

ANÁLISIS DE LA FENOLOGÍA FOLIAR DE LENGA A TRAVÉS DE SERIES DE TIEMPO Y SU EFECTO EN EL CICLO HIDROLÓGICO, ASISTIDO POR DATOS DEL SATÉLITE MODIS

DAVID GONZÁLEZ LANTERI^{1*}, RODRIGO FUENTES ROBLES¹, CÉSAR CANO MUÑOZ²,
CARLOS JORQUERA STUARDO¹ & FELIPE DONOSO URRUTIA³

^{1*}Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Manejo de Bosques y Medioambiente, Laboratorio de Ecología de Paisaje, Av. Victoria 631. Concepción, Chile.

²Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Chillan, Chile.

³Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Concepción, Chile.

* dgonzale@udec.cl

RESUMEN

La materia orgánica generada por la descomposición de las hojas de lenga (*Nothofagus pumilio*) influye en las condiciones de microclima, ciclo de nutrientes y del agua, erosión del suelo, entre otras. En el presente estudio se analizó mediante series de tiempo a partir de productos MODIS el comportamiento fenológico de esta especie lo cual permitió determinar cuantitativamente la superficie y la capacidad de intercepción de agua lluvia de las diversas partes aéreas de ésta (hojas, ramillas, ramas y fuste). Con el peso seco de las hojas se estableció un ensayo de descomposición para establecer la razón entre masa seca y la masa de materia orgánica producida. Los resultados muestran que la estructura viva y la materia orgánica de las hojas descompuestas son capaces de retener importantes masas de agua lluvia, vital en aquellos ecosistemas boscosos formados por esta especie.

Palabras clave: Intercepción, retención de agua, materia orgánica, MODIS.

LENGA FOLIAR PHENOLOGY ANALYSIS THROUGH TIME SERIES AND ITS EFFECT ON THE HYDROLOGICAL CYCLE, ASSISTED BY MODIS DATA

ABSTRACT

The generated organic matter by decomposition of lenga's leaves influence in microclimate conditions, nutrient and water cycling, soil erosion, e.g. In the present study the surface was analyzed by time series from MODIS products the phenology of this specie which allowed to quantify the surface and the ability to intercept rainwater of various aerials part of lenga (leaves, twigs, branches and stem). With de dry weight data of leaves was established a decomposition test

Recibido: 16/02/2013

Aceptada versión definitiva: 26/06/2013

© Los autores

www.geo-focus.org

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

of this for establish the ratio between dry mass and produced organic matter. The results show what live structure and the discomposed organic matter of the lenga's leaves are capable of retaining important rainwater mass, vital in those forest ecosystems formed by this specie

Keywords: Interception, water retention, organic matter, MODIS.

1. Introducción

La estimación de la cantidad de agua lluvia retenida por bosques de Lenga (*Nothofagus pumilio*) en la Patagonia de Chile y Argentina es importante en la estimación del balance hidrológico de ecosistemas boscosos frágiles (Caldentey *et al.*, 2001). No existen antecedentes sobre esta estimación mediante sistemas objetivos que provean de adecuada confiabilidad a las estimaciones de retención de agua lluvia por las diversas estructuras anatómicas de la lenga (hojas en árbol, ramas y tronco) y en sus diversos estados del ciclo de vida (en árbol en pie, en estructuras anatómicas en suelo y/o descompuestas).

Los frágiles ecosistemas de bosques de lenga de la Patagonia, están siendo amenazados por manejo productivo carentes de información suficiente acerca de los efectos de su extracción sobre el ciclo hidrológico, en específico sobre la dinámica de caudales superficiales generados desde cuencas hidrográficas cubiertas por bosques de lenga (Moretto *et al.*, 2005)

Los objetivos de la presente investigación son establecer relaciones biofísicas de la especie lenga para determinar su influencia en la formación de materia orgánica y en la capacidad de retención de agua en todo su estrato aéreo (hojas, ramillas, ramas y fuste) y de materia orgánica localizada sobre el suelo mineral. Ello permitirá entregar las herramientas necesarias a agentes del estado y centros de investigación, para una mejor regulación de planes de manejo productivo de esta especie, considerando su efecto sobre el comportamiento de caudales de ríos presentes en las cuencas donde existe cobertura de lenga.

2. Revisión bibliográfica

El ciclo hidrológico es conformado por un proceso de evaporación del agua, principalmente de los mares, para formar nubes, seguido de la precipitación (nieve, lluvia, granizo, etc.) a partir de la cual el agua puede fluir por la superficie de la tierra hasta alcanzar los cauces de torrentes y ríos, para llegar al mar directamente o indirectamente a través de procesos de infiltración en el suelo y retornar a la superficie en forma de manantiales (Balairón, 2002; Fattorelli y Fernández, 2007).

El rol que cumple la vegetación dentro de este ciclo es de suma importancia, ya que por los procesos fisiológicos que ocurren en este estrato, influye directamente en la hidrología de una cuenca (Chang, 2006). Uno de los efectos que tiene este estrato es la de actuar en la intercepción de lluvias, disminuyendo así la energía cinética de las gotas de agua, evitando su impacto directo con el suelo, disminuyendo su erosión debido a factores hídricos. También es un medio de evapotranspiración del agua a hacia la atmósfera (Chow *et al.*, 1994; Deguchi *et al.*, 2006). Otro

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

efecto es regular la intensidad del caudal de los ríos, impidiendo las inundaciones en los sectores más bajos de la cuenca (He *et al.*, 1997; Hümann *et al.*, 2011).

La intercepción es la porción de precipitación que moja y se adhiere a la vegetación sobre la tierra y vuelve luego a la atmósfera en el proceso de evaporación (Veissman *et al.*, 1989). La cantidad de agua interceptada dependerá de la intensidad de las precipitaciones, de las especies vegetales presentes en el área, su estado de desarrollo, de la densidad de plantas, y de la estación del año (Herbst *et al.*, 2008; Pypker *et al.*, 2005; Ward y Trimble, 2004). Según Hörmann *et al.* (1996) la intercepción varía entre un 9 y 48% en bosques de coníferas y entre un 11 y 36% en bosques caducifolios.

Otra función que posee la vegetación es la de formar materia orgánica provenientes de la descomposición de hojas, ramas, raíces etc. que caen al suelo, ejerciendo un efecto importante sobre su entorno (Hongve *et al.*, 2000; Corvasce *et al.*, 2006; Traversa *et al.*, 2008). La fertilidad de suelo y la composición de las especies vegetales presentes determinan la calidad de la materia orgánica, afectando fuertemente las tasas de descomposición (Vesterdal, 1999; Sariyildiz y Anderson, 2003) y la acumulación de carbono (Cote *et al.*, 2000; Giardina *et al.*, 2001; Franklin *et al.*, 2003), por lo tanto influyen en los efectos del aumento de la hojarasca, base para la formación de materia orgánica del suelo y el espesor de suelo forestal.

