

---

## **BIO INDICADORES: UNA ÚTIL HERRAMIENTA EN LA PROSPECCIÓN DE VELOCIDADES MEDIAS DEL VIENTO \***

\* Artículo Basado en la Tesis de Grado para la Licenciatura en Geografía de Lic. Graciela Ponce y Lic. Gabriela Roberts, Dirigida por el Dr. Héctor F. Mattio, Agosto de 1996.

ROBERTS<sup>1</sup>, Gabriela

<sup>1</sup> Licenciada en Geografía, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales, Sede Trelew, Departamento de Geografía. Belgrano y Rawson – 9100 – Trelew – Chubut – Argentina.

### **ABSTRACT**

The primordial objective of the present study is to contribute to the utilization of appropriate and renewable technologies, in order to avoid, to a certain extent, the contamination of the environment caused by the pollution from contaminating powers, among other, thereby contributing to the development of the World Program of Global Climatic Changes. Lack of information about existing wind resources often makes it impossible to develop projects based on wind power generation. For that purpose we have developed a methodology which determines the yearly average wind speed through the utilization of biological indicators. Said methodology has been applied for the assessment of the wind resources in the province, in order to determine later on the possible utilization of these resources for power generation.

### **Palabra Clave**

- Bio indicadores: Indicadores biológicos (árboles y arbustos) deformados por acción del viento.

### **INTRODUCCIÓN**

Desde una perspectiva global de conservación de la naturaleza se considera a la energía eólica como una fuente energética renovable, limpia, segura, económica y generadora de empleo.

Determinar la velocidad media del viento a través de indicadores biológicos (árboles, arbustos) permite establecer el potencial eólico de un lugar determinado.

El desarrollo de nuevas técnicas de evaluación del recurso eólico plantea el desafío de conjugar los objetivos del desarrollo económico social con la administración ecológica de los recursos naturales y de la valorización de la componente ambiental.

La Alianza Mundial de Energía Sustentable en su Carta Global de Energía (1993) para el Desarrollo Energético Sustentable, expresa la necesidad de promover un estilo de desarrollo alternativo que sea compatible con la satisfacción de necesidades fundamentales de la población y con la preservación y valorización de la base de recursos y del medio ambiente de la sociedad,

creando tecnologías más ajustadas a los recursos naturales y a las características culturales de la región.

Ante todo, para que resulte efectiva la utilización de la energía eólica, es necesario realizar una evaluación del potencial eólico de un sitio. Las estimaciones de la velocidad media anual del viento basadas en la deformación eólica de los árboles, aunque sujetas a algunas imprecisiones, son simples, rápidas y de criterio económico para identificar localidades donde las dimensiones más destacadas del viento lo justifican, y como una guía preliminar para clasificar los sitios con potencial eólico. A través de la observación directa o indirecta con la toma de fotografías y la digitalización se puede realizar un perfecto análisis del área de deformación que ha desarrollado la especie vegetal por efecto del viento.

Observaciones de la comunidad ecológica de un sitio pueden proveer información cualitativamente útil acerca de los vientos, en y alrededor de un sitio, pero tales interpretaciones deben hacerse con cuidado. Las técnicas estadísticas de muestreo y medición de la altura del arbusto o árbol, de la inclinación y características del follaje y el tronco son elementales para la correcta obtención de resultados útiles en la prospección del viento (Ponce,G; Roberts,G. 1996.).

## **DESARROLLO**

### **La Vegetación como un Indicador de Altas Velocidades de Viento**

Uno de los problemas para la determinación del potencial de energía eólica es la ausencia de datos reales de viento en ubicaciones en donde se cree que hay vientos fuertes. Debido a que la energía es proporcional al cubo de la velocidad del viento, es crucial conocer la fuerza de los vientos en los lugares considerados.

El objetivo del estudio realizado ha sido desarrollar métodos de utilización de la vegetación deformada por el viento para la selección de sitios óptimos para el aprovechamiento de la energía del viento.

