn, and R. Kolka. 2009. Foresters' Perceptions of Windthrow Dynamics in Northern Minnesota Riparian Management Zones. Northern Journal of Applied Forestry. 26(2): 76-82.

Stofko, M. Kodrík. 2008. Comparison of the root system architecture between windthrown and undamaged spruces growing in poorly drained sites. Journal of Forest Science, 54(4): pp. 150–160.

Thomas T. V, T. Kitzberger, y R. Villalba. Nuevos paradigmas en ecología y su influencia sobre el conocimiento de la dinámica de los bosques del sur de Argentina y Chile. University of Colorado, Boulder, CO, USA - ² Universidad del Comahue, Bariloche, Argentina.

Van Sickle, J. and S.V. Gregory. 1990. Modeling inputs of large woody debris to streams from falling trees. Canadian Journal of Forest Research. Volume 20. N°10. Pp 1593-1601.

Tabla 1. Información estadística de un árbol determinado

| DAP (cm.) | Altura (m.) | Volumen (m ³) | Distancia pendiente al cauce (m.) | Ángulo del cauce (azimut) | Inclinación del árbol (grados) | Ángulo de inclinación (azimut.) |
|--------------|----------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 42 | 28 | 3.89 | 14.9 | 84 | 8.6 | 172 |

Tabla 2. Velocidad crítica del viento (Kmh)

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE |
| 156 | 160 | 163 | 166 | 168 | 171 | 173 | 173 |
| S | SSO | SO | OSO | O | ONO | NO | NOO |
| 171 | 167 | 165 | 163 | 163 | 160 | 158 | 156 |

Tabla 3. Fuerza del viento por dirección del viento para una velocidad crítica del viento (Kgf/m²)

| | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE |
| 4257 | 4817 | 4999 | 5185 | 5311 | 5502 | 5631 | 5631 |
| S | SSO | SO | OSO | O | ONO | NO | NOO |
| 5502 | 5248 | 5123 | 4999 | 4999 | 4817 | 4697 | 4579 |

Tabla 4. Probabilidad de Excedencia, probabilidad de dirección del viento y probabilidad de caída del árbol por cada dirección del viento.

| Dirección del viento | P(e) | P(d) | P(f) | Alcanza el cauce |
|----------------------|-------|-------|--------|------------------|
| N | 0.199 | 0.017 | 0.0030 | NO |
| NNE | 0.196 | 0.168 | 0.0330 | NO |
| NE | 0.178 | 0.113 | 0.0200 | NO |
| ENE | 0.147 | 0.000 | 0.0000 | NO |
| E | 0.135 | 0.000 | 0.0000 | NO |
| ESE | 0.118 | 0.000 | 0.0000 | NO |
| SSE | 0.106 | 0.004 | 0.0004 | NO |
| SE | 0.116 | 0.005 | 0.0002 | NO |
| S | 0.118 | 0.411 | 0.0480 | NO |
| SSO | 0.125 | 0.074 | 0.0090 | SI |
| SO | 0.135 | 0.126 | 0.0170 | SI |
| OSO | 0.156 | 0.013 | 0.0020 | SI |
| O | 0.178 | 0.026 | 0.0050 | SI |
| ONO | 0.196 | 0.017 | 0.0030 | SI |
| NO | 0.199 | 0.030 | 0.0060 | SI |
| NOO | 0.199 | 0.000 | 0.0000 | NO |