La formación de este sustrato, es producto de la actividad de microorganismos y de hongos, y que a su vez está influenciada por factores climáticos como la temperatura y humedad (Steinberger y Whitford, 1988; Dai *et al.*, 1996; Fioretto *et al.*, 1998). La materia orgánica juega un papel importante en los ecosistemas forestales en todo el mundo, esto ha quedado claro a partir de los resultados de estudios observacionales y experimentales realizados, donde se ha determinado que la materia orgánica es esencial en el ciclo de nutrientes, actuando como una capa protectora de cambios en el contenido de agua del suelo mineral (Koutika *et al.*, 2002) evitando la erosión (Polyakov & Lal, 2004, Fenton *et al.*, 2005, Kuhn & Armstrong, 2012, Marchetti *et al.*, 2012) y lixiviación de nutrientes (Geddes & Dunkerley, 1999, Mo *et al.*, 2003).

Estudios iniciales sobre la manipulación de la materia orgánica muestran una reducción en la capacidad de retención de agua en el suelo de 13-14% en los horizontes superiores y 4.7% en los inferiores, en estudios de largo plazo realizados en bosques con presencia de intervención sobre la extracción de materia orgánica, comparados con bosques no alterados (Sayer, 2006), además se ha reportado que una o más décadas pueden ser necesarias para la recuperación del contenido de materia orgánica en el suelo tras el cese de la extracción de ésta (Mo *et al.*, 2003). Incrementos en los niveles de carbón en el suelo han sido detectados después de 10-15 años (Mao *et al.*, 1992).

La lenga (*Nothofagus pumilio*) es una especie de hoja caduca, cuyo tipo forestal constituye el 25,2% de la superficie total de bosque nativo en Chile (Conaf *et al.*, 1999). Distribuyéndose entre los paralelos (36°50' - 56°) S (Donoso, 1981). Se desarrolla en condiciones climáticas muy severas, con temperaturas promedio que varía entre (3,5 – 7) °C; desde el paralelo 39° S hacia el norte en Chile se presenta a una mayor elevación y se encuentra preferentemente en laderas de exposición sur (Schlatter, 1994).

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): “Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

Este estudio se ha centrado en establecer relaciones biofísicas de la especie lenga para determinar su influencia en la formación de materia orgánica y en la capacidad de retención de agua en todo el estrato aéreo (hojas, ramillas, ramas y fuste) y de materia orgánica localizada sobre el suelo mineral.

3. Materiales, datos y métodos

3.1. Área de estudio

El área de muestreo fue generada en base a información del proyecto “Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile” (1999) (Conaf *et al.*, 1999), (figura 1), desde donde fueron seleccionadas las zonas donde actualmente se encuentran las dos condiciones de interés de desarrollo de lenga (*Nothofagus pumilio*). El trabajo de campo fue realizado en la Reserva Nacional Trapananda sobre dos estados de crecimiento de bosque de lenga, joven y adulto. Esta Reserva Nacional tiene una superficie de 2.305 ha, localizada a 45 km de la ciudad de Coyhaique contenida en la cuenca del Río Aysén (Dirección General de Aguas, 2004) (figura 2).

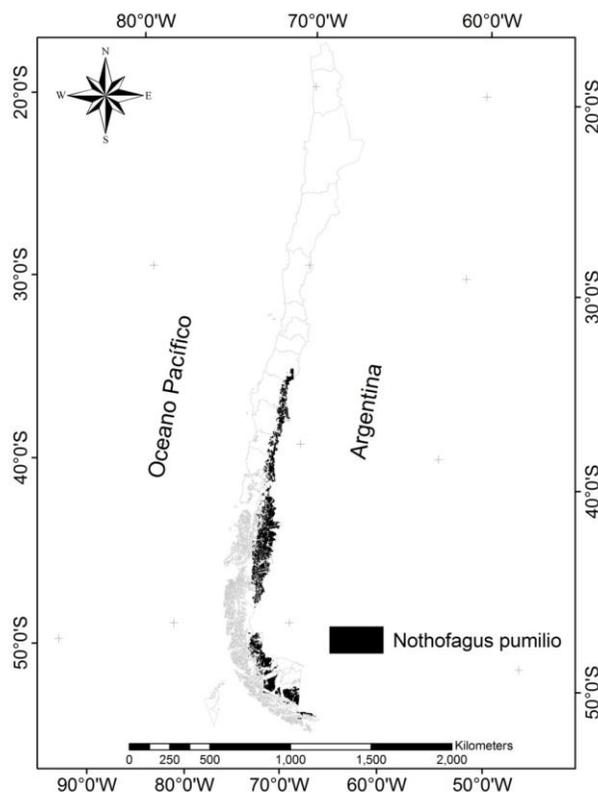


Figura 1. Distribución de formación de *Nothofagus pumilio* en Chile.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

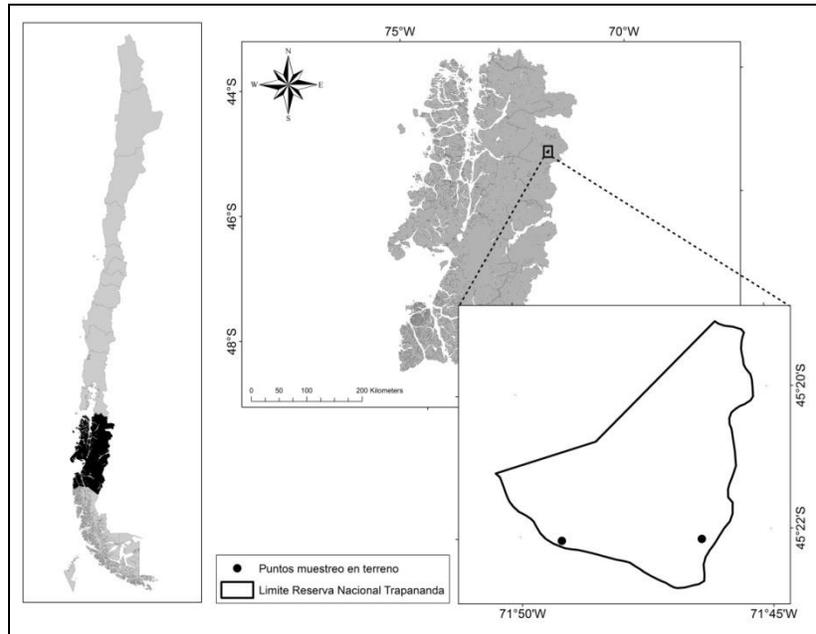


Figura 2. Área de muestreo, en que se localizan dos parcelas de muestreo en la reserva nacional Trapananda.