Entre los factores que afectan la respuesta de la vegetación como indicador de la potencia del viento en un lugar determinado, están el tiempo de exposición, el ángulo de inclinación de la deformación resultante, y el tipo o especie de árbol o arbusto.

Los bio indicadores permiten establecer índices de deformación sensibles cuando los vientos tienen una dirección predominante.

### **Bio indicadores del Potencial Eólico**

En áreas de vientos persistentes, los procesos fisiológicos y bioquímicos pueden causar cambios permanentes en el desarrollo de las plantas. Los cambios pueden ser morfológicos, ejemplo: cambios en la forma de la planta; o anatómicos, ejemplo: cambios en la estructura de la célula de la planta. Entre los muchos efectos del viento en el crecimiento de las plantas, en particular, los efectos del viento en la morfología y anatomía de los árboles y arbustos resulta ser el más útil para la prospección del poder del viento (Hewson, Wade, Baker, 1979).

Basada en estos efectos, la información del viento puede ajustarse a diferentes escalas en el espacio:

- Pequeño, donde el viento a deformado permanentemente un árbol solo o arbusto;
- Regional, donde el viento a deformado un número de árboles que proporciona un bajo perfil aerodinámico en el mapa a causa del flujo de aire;
- Grande, donde el uso apropiado de sensores remotos pueden demostrar efectos notables del viento en comunidades de plantas dentro de un área.

### Índices de Deformación del Viento

Existen cinco índices de los efectos del viento sobre los árboles que han sido probados para determinar la relación entre el viento y el valor de las características de los índices. Cada índice provee fácilmente un resultado, un número unidimensional que cuando es calibrado brinda un acercamiento de la característica del viento responsable del efecto sobre los árboles:

- La excentricidad (E): un indicador de la desviación de la circularidad del tronco de un árbol. La excentricidad se define como E donde:

$$E = \frac{(A^2 - B^2)}{A^2}$$

2A= eje mayor del árbol  
2B= eje menor del árbol

- El índice de Forma (S): una medida de la influencia relativa del viento sobre el radio y extensión del crecimiento del tronco. La relación es calculada al dividir la circunferencia del árbol en 1.5 m por su altura.
- Relación Grigg – Putnam del tipo de deformación (G): una escala subjetiva de clasificación parecida a la que desarrolló Putnam (1948). A cada árbol se da una clasificación con base en las características de su deformación eólica.
- La relación de Deformación (D): un indicador del grado de viento que induce a deformar un árbol. Se calcula una relación entre el ángulo  $\alpha$  (el ángulo entre la copa y el tronco del lado de sotavento del árbol) y el ángulo  $\beta$  (el ángulo entre la copa y el tronco del lado de barlovento del árbol).
- La relación de Compresión (C): un indicador de la influencia del viento sobre la deformación de la madera de reacción. La relación es calculada al tomar el incremento anual de crecimiento del tronco sobre el lado de sotavento del árbol y dividirlo por el incremento de crecimiento del lado de barlovento del árbol.

El Índice Grigg – Putnam es históricamente el primer índice de los efectos del viento en la configuración de los árboles y esta basado en el trabajo pionero de R. F. Grigg y P. C. Putnam. Este Índice (Figura 1) es una escala subjetiva basada en el grado de respuesta del árbol hacia el viento. El índice se divide en ocho clases:

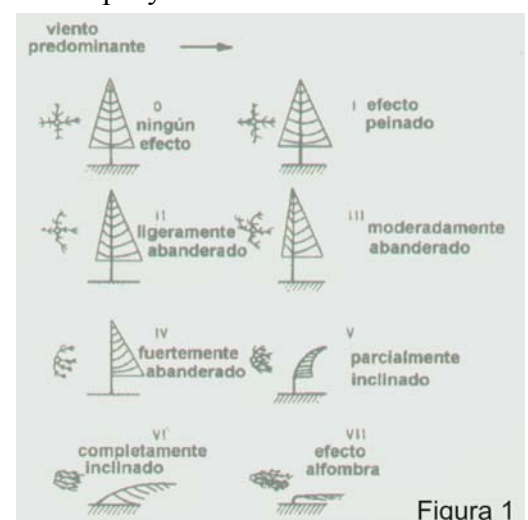
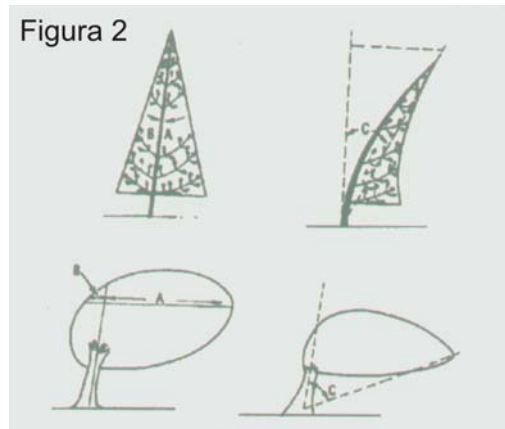


Figura 1

- **Clase 0, Ningún Efecto:** Un examen cuidadoso de agujas, ramitas y ramas indican que el viento no ha tenido ninguna influencia notable en el árbol.
- **Clase I, Efecto Peinado:** Las ramas pequeñas y agujas aparecen inclinadas en la dirección predominante del viento. La copa del árbol debe aparecer ligeramente asimétrica.
- **Clase II, Ligeramente Abanderado:** Las pequeñas ramas y extremos de las ramas más grandes se doblan por el viento, dándole a la copa del árbol una notable asimetría.
- **Clase III, Moderadamente Abanderado:** Se doblan las ramas grandes hacia los bordes de sotavento del árbol, lo mismo ocurre en los laterales de la copa.
- **Clase IV, Fuertemente Abanderado:** Todas las ramas están a sotavento y el tronco está a descubierto del lado de barlovento. El árbol parece una bandera.
- **Clase V, Parcialmente Inclinado:** El tronco del árbol está parcialmente inclinado, así como las ramas se doblan al reparo del mismo. El tronco se inclina en forma cóncava o convexa, se acrecienta el grado de inclinación del árbol, acercando la copa y el tronco al suelo.
- **Clase VI, Completamente Inclinado:** El árbol crece casi paralelo al suelo por el predominio de la dirección del viento. Las ramas más grandes se extienden del lado de sotavento, más allá del extremo del tronco.
- **Clase VII, Efecto Alfombra:** El viento es muy fuerte y está acompañado de condiciones muy severas, por ejemplo las heladas, tomando el árbol forma de arbusto. Se pierde el desarrollo del árbol en forma simétrica; es predominante el crecimiento lateral, a ras del suelo. La copa crece sobre la tierra como un postrado arbusto.



### Determinación del Índice de Deformación

La relación de deformación (D) mide el nivel de asimetría de la corona y la desviación del tronco principal. Este índice puede calcularse mediante dos metodologías distintas. La primera se puede realizar en forma manual mediante la medición de los distintos ángulos de deformación sobre las fotografías tomadas. La segunda consiste en la digitalización de las fotografías para corroborar los posibles errores de medición (Autocad versión 12.0 y Cad 32.).

Para el cálculo del Índice de Deformación (Relación Grigg – Putnam) se debe considerar que para coníferas (casuarina, pino, ciprés),  $\alpha$  es el ángulo formado por el borde de la copa y el tronco del lado de sotavento,  $\beta$  es el ángulo formado por el borde de la copa y el tronco del lado de barlovento, y  $\gamma$  es el ángulo promedio de la desviación del tronco hasta el borde de la copa (Figura 2, Fotos 1 y

2). La ecuación que computa el porcentaje de deformación (D):

$$D = \frac{\alpha}{\beta} + \frac{\gamma}{45^\circ}$$

Para árboles de copa esférica (eucalipto) la relación de deformación es dada por:

$$D = \frac{A}{B} + \frac{C}{45^\circ}$$

donde **A** es la distancia media del perímetro de la copa del lado de sotavento, **B** es la distancia media del perímetro de la copa del lado de barlovento, y **C** es el ángulo medio del perímetro de la copa y el tronco, a sotavento (Figura2, Fotos 3 y 4).