3.2. Los datos

3.2.1. Producto índice de área foliar (IAF) de MODIS

Corresponde al producto MOD15A2 del satélite MODIS de la plataforma Terra, el cual se define como el número de capas de hojas vegetales equivalentes en relación con una unidad de superficie de terreno proyectada, es un valor ubicado entre cero y 12 en la base mundial de datos del sistema de coordenadas MODIS. Presenta una resolución espacial de 1.000 m x 1.000 m y una resolución radiométrica de 16 bits. Corresponde a datos compuestos sin presencia (o muy reducida) de nubes, formados a partir de 8 días de imágenes diarias consecutivas. (Olofsson y Eklundh, 2007; Propastin y Erasmí, 2010).

Mediante la obtención de producto MOD15A2 desde sistemas de almacenamiento y distribución de datos MODIS a partir del primero de enero del 2001 hasta primero de enero de 2006 fueron generados cada 8 días, datos de IAF en series de tiempo. Para conocer la equivalencia de coordenadas MODIS a coordenadas geográficas de los dos sitios de interés se utilizó el programa MODLAND tile Calculator, (<http://landdb1.nascom.nasa.gov/cgi-bin/developer/tilemap.cgi>). Una vez generadas las series de tiempo, mediante programa SIGMA PLOT, fue generado el análisis

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

gráfico de la serie de datos de IAF para cada sitio considerando 5 repeticiones en cada sitio, localizando cada punto de muestreo centrado en el polígono de lenga de interés considerando un distanciamiento desde el borde de cada formación estudiada para reducir el efecto de borde y de mezclado con otras formaciones colindantes de la misma especie.

3.3. Técnicas de análisis

3.3.1. Protocolos utilizados en el proceso de datos

La obtención de IAF se realizó siguiendo la metodología señalada por Hongliang y Shunlin (2005). La generación de series de tiempo generó la descripción temporal cada 8 días de IAF, mostrando el comportamiento a través de las estaciones climáticas consecutivas del año 2005 (verano, otoño, invierno, primavera e inicio de verano 2006). Este proceso fue desarrollado por medio de la generación de códigos computacionales sobre plataforma Matlab.

3.3.2. Selección de árboles muestra en parcela de muestreo

En la Reserva Nacional Trapananda se identificaron y muestrearon dos rodales de lenga, cada uno en distintos estados de desarrollo, uno adulto manejado y el otro rodal joven en condición de latizal. En cada rodal se generaron tres parcelas de muestreo. Las coordenadas UTM centrales de rodal de lenga en estado latizal y adulto son respectivamente: (279180; 4972370) y (282890; 4972360).

Se generó una parcela de 1000 m² en cada rodal. Dentro de la parcela se midió el diámetro a la altura del pecho (1,3 m) de todos los árboles presentes con lo cual se determinó la distribución de diámetro a altura de pecho (DAP) al cuadrado en cada rodal empleando para ello la ecuación 1, generando la distribución de las frecuencias diamétricas de cada rodal. Cada distribución se dividió en tercios y se determinó la marca de clase media de cada tercio. Posterior a esto se identificó el árbol con DAP² más cercano a la marca de clase, el cual se seleccionó como árbol muestra para ser volteado, extrayendo tres individuos por clase.

$$DCM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

Ecuación (1)

Siendo DCM = el diámetro cuadrático medio, d^2 = diámetro cuadrático a la altura del pecho (Dap²) y n = número total de árboles en la parcela.

En los árboles volteados, se midió la longitud de copa viva, que a su vez fue dividida en tres estratos iguales más un cuarto que corresponde al fuste libre de ramas. Después se procedió a la extracción de cada una de las ramas manteniendo la procedencia longitudinal. Después cada una de las ramas fue dividida en cuatro secciones, en donde una corresponde a la rama libre de ramillas. Se definió en forma arbitraria el concepto de rama, por falta de definición apropiada a la investigación,

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

siendo considerada como aquella estructura leñosa que tiene un punto de inserción en el fuste y que posee un diámetro mayor a un centímetro. Para el caso de las rodelas se obtuvieron muestras a la altura del tocón, a la altura del DAP y a la altura media entre el tocón y el dap, y cada luego cada 1 m a partir de esta última medición.

3.3.3. Determinación de peso verde y de retención de agua en cada componente

Después de realizar la desagregación de las ramas, se procedió a la obtención del peso verde total de cada uno de los componentes (hojas, ramillas y ramas) por estrato (según la procedencia radial y longitudinal). Desde ahí se obtuvieron 3 muestras de cada componente conservando su procedencia, las que fueron pesadas con una balanza digital, obteniéndose el peso verde para después sumergirlas en un recipiente con agua para obtener el peso verde más el peso con agua retenida. La diferencia entre estos dos pesos permitió obtener la cantidad de agua retenida de cada muestra de cada componente por medio de la ecuación 2.

$$AR_j = PVCA_j - PV_j \quad \text{Ecuación (2)}$$

Siendo AR_j = agua retenida por la muestra j de cada componente del estrato i (g), $PVCA_j$ = peso verde más el agua retenida de la muestra j de cada componente del estrato i (g) y PV_j = peso verde de la muestra j de cada componente del estrato i (g).

Posterior a la obtención de agua retenida, se obtuvieron los promedios de cada estrato para cada componente (hojas, ramas y ramillas). Después cada muestra de cada estrato, fue almacenada en bolsas para su traslado a laboratorio.

$$AR_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 AR_j \quad \text{Ecuación (3)}$$

Siendo AR_i = agua retenida promedio de cada componente del estrato i (g) y AR_j = cantidad de agua retenida por la muestra j de cada componente del estrato i (g).

3.3.4. Método para estimar superficie foliar

La superficie específica fue estimada por medio de la unidad de superficie por unidad de peso verde, del promedio de las muestras de cada componente en cada estrato. El producto entre éstas y el peso verde total de cada componente en cada estrato permite estimar el área total de cada estrato con la siguiente secuencia de ecuaciones desarrolladas (Levia, 2008).

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

$$PV_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 PV_j$$

Ecuación (4)

$$R_{Si} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{PV_i}$$

Ecuación (5)

$$S_{ii} = R_{Si} \times PV_{ii}$$

Ecuación (6)

Siendo PV_j = peso verde de la muestra j de cada componente en el estrato i (g), PV_i = peso verde promedio de la muestra del estrato i del árbol (g), R_{Si} = razón de superficie de la sección en el estrato i de árbol ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$), S_i es la superficie promedio de la muestra de la sección del estrato i (cm^2), S_{ii} es la superficie total de la sección en el estrato i (cm^2) y PV_{ii} es el peso verde total del estrato i (g).