Debe resaltarse, que para determinar la proporción de deformación es conveniente tomar las fotografías de los bio indicadores desde una posición en ángulo recto hacia la dirección del abanderamiento del mismo.

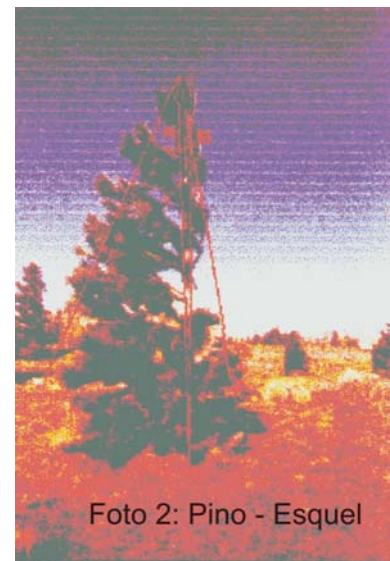


Foto 2: Pino - Esquel



Foto 3: Eucalipto - Comodoro Rivadavia

Finalmente, se realiza un gráfico de coordenadas *x* e *y*, ubicando en la abcisa los valores del índice de deformación **D** y en la ordenada los valores reales de la velocidad del viento (datos obtenidos de estaciones meteorológicas regionales que permiten ajustar los resultados del índice a los valores establecidos de velocidad del viento in situ).

### Comportamiento de los Diferentes Abanderamientos en Función al Viento

#### 1.- Crecimiento Estacional del Abanderamiento Eólico

Los árboles expuestos a vientos fuertes durante la estación de crecimiento tienen ramas que parecen haber sido entrenadas por los vientos prevalecientes. Los troncos son arqueados a menudo ligeramente a sotavento. Ramas sanamente desarrolladas aparecen en todas las partes del árbol, pero estas apariciones del lado de la influencia del viento han sido barridas de alrededor del árbol hacia el lado de sotavento.

#### 2.- Abanderamiento causado por los vientos durante el crecimiento y la estación invernal

Los árboles sometidos a vientos fuertes durante el invierno y la estación de crecimiento exhibirán los efectos del abanderamiento de ambas estaciones. Si las direcciones predominantes del viento de cada estación son opuestas, las ramas

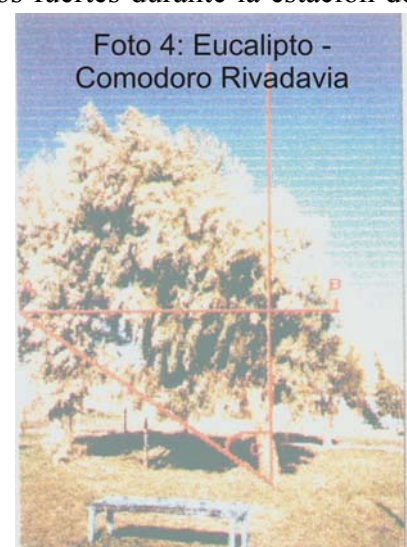


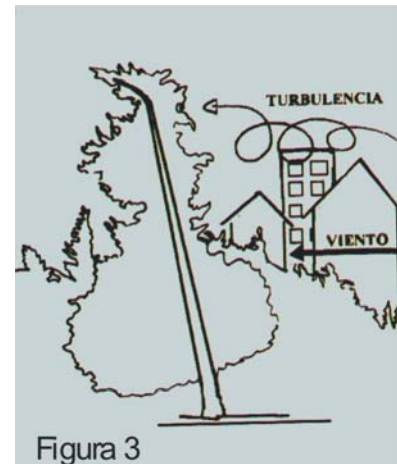
Foto 4: Eucalipto - Comodoro Rivadavia

largas se hallan sólo en las direcciones perpendiculares a las direcciones predominantes del viento. Aún cuando en invierno y en la estación de crecimiento el viento venga desde una misma dirección, los árboles exhiben sólo en la estación de crecimiento la forma de abanderamiento.

### 3.- Indicadores de viento severo o de daño por hielo

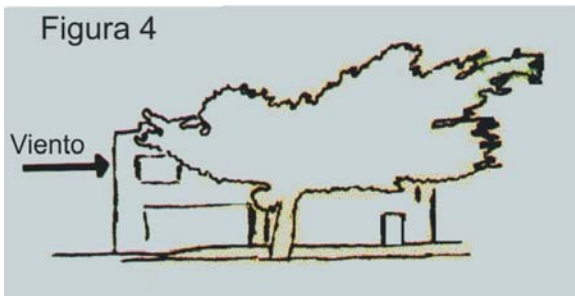
Las ramas rotas, tiradas por el viento (inclinación del árbol) y su desplome es toda evidencia externa de los vientos severos. Otra evidencia externa puede incluir:

- Caída de los árboles,
- Inclinación de los árboles,
- Árboles con ramas o extremos quebrados,
- Ramas muertas sobre la tierra,
- Troncos con nudos retorcidos donde los tocones de las ramas han sanado imperfectamente.



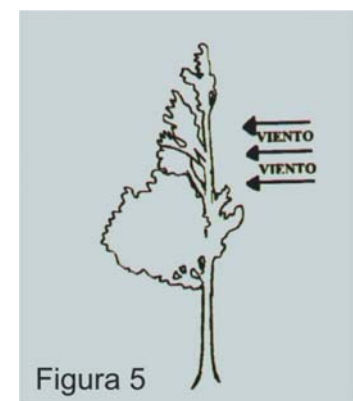
### 4.- Distintos tipos de deformación observada

La Figura 3 representa un pino de formación urbana. El pino se deforma en la dirección del viento como el resto de los árboles que se observan detrás, pero la turbulencia que se produce sobre los edificios hace que el árbol incremente su deformación. Al emplear en éste árbol la fórmula para determinar velocidades medias de viento, resultará en un incremento de la velocidad media real del lugar. Lo mismo ocurre con la Figura 4.



La Figura 4 muestra un Pino caracterizado por un achatamiento en su copa como consecuencia de la turbulencia producida por las construcciones cercanas. Así mismo, presenta una desviación de la misma en la dirección predominante del viento; pero principalmente éste árbol sufre deformaciones debido a la gran turbulencia que originan las construcciones.

La Figura 5 presenta un árbol aparentemente aislado que muestra un elevado grado de abanderamiento eólico, pero en realidad se encontraba rodeado de otros pinos que no actuaban como protección. Sin obstáculos el Pino se deforma directamente por la corriente eólica. La Figura 8 clarifica un poco más lo que sucede con Figura 5. Los pinos más expuestos al viento son aquellos que más se deforman u quienes representan los valores más cercanos a la velocidad real de viento del lugar. Los otros pinos del conjunto resultarán en valores medios por debajo del valor real de velocidad media anual del viento.



La Figura 6 representa un árbol deformado por la influencia que ejerce una construcción cercana y que no le permite a la copa desarrollar una forma simétrica. Así mismo, del lado de barlovento se deforma hacia abajo por la turbulencia que producen los edificios próximos. El abanderamiento que presenta es contrario a la dirección predominante del viento debido a un obstáculo cercano. En el caso de la Figura 7, es un árbol aparentemente deformado por el viento, pero si se revisa el terreno de su alrededor se pueden observar indicios de construcciones; ya no existe un edificio que ejerza una influencia notable en el desarrollo asimétrico de la copa, pero como si lo hizo por muchos años, el árbol mantiene la deformación.