Con el instrumento LICOR 2000, se obtuvo el índice de área foliar de los rodales, en donde se realizó una medición afuera del rodal (cielo libre de nubes) y 30 mediciones adentro de cada rodal estudiado alrededor de las parcelas, obteniéndose un promedio de IAF de cada uno de los rodales. Estas mediciones se realizaron siguiendo los protocolos de uso del instrumento (Dovey y du Toit, 2003).

Entre el 17 de Enero del 2006 y el 26 de Febrero del 2006 se tomaron datos de IAF en terreno con el instrumento LICOR 2000 para compararlos con los datos de IAF provenientes del satélite MODIS.

3.3.5. Determinación de superficie de manto de ramillas, ramas y fuste

Para determinar la superficie de manto de ramas y ramillas, estas fueron escaneadas usando el escáner (HP Scanjet 4070), en donde a cada muestra se aplicó pintura de color negro opaco y como fondo, una tabla de color blanco, a una distancia entre muestra y tapa de escáner, de 3 cm para obtener un mayor contraste y disminuir el efecto de sombra.

Después de escanear cada una de las ramas y ramillas, se procedió a la obtención de las superficies proyectadas de ramas y ramillas empleando clasificación digital no supervisada ISODATA empleando el programa ENVI 4.0 ® con el objeto de generar dos categorías de clase, donde una correspondía a la proyección de la rama o de la ramilla pintada, y la otra a fondo blanco. Posteriormente con el mismo programa se realizó un análisis estadístico que cuantificó el número de píxeles que correspondían a la figura de rama o ramilla proyectada por el escáner. Una vez obtenidas la superficie proyectada se procedió a la generación de la superficie de manto mediante empleo de la ecuación 7:

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

$$S_j = \pi \times IM_j \quad \text{Ecuación (7)}$$

Siendo S_j = superficie de manto del segmento de la muestra j (mm^2), IM_j = superficie plana de la imagen procesada (mm^2) y $\pi = 3,1415$.

Para el caso de ramas de gran tamaño se utilizó un pie de metro obteniéndose 8 medidas de espesores y de diámetros en ambas caras de la rama, y así generándose la longitud y los diámetros promedios para obtener la superficie de manto. Después de la obtención de cada una de las superficies de manto se procedió a la obtención de los promedios de cada estrato del árbol.

$$S_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 S_j \quad \text{Ecuación (8)}$$

Siendo S_i = superficie de manto promedio del estrato i de cada uno de los segmentos (mm^2).

La superficie de manto de las rodela se obtuvo mediante el promedio de ocho medidas de longitud y de diámetro.

$$S_l = \pi \times \bar{d} \times \bar{e} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Siendo S_l = superficie de manto de la rodela en el tercio longitudinal i (mm^2), \bar{d} = diámetro promedio de la rodela en el tercio longitudinal i (mm), \bar{e} = espesor promedio de la rodela en el tercio longitudinal i (mm) y $\pi = 3,1415$.

La superficie de manto de fuste fue obtenida a partir de los diámetros del fuste, generándose un diámetro promedio de cada una de las rodela y la altura en el árbol, de esta forma se aplicó a cada segmento del árbol, para luego sumarlos.

$$SMF_i = \pi \cdot \frac{(d_i + d_{i+1})}{2} \cdot (h_{i+1} - h_i) \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$SMFT = \sum_{i=1}^n SMF_i \quad \text{Ecuación (11)}$$

Siendo SMF_i = superficie de manto del fuste del segmento i (m^2), d_i = diámetro de la rodela a la altura i (cm^2), d_{i+1} = diámetro de la rodela a la altura $i+1$ (cm^2), h_{i+1} = altura más alta de la rodela i (m), h_i = altura más baja de la rodela i (m) y $SMFT$ = superficie total del fuste (m^2).

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

3.3.6. Agua retenida en hojas, ramillas, ramas y fuste

El agua retenida específica, esto es unidades de peso por unidad de área obtenidas en cada estrato, permitió estimar la cantidad total de agua retenida interceptada de cada sección en cada estrato, con las siguientes fórmulas.

$$R_{ARi} = \sum_{i=1}^n \frac{AR_i}{S_i} \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$AR = R_{ARi} \times S_{ii} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$AR_f = SMFT \times \frac{R_{ARi}}{4} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Siendo R_{ARi} = razón de agua retenida promedio de la sección en el estrato i ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$), S_i = superficie promedio de la sección del estrato i (cm^2), AR_i = agua retenida promedio de la muestra del estrato i (g), S_{ii} = superficie total de la sección en el estrato i (cm^2), AR = agua retenida total del estrato (g) y AR_f = agua retenida por todo el fuste (g).

Después se obtuvo los valores por hectárea, en donde la superficie total de cada componente se relacionó con el (DAP) y la cantidad de agua retenida total con la superficie total de cada componente.

4. Descripción y análisis de resultados

El comportamiento medio del índice de área foliar en formación de *Nothofagus pumilio* en reserva nacional Trapananda adquirido por medio de datos del satélite MODIS entre 2002-2006 cada 8 días a partir del producto MOD15A2 muestra un comportamiento cíclico del tipo sinusoidal (figura 3).

Las funciones para estimar la superficie de cada componente de la biomasa aérea de *N. pumilio* es mostrada en la tabla 1.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

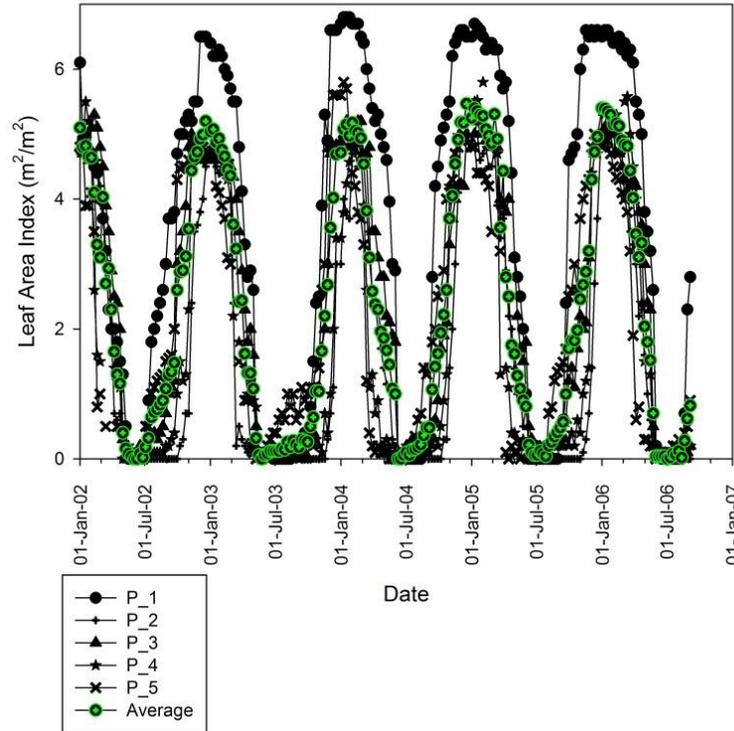


Figura 3. Comportamiento medio del índice de área foliar en formación de *Nothofagus pumilio* en reserva nacional Trapananda adquirido por medio de datos del satélite MODIS entre 2002-2006 cada 8 días a partir del producto MOD15A2.

Tabla 1. Funciones para estimar superficie de cada componente de la biomasa aérea de *N. pumilio*

Rodal	Función ajustada	RCME (m ²)	n
Adulto	$Sup_H = 0.380 \cdot e^{(0.21 \cdot dap)}$	1.639	3
	$Sup_Rs = 0,362 \cdot e^{(0.192 \cdot dap)}$	0.051	
	$Sup_R = 0.019 \cdot e^{(0.297 \cdot dap)}$	0.508	
	$Sup_F = 0.659 \cdot e^{0.079 \cdot dap}$	0.138	
Latizal	$Sup_H = 0.877 \cdot e^{(0.215 \cdot dap)}$	2.686	3
	$Sup_Rs = 0.231 \cdot e^{(0.235 \cdot dap)}$	0.163	
	$Sup_R = 0.186 \cdot e^{(0.156 \cdot dap)}$	0.014	
	$Sup_F = 0.419 \cdot e^{(0.093 \cdot dap)}$	0.010	

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

Donde:

Sup_H es la superficie de manto de hojas en (m^2).

Sup_Rs es la superficie de manto de ramillas (m^2).

Sup_R es la superficie de manto de ramas (m^2).

Sup_F es la superficie manto de fuste (m^2).

dap es el diámetro a la altura del pecho, 1.3 m (cm).

Las funciones para estimar el agua retenida por superficie de componentes de la biomasa aérea de *N. pumilio* es mostrada en la tabla 2.

Tabla 2. Funciones para estimar el agua retenida por superficie de componentes de la biomasa aérea de *N. pumilio*

Rodal	Función ajustada	RCME (kg)	n
Adulto	$ARRH = 0,065 * Sup_H$	0.036	3
	$ARRs = 0,057 * Sup_Rs$	0.048	
	$ARR = 0,072 * Sup_R$	0.045	
	$ARF = 0,144 * Sup_F$	0.144	
Latizal	$ARRH = 0,069 * Sup_H$	0.049	3
	$ARRs = 0,052 * Sup_Rs$	0.044	
	$ARR = 0,044 * Sup_R$	0.005	
	$ARF = 0,082 * Sup_F$	0.007	

Donde:

Sup_H , es la superficie de manto de hojas en (m^2).

Sup_Rs , es la superficie de de manto de ramillas (m^2).

Sup_R , es la superficie de de manto de ramas (m^2).

Sup_F , es la superficie de manto de fuste (m^2).

$ARRH$, es la cantidad de agua retenida por hojas (g).

$ARRs$, es la cantidad de agua retenida por las ramillas (g).

ARR , es la cantidad de agua retenida por las ramas (g).

ARF , es la cantidad de agua retenida por el fuste (g).

La superficie total de los componentes por árbol es mostrada en la tabla 3.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

Tabla 3. Superficie total de los componentes por árbol

Rodal	CD	Hojas (m ²)	Ramillas (m ²)	Ramas (m ²)	Fuste (m ²)	Total (m ²)
Adulto	1	6.95	4.34	1.39	1.76	14.43
	2	13.91	10.02	3.11	2.69	29.72
	3	49.57	29.77	18.12	4.03	101.49
Latizal	1	2.48	1.12	0.57	0.82	4.99
	2	8.99	2.32	0.82	1.02	13.15
	3	9.93	3.47	1.14	1.24	15.77

La superficie total de cada componente por hectárea en el rodal adulto es mostrada en la tabla 4

Tabla 4. Superficie total de cada componente por hectárea en el rodal adulto

Clase Diamétrica	Número de árboles / ha	Superficie (m ² /ha)			
		Hojas	Ramillas	Ramas	Fuste
6	74	99.8	84.7	8.6	78.5
8	193	395.8	323.1	40.4	238.9
10	281	882.3	692.8	107	408.9
12	296	1,416.30	1,069.90	204	504.1
14	356	2,591.80	1,883.30	443.3	708.5
16	267	2,964.40	2,072.10	602.2	622.3
18	252	4,269.50	2,870.80	1,030.20	688.3
20	133	3,447.00	2,229.60	987.8	426.8
22	44	1,752.20	1,090.20	596.4	166.6
24	104	6,235.10	3,731.80	2,520.50	455.3
26	44	4,075.10	2,346.20	1,956.50	228.5
28	44	6,214.60	3,441.80	3,543.60	267.6
30	30	6,318.20	3,366.00	4,278.80	209
32	15	4,817.70	2,468.90	3,874.90	122.4
	2133	45,479.80	27,671.50	20,194.30	5,125.70

La superficie total de cada componente por hectárea en el rodal latizal es mostrada en la tabla 5.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

Tabla 5. Superficie total de cada componente por hectárea en el rodal latizal

Clase Diamétrica	Numero de árboles / ha	Superficie (m ² /ha)			
		Hojas	Ramillas	Ramas	Fuste
4	233	489.1	137.4	80.8	141.7
6	1867	6,028.20	1,760.30	884.5	1,368.60
8	1867	9,272.50	2,814.70	1,208.30	1,649.30
10	1733	13,239.00	4,177.80	1,532.30	1,845.00
12	767	9,012.80	2,956.70	926.5	984.1
14	33	596.5	203.4	54.5	51
16	33	917.5	325.3	74.4	61.5
18	67	2,865.20	1,056.00	206.4	150.5
	6600	42,420.80	13,431.50	4,967.60	6,251.70

La capacidad de retención de agua (ton/ha) en rodal latizal es mostrada en la tabla 6.

Tabla 6. Capacidad de retención de agua (ton/ha) en estructuras aéreas de rodal latizal

Estación	IAF (m ² /m ²)	Sup. de hojas m ² /ha	Hojas Ton/ha/año	Ramillas Ton/ha	Ramas Ton/ha	Fuste Ton/ha	Total (Ton/ha)
Invierno	0.33	3300	0.2284	0.7011	0.2209	0.5126	1.663
Primavera	3.77	37700	2.6088	0.7011	0.2209	0.5126	4.0434
Verano	3.79	37900	2.6227	0.7011	0.2209	0.5126	4.0573
Otoño	0.47	4700	0.3252	0.7011	0.2209	0.5126	1.7598

En el caso de la estación invernal, la retención total de agua por las estructuras aéreas equivale a retener 0.1663 mm de precipitación, lo que sube a 0.404 mm en época de primavera.