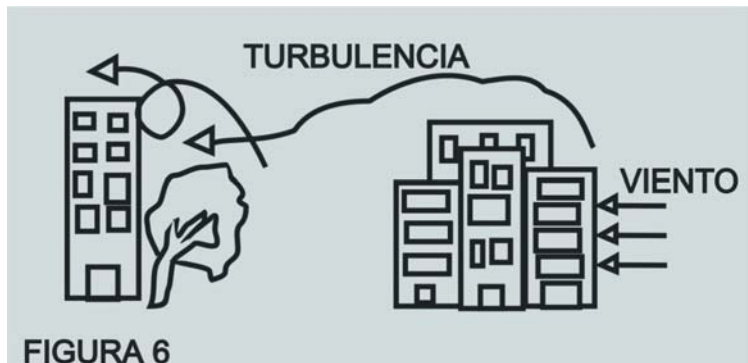


FIGURA 6



FIGURA 7

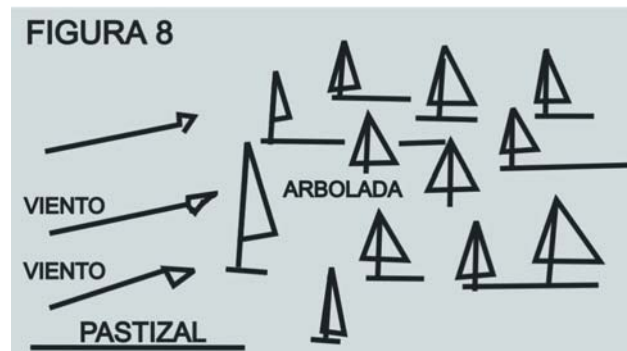


FIGURA 8

Siempre es bueno y adecuado revisar los alrededores de los árboles que se pretende utilizar como Indicadores.

La Figura 9, gráfica el comportamiento de los árboles agrupados. El árbol más expuesto es el que primero se ubica en la dirección predominante del viento, en el caso de barreras de árboles paralelas al viento. Éste primer árbol sufrirá de deformación eólica y por su posición ejercerá un efecto de tipo “domino” sobre los otro árboles, es decir, que los árboles consiguientes se deforman por la influencia del primero. El grado de deformación del conjunto dependerá de la fuerza que ejerza el viento sobre el primer árbol y de la distancia entre ellos. Cuanto más cerca se encuentren más se deformarán por “efecto domino”, mientras que aquellos separados por una distancia mayor presentarán un grado superior de deformación eólica en el conjunto. Para el caso de barreras de forestación perpendiculares a la dirección predominante del viento, Figura 10, los árboles se deformarán por efecto del viento únicamente.

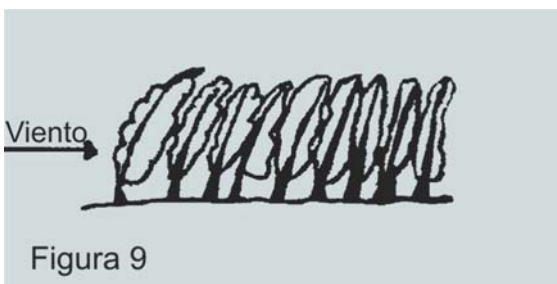


Figura 9

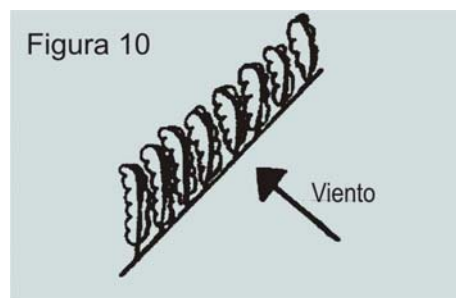
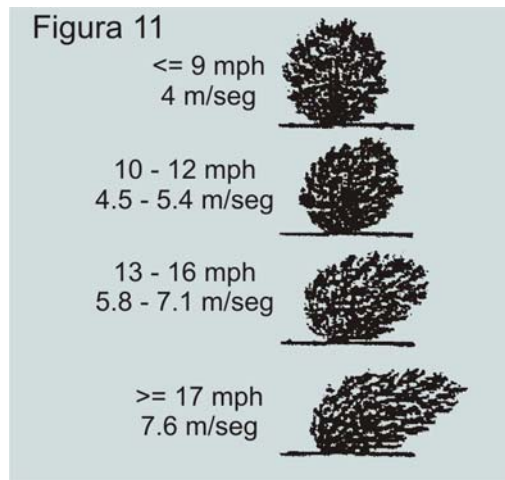