La capacidad de retención de agua (ton/ha) en rodal adulto es mostrada en la tabla 7.

Tabla 7. Capacidad de retención de agua (ton/ha) en estructuras aéreas de rodal adulto

Estación	IAF (m ² /m ²)	Sup. de hojas m ² /ha	Hojas Ton/ha/año	Ramillas Ton/ha	Ramas Ton/ha	Fuste Ton/ha	total (Ton/ha)
Invierno	0.1	1000	0.0692	1.5807	1.4585	0.7366	3.845
Primavera	3.34	33400	2.3113	1.5807	1.4585	0.7366	6.0871
Verano	3.8	38000	2.6296	1.5807	1.4585	0.7366	6.4054
Otoño	0.3	3000	0.2076	1.5807	1.4585	0.7366	3.9834

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

En el caso de la estación invernal, la retención total de agua por las estructuras aéreas equivale a retener 0.3845 mm de precipitación, lo que sube a 0.608 mm en época de primavera.

La estimación de retención de agua por transformación de hoja a materia orgánica/ha/año según tipo de rodal es mostrada en la tabla 8.

Tabla 8. Estimación de retención de agua por transformación de hoja a materia orgánica/ha/año según tipo de rodal

Clase Dap	Adulto (hojas)				Latizal (hojas)			
	Sup (m ² /ha)	PS (kg/ha)	MO (kg/ha)	AR (kg/ha)	Sup (m ² /ha)	PS (kg/ha)	MO (kg/ha)	AR (kg/ha)
4	-	-	-	-	489.1	44.1	7.9	34.1
6	99.8	6.6	1.2	5.1	6,028.2	518.1	93.3	401.0
8	395.8	27.4	4.9	21.2	9,272.5	760.6	136.9	588.7
10	882.3	63.9	11.5	49.5	13,239.0	1,036.9	186.6	802.6
12	1,416.3	107.6	19.4	83.3	9,012.8	673.3	121.2	521.2
14	2,591.8	206.5	37.2	159.9	596.5	43.0	7.7	33.3
16	2,964.4	247.7	44.6	191.7	917.5	63.1	11.4	48.8
18	4,269.5	374.2	67.4	289.6	2,865.2	185.3	33.4	143.4
20	3,447.0	316.8	57.0	245.2	-	-	-	-
22	1,752.2	168.9	30.4	130.7	-	-	-	-
24	6,235.1	630.4	113.5	487.9	-	-	-	-
26	4,075.1	432.1	77.8	334.4	-	-	-	-
28	6,214.6	691.0	124.4	534.9	-	-	-	-
30	6,318.2	736.8	132.6	570.3	-	-	-	-
32	4,817.7	589.2	106.1	456.1	-	-	-	-
Total	45,479.8	4,599.2	827.9	3,559.8	42,420.8	3,324.3	598.4	2,573.0

Donde:

PS: Peso seco.

MO: Materia orgánica.

AR: Agua retenida.

En el caso del bosque adulto, la retención anual de agua por hojas descompuestas y transformadas en materia orgánica al cabo de 3 años de permanecer en el bosque post caída desde árbol es de 3560 Kg/ha/año, lo que es equivalente a decir que puede retener 0.356 mm de precipitación, por lo que dado que la mayor parte de los rodales de lenga tienen sobre 60 años de edad, la capacidad de retención de agua asumiendo que la materia orgánica se encuentra en estado seco, sería de 21.36 mm lo que es capaz de absorber grandes volúmenes de agua lluvias de esa magnitud como lo muestra la figura 4.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

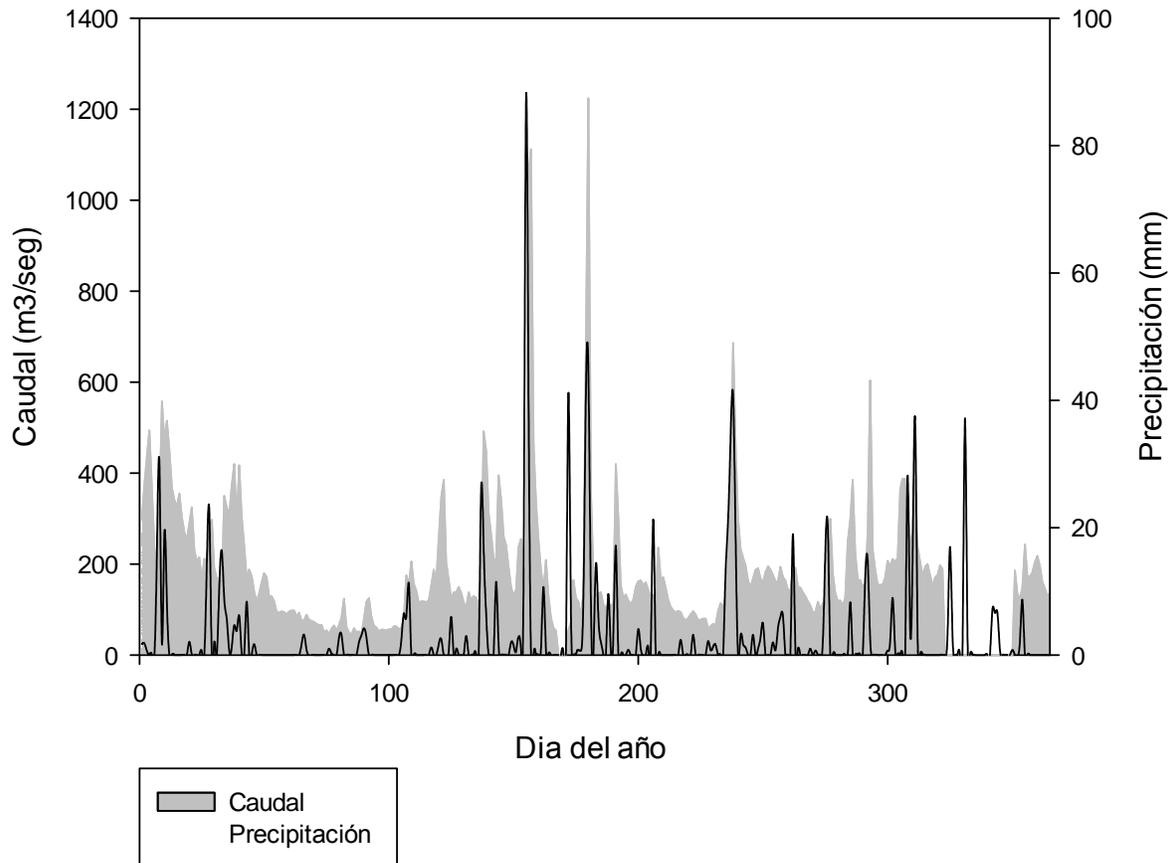


Figura 4. Distribución de la precipitación y caudal diario durante el año 2010 en las estaciones Villa Ortega y Río Mañiguales respectivamente, cercanas a la Reserva nacional Trapananda.

En el caso del bosque joven, la retención anual de agua por hojas descompuestas y transformadas en materia orgánica al cabo de 3 años de permanecer en el bosque post caída desde árbol es de 2573 Kg/ha/año, lo que es equivalente a decir que puede retener 0.2573 mm de precipitación, por lo que dado que la mayor parte de los rodales de lenga tienen sobre 40 años de edad, la capacidad de retención de agua asumiendo que la materia orgánica se encuentra seca, sería de 10.292 mm.

Los valores de IAF generados a partir de MODIS comparados con los valores obtenidos desde muestreo en terreno con instrumento LICOR 2000 muestran un error menor a un 2 %, lo cual está dentro de los estándares normales de precisión de IAF.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

La lenga es capaz de producir anualmente una cantidad de hojarasca que al cabo de 3 años aproximadamente llega a transformarse en materia orgánica, en donde esta adquiere una capacidad de retener en promedio entre bosque adulto y joven, de acuerdo a la producción anual de hoja, 2566 kilos de agua/ha, o equivalente a retener 0,2566 mm de agua lluvia o nieve equivalente, en que al considerar un bosque de lenga joven de 40 años, la retención de agua se eleva a 40 veces lo que dados los histogramas de precipitaciones máximas de la zona permiten acumular importantes volúmenes de agua en bosque.

La lenga es capaz de interceptar en promedio en primavera entre bosque adulto y joven 5065 Kilos de agua/ha por concepto de superficie de las hojas, superficie de manto de ramillas, superficie de manto de ramas y fuste, por lo que eventos de precipitación que sobrepasen esta capacidad de absorción de agua, irán a iniciar el mojado de la hojarasca localizada sobre el piso forestal desde 1 a 3 años aproximadamente, una vez esta hojarasca se haya saturado, llegará a la materia orgánica acumulada, y si esta materia orgánica se satura, solo entonces el agua alcanzará al suelo mineral localizado bajo la capa de materia orgánica. La capacidad de absorción de agua por la materia orgánica dependerá además del estado de saturación en que esta se encuentre al momento de iniciar un evento de precipitación. Es decir ante un evento de precipitación, la capacidad máxima aproximada de retención de agua en el bosque de lenga de 40 años es de 11 mm.

5. Discusión y valoración de resultados

Las grandes extensiones de superficie de lenga presentes en la zona sur de Chile hace posible el empleo de tecnologías satelitales con resoluciones espaciales de 1 km, requiriéndose otras fuentes de datos en caso de existir un alto grado de desagregación de la cobertura de bosque de lenga, ello debido al efecto de borde entre bosques de lenga y praderas.

Los resultados obtenidos en esta etapa de investigación permiten mejorar sustancialmente la precisión de modelos de escorrentía superficial debido a que se conoce en forma precisa y periódica el IAF y la producción de materia orgánica basada en la producción de hoja de los bosques de lenga.

Los resultados obtenidos en la estimación de absorción de agua por la materia orgánica consideraron una descomposición basada en bacterias, hongos y virus, sin contemplar la descomposición por medio de insectos en distintos estados de desarrollo. Es posible que la descomposición por parte de estos, genere una mayor descomposición y por lo tanto una mayor tasa de absorción de agua por unidad de masa de materia orgánica que la obtenida en la presente investigación. Antecedentes bibliográficos indican que existe materia orgánica altamente descompuesta con capacidad para retener hasta 20 veces su peso seco equivalente en agua. Ello en comparación con los resultados obtenidos superan en un 600% la capacidad de absorción de agua (Sumner, 2000).

Al buscar no cortar la relación entre superficie foliar verde, masa seca, masa descompuesta no fue factible tomar muestras en profundidad del horizonte de materia orgánica debido a desconocer la superficie foliar verde, masa seca desde donde estas provienen.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

6. Conclusiones

Es posible generar relaciones biofísicas en la especie Lenga para determinar la producción de biomasa foliar anual empleando datos de campo y datos satelitales de la plataforma MODIS (satélite TERRA o AQUA) basado en la estrecha relación existente entre el índice de área foliar generada por MODIS y la superficie foliar determinada en terreno.

Debido a la relación existente entre área foliar determinada en terreno y la obtenida a partir de la plataforma MODIS, es que al establecer el factor de conversión de la descomposición de la hoja de lenga a materia orgánica, y posteriormente, establecer la capacidad de retención de agua que esta materia orgánica producida es capaz de retener, es posible estimar la cantidad de volumen de agua potencial factible de ser mantenida en el bosque por esta materia orgánica generada a partir de su producción foliar.

Referencias bibliográficas

- Balairón, L. (2002): *Gestión de recursos hídricos*. Ediciones UPC, Catalunya, España 478 p.
- Caldentey, J., Ibarra, M. y Hernández, J. (2001): "Litter fluxes and decomposition in *Nothofagus pumilio* stands in the Región of Magallanes, Chile", *Forest Ecology and Management*, 148: 145-157.
- Chang, M. (2006): *Forest Hydrology: An Introduction to Water and Forests*. Ed Taylor & Francis Group, 474 p.
- Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1994): *Hidrología aplicada*. Editorial McGraw-Hill interamericana, Santafé de Bogotá, Colombia, 584 p.
- Conaf; Conama, Birf, Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile y Universidad Católica de Temuco (1999): *Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Informe Nacional con Variables Ambientales*. Santiago, Chile.
- Corvasce, M., Zsolnay, A., D'Orazio, V., López, R. y Miano, T.M. (2006): "Characterization of water extractable organic matter in a deep soil profile", *Chemosphere*, 62, 1583-1590.
- Cote, L., Brown, S., Pare, D., Fyles, J. y Bauhus, J. (2000): "Dynamics of carbon and acid nitrogen mineralization in relation to stand type, stand age, and soil texture in the boreal mixedwood", *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 1079-1090.
- Dai, K., David, M. B. y Vance, G. F. (1996): "Characterization of solid and dissolved carbon in a spruce-fir Spodosol", *Biogeochemistry*, 35, 339-365.
- Deguchi, A., Hattori, S. y Park, H. T. (2006): "The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model", *Journal of Hydrology*, 318, 80-102.
- Dirección General De Aguas (2004): *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Aysén*.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): "Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

Donoso, C. (1981): *Tipos forestales de los bosques nativos de Chile*. Doc. de Trabajo N° 38 FAO FO:/CH/76/003, 70 pp.