Figura 10

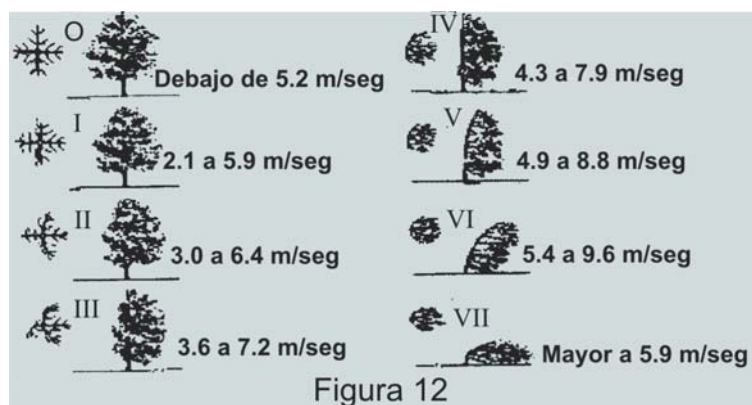
### 5.- Deformación de Arbustos (Correlación con Velocidad del Viento)

No se ha podido encontrar una fórmula de deformación de arbustos que sea representativa de ésta en función de la velocidad media anual del viento. De las observaciones realizadas y de los estudios precedentes realizados por Héctor Mattio (Mattio, 1994), se establece que las especies arbustivas tiene la siguiente relación entre su abanderamiento y la velocidad media anual del viento:

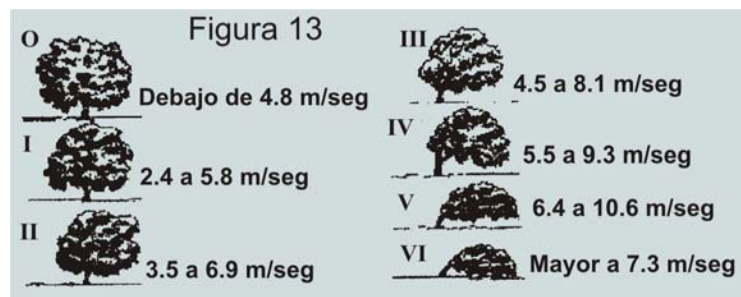


### 6.- Deformación de Árboles (Correlación con Velocidad del Viento)

Un observador adiestrado puede a simple vista encontrar la siguiente relación entre el abanderamiento de los pinos y la velocidad del viento; relación estrechamente ligada al índice Grigg – Putnam:



Idem Coníferas



## CONCLUSIONES

La deformación de la vegetación deformada por el viento puede proporcionar una útil, y en verdad crítica, información para un emplazamiento de sistemas conversores de energía eólica. El recurso eólico del área candidata, en la fase de evaluación, la observación del abanderamiento de la vegetación (casuarina, eucalipto, Ciprés y Pino) presta soporte a otros métodos de análisis de flujo a través de la región estudiada. Como una herramienta usada en el potencial del sitio candidato en



la fase de resguardo, la observación de los árboles debe ser útil en dejar afuera los inconvenientes del potencial de un sitio candidato. Por ejemplo, la separación del flujo en el abrigo de las colinas es notado a veces por una inversión en la dirección del abanderamiento eólico en la ladera de sotavento de la misma. Los daños por hielo o vientos severos dentro del tiempo de vida de un árbol pueden sugerir la desestimación del área ante la consideración de sitios alternativos con un clima más benigno. Finalmente, el uso de la vegetación puede ser coordinado con otra técnica de señalización de áreas de significativo recurso eólico dentro de los límites del área establecida (Ponce, G.; Roberts, G.; 1996).

Los árboles seleccionados como indicadores deben de estar bien expuestos a la prevalescencia del viento. Los árboles aislados o pequeños, agrupados en un extenso espacio pueden favorecer su uso como indicadores de la velocidad del viento.