Dovey, S. y du Toit, B. (2006): "Calibration of LAI-2000 canopy analyser with leaf area index in a young eucalyptus stand", *Trees*, 20, 273-277.

Fattorelli, S. y Fernández, P. (2007): *Diseño Hidrológico*. Editorial Zeta. 2007. Mendoza, Argentina, 626 p.

Fenton, T. E., Kazemi, M. y Lauterbach-Barrett, M. A. (2005): "Erosional impact on organic matter content and productivity of selected Iowa soils", *Soil & Tillage Research*, 81, 163-171.

Fioletto, A., Musacchio, A., Andolfi, G. y Virzo De Santo, A. (1998): "Decomposition dynamics of litters of various pin species in a corsican pine forest", *Soil Biol. Biochem.*, 30, 721-727.

Franklin, O., Hogberg, P., Ekblad, A. y Agren, G. I. (2003): "Pine forest floor carbon accumulation in response to N and PK additions: bomb C-14 modelling and respiration studies", *Ecosystems*, 6, 644-658.

Geddes, N. y Dunkerley, D. (1999): "The influence of organic litter on the erosive effects of raindrops and of gravity drops released from desert shrubs", *Catena*, 36, 303-313.

Giardina, C. P., Ryan, M. G., Hubbard, R. M. y Binkley, D. (2001): "Tree species and soil textural controls on carbon and nitrogen mineralization rates", *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1272-1279.

He, M., Douglas, I. y Chen, Z. (1997): *Hydrological effects of forests in northwestern Sichuan, China. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty*. IAHS, Publ. no. 240.

Herbst, M., Rosier, P. T. W., Mcneil, D. D., Harding, R. J. y Gowing, D. J. (2008): "Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest", *Agricultural and forest meteorology*, 148, 1655-1667.

Hongliang, F. y Liang, S. (2005): "A hybrid inversion method for mapping leaf area index from MODIS data: experiments and application to broadleaf and needleleaf canopies", *Journal of Remote Sensing of Environment*, 94, 405-424.

Hongve, D., Van Hees, P. A. W. y Lundström, U. S. (2000): "Dissolved component in precipitation water percolated through litter", *European Journal of Soil Science*, 51, 667-677.

Hörmann, G., Branding, A., Clemen, T., Herbst, M., Hinrichs, A. y Thamm, F. (1996): "Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in Northern Germany", *Agricultural and forest meteorology*, 79, 131-148.

Hüman, M., Schüler, G., Müller, C., Schneider, R., Johst, M. y Caspari, T. (2011): "Identification of runoff processes – The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods", *Journal of Hydrology*, 409, 637-649.

Koutika, L., Sanginga, N., Vanlauwe, B. y Weise, S. (2002): "Chemical properties and soil organic matter assessment under fallow systems in the forest margins benchmark", *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 757-765.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): “Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

Kuhn, N. & Armstrong, E. (2012): “Erosion of organic matter from sandy soils: Solving the mass balance”, *Catena*, 98, 87-95.

Levia, J.D.F. (2008): “A generalized allometric equation to predict foliar dry weight on the basis of trunk diameter for eastern white pine (*Pinus strobus* L.)”, *Forest Ecology and Management*, 255, 1789-1792.

Mao, D., Min, Y. W., Yu, L. L., Martens, R. y Insam, H. (1992): “Effect of afforestation on microbial biomass and activity in soil of tropical China”, *Soil Biology and Biochemistry*, 24, 865-872.

Marchetti, A., Piccini, C., Francaviglia, R. y Mabit, L. (2012): “Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: A key indicator to assess soil degradation status in central Italy”, *Pedosphere*, 22, 230-242.

Mo, J., Brown, S., Peng, S. y Kong, G. (2003): “Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China”, *Forest Ecology and Management*, 175, 573–583.

Moretto, A., Lazzari, A. y Fernández, O. (2005): “Calidad y cantidad de nutrientes de la hojarasca y su posterior mineralización en bosques primarios y bajo manejo con distintos sistemas de regeneración”. *Módulo 1, Aplicación de sistemas de regeneración con retención dispersa y agregada en bosques de *Nothofagus pumilio* de Tierra del Fuego.*

Olofsson, P. y Eklundh, L. (2007): “Estimation of absorbed PAR across Scandinavia from satellite measurements. Part II: Modeling and evaluating the fractional absorption”, *Remote Sensing of Environment*, 110, 240-251.

Polyakov, V. y Lal, R. (2004): “Modeling soil organic matter dynamic as affected by soil water erosion”, *Environmental international*, 30, 547-556.

Propastin, P. y Erasmi, S. (2010): “A physically based approach to model LAI from MODIS 250 m data in a tropical region”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 47-59.

Pypker, T. G., Bond, B. J., Link, T. E., Marks, D. y Unsworth, M. H. (2005): “The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall. Examples from a young and old-growth Douglas-fir forest”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 130, 113-129.

Sariyildiz, T. y Anderson, J. M. (2003): “Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study”, *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 391-399.

Sayer, E.J. (2006): “Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems”, *Biol. Rev.*, 81, 1-31.

Schlatter, J. E. (1994): “Requerimientos de sitio para la lenga, *Nothofagus pumilio* (Poepp. Et Endl.) Krasser”, *Revista Bosque*, 15, 3-10.

Steinberger, Y. y Whitford, W. G. (1988): “Decomposition process in Negev ecosystems”, *Oecologia* (Berlín), 75, 61-66.

Sumner, M. (2000): *Handbook of Soil Science*. CRC Press, New York.

González, D., Fuentes, R., Cano, C., Jorquera, C. y Donoso, F. (2013): “Análisis de la fenología foliar de lenga a través de series de tiempo y su efecto en el ciclo hidrológico, asistido por datos del satélite MODIS”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-2, p. 112-132. ISSN: 1578-5157

Traversa, A, D’Orazio, V. y Senesi, N. (2008): “Properties of dissolved organic matter in forest soils. Influence of different plant covering”, *Forest Ecology and Management*, 256, 2018-2028.

Veissman, W., Lewis, G. y Knapp, J. (1989): *Introduction to Hydrology*. Harper Collins Publishers, 780 p. Third edition.

Vesterdal, L. (1999): “Influence of soil type on mass loss and nutrient release from decomposing foliage litter of beech and Norway spruce”, *Canadian Journal of Forest Research*, 29, 95-105.

Ward, A. y Trimble, W. (2004): *Environmental hydrology*. Lewis Publishers, United States of America. 465 p.