Todos los árboles deben estar cerca de la misma altitud aun cuando ellos van a ser usados para comparar diferentes localidades. La velocidad del viento se incrementa dramáticamente con una altura superior a 10 metros. Sobre 10 metros, esa variación en la velocidad del viento, aún cuando es significativa, es menos pronunciada. De este modo los árboles seleccionados deben estar a 10 metros a más arriba.

Todos los árboles deben ser de la misma especie si son usados para evaluar el potencial de un sitio. Ejemplo: las casuarinas y el eucalipto reaccionan similarmente a la media anual del viento sobre los 5 m/seg. De acuerdo con esa velocidad, la casuarina es un poco más susceptible al viento que el eucalipto.

Otros factores además del viento pueden ser responsables de una formación asimétrica de la copa de los árboles. El crecimiento de los árboles lado a lado, por ejemplo, puede causar abanderamiento en ambos individuos. Si se remueve un árbol, el otro parece presentar abanderamiento eólico. Siempre debe buscarse evidencia de competidores pasados. La tierra o el deslizamiento de la nieve, una ocasional tormenta severa de hielo, fuego, daño de insectos, podas, o daños por aserrado pueden causar todas las formas de asimetría de la copa que no están asociadas con el viento.

Mientras que el abanderamiento eólico de los árboles indica vientos fuertes, una falta de abanderamiento no indica necesariamente que el viento no sea fuerte. Hay situaciones donde los vientos fuertes vienen de tres o más direcciones, pero su persistencia es insuficiente de cualquiera de las direcciones para causar una deformación visible. También, en localidades donde los vientos de la tarde son fuertes pero decrecen considerablemente por la noche, los árboles son difícilmente deformados por el viento.

Los bio indicadores son una herramienta útil para determinar la dirección predominante del viento, identificar áreas donde el viento es severo y/o hay descargas de hielo y, sobre todo, para estimar la velocidad media anual del viento.

La determinación de velocidades medias en función de indicadores ecológicos demuestra que existe una correlación muy fuerte entre el abanderamiento de las especies y la velocidad media anual del viento; la cual puede determinarse a través de una fotografía y el calculo de la deformación de sus copas en función a la relación entre el abanderamiento eólico a barlovento con respecto a la copa a sotavento y a la inclinación que el tronco en dicho árbol sufre por efecto del viento.

Se puede determinar la velocidad mediante las siguientes ecuaciones (Mattio, H.; Ponce, G. y Roberts, G.; 1996):

CASAURINAS	$\bar{V}_{est.} = 4.075 + 1.135 D$	rms Error = $\pm 0.147$ m/seg.
PINO	$\bar{V}_{est.} = 3.13 + 1.64 D$	rms Error = $\pm 0.34$ m/seg.
EUCALIPTO	$\bar{V}_{est.} = 3.62 + 0.46 D$	rms Error = $\pm 0.43$ m/seg.
CIPRÉS	$\bar{V}_{est.} = 4.05 + 1.30 D$	rms Error = $\pm 0.40$ m/seg.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**Alianza Mundial de Energía Sustentable:** “Carta Global de Energía para el Desarrollo Energético Sustentable. Madrid - 1993.

**Hewson, E.; Wade, J. y Baker, R.:** “Vegetation as an Indicator of High Wind Velocity”. Oregon State University. Department of Atmospheric Sciences. Corvallis, Oregon – 1979.

**Mattio, Héctor:** “Wind Atlas Model: Mattwas, Matpark, Matrud”. European Wind Energy. Denmark – 1994.

**Mattio, Héctor; Ponce, Graciela y Roberts, Gabriela:** “Technical/Economical Feasibility Study: Copelco Wind Power Plant”. Regional Wind Energy Center – Bank of Nedernal. Nederland - 1996.

**Ponce, Graciela y Roberts, Gabriela:** “Determinación de Velocidades medias del Viento en Función de Indicadores Biológicos” Tesis de Licenciatura en Geografía, Universidad Nacional de la Patagonia san Juan Bosco, Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales, Departamento de Geografía. Trelew - 1996.