

MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DEL AMBIENTE LUMÍNICO EN EL INTERIOR DEL BOSQUE. UNA REVISIÓN

MEASURING AND ESTIMATING THE BELOW-CANOPY LIGHT ENVIRONMENT IN A FOREST. A REVIEW

Álvaro Promis

Departamento de Silvicultura y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

Santa Rosa 11315, La Pintana, Casilla 9206, Santiago, Chile.

Correo-e: alvaro.promis@gmail.com

RESUMEN

El ambiente lumínico en el interior de un bosque influye en la supervivencia y crecimiento de las plántulas de especies arbóreas y en el desarrollo de las plantas del sotobosque. Por este motivo, existe mucho interés en medir el ambiente lumínico bajo el dosel de copas. Varios métodos, técnicas e instrumentos se han desarrollado para medir directamente o estimar indirectamente el ambiente lumínico en el interior del bosque. También se han realizado varios estudios que comparan la eficiencia de ambos métodos (directos e indirectos). En esta revisión se describen varios instrumentos, técnicas y metodologías para estimar el ambiente lumínico, indicando la naturaleza y propiedades de cada uno de ellos, como apoyo para la elección del equipamiento necesario y así responder a las necesidades del investigador en este tema.

PALABRAS CLAVE: Radiación solar, luz, medición directa, estimación indirecta, ambiente bajo el dosel arbóreo.

ABSTRACT

The below-canopy light environment influences the survival, the tree regeneration growth and the development of the understory plant species. Therefore, there has been much interest in measuring the below-canopy light environment. Several instruments, techniques and methods have been developed to measure directly or to estimate indirectly the below-canopy light environment. To date, many comparisons of direct and indirect methods for the measuring and estimation of below-canopy light environment have been conducted in order to determine the best way to measure the light in the understory. In this review a scientific description of the currently instruments, techniques and methods used to measure or to estimate the below-canopy solar radiation is shown. The nature and properties of the different methods, techniques and instruments are commented. Finally, the choice of equipment to meet the needs of the researcher in this topic is supported.

KEYWORDS: Solar radiation, light, direct measurement, indirect estimation, below-canopy environment.



Recibido: 29 de febrero de 2012
Aceptado: 12 de febrero de 2013
doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.02.014
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

La radiación solar se considera el elemento meteorológico de mayor importancia (Geiger, Aron, & Todhunter, 2003). Las variaciones temporales en la intensidad de la radiación solar tienen consecuencias ecológicas sobre las plantas afectando su fotosíntesis, morfología, tolerancia a la sombra, crecimiento y supervivencia (Kimmins, 1987). Para entender la dinámica de los bosques es importante comprender el comportamiento de la radiación solar en el interior de éstos, debido a que la calidad y la intensidad de dicha radiación afectan los patrones de regeneración de las plantas, tales como la germinación, el establecimiento, el crecimiento y la supervivencia (Grant, 1997). Es por esto, que ha existido mucho interés por mejorar la forma de medir y estimar la radiación solar bajo el dosel de un bosque (Comeau, 2000; Jennings, Brown, & Sheil, 1999).

La cantidad total de radiación solar que llega sobre el dosel de un bosque es afectada por la latitud, hora del día, claridad de la atmósfera y altitud (Kimmins, 1987). El dosel es una estructura tridimensional que cambia a través del tiempo (Grant, 1997). La superficie heterogénea del dosel modifica la reflexión, la transmisión y la absorción de la radiación solar que llega al interior del bosque (Geiger et al., 2003; Grant, 1997). De esta manera, sólo una parte de la radiación solar incidente sobre el dosel arbóreo alcanza el piso del bosque (Kimmins, 1987). Por tanto, la medición de la radiación solar bajo el dosel es complicada, pues existe una distribución irregular de la radiación solar en el espacio y en el tiempo y, una distribución variable de claros en el dosel arbóreo (Geiger et al., 2003). Generalmente, y debido a dicha variabilidad, en el interior del bosque ha sido expresada como transmitancia. Ésta se puede definir como la proporción de la radiación solar que alcanza un punto de muestreo en el interior del bosque respecto a la medida en el exterior del mismo o sobre el dosel arbóreo (Comeau, 2000).

Varios instrumentos se han diseñado y utilizado para medir directamente o para estimar indirectamente el medio ambiente lumínico bajo el dosel de un bosque (Comeau, 2000). Sin embargo, muchas veces existe confusión sobre cuáles métodos son los más apropiados y qué tipo de radiación solar se está midiendo realmente (Jennings et al., 1999). El objetivo de este trabajo es revisar los métodos disponibles para medir y estimar el ambiente de luz en el interior de los bosques y al mismo tiempo clarificar su significado.

Mediciones directas del ambiente lumínico en el bosque

Las mediciones directas del ambiente lumínico en el interior del bosque han sido clasificadas en tres grupos de acuerdo con sus implicaciones ecológicas: 1) fotométricas, 2) radiométricas y 3) quantum (Jennings et al., 1999). La medición fotométrica (lumen, lux, candela·m⁻²) es una medida de la intensidad de la luz incidente o iluminancia. Dicha medición ha sido objetada como un método para ser usado en el

INTRODUCTION

Solar radiation is considered the most important weather element (Geiger, Aron, & Todhunter, 2003). Temporal variations in solar radiation intensity have ecological consequences on plants, affecting their photosynthesis, morphology, shade tolerance, growth and survival (Kimmins, 1987). To understand forest dynamics it is important to understand the behavior of solar radiation within forests, because the quality and intensity of this radiation affect plant regeneration patterns, such as germination, establishment, growth and survival (Grant, 1997). Because of this, there has been much interest in improving the means of measuring and estimating below-canopy solar radiation in a forest (Comeau, 2000; Jennings, Brown, & Sheil, 1999).

The total amount of solar radiation reaching the forest canopy is affected by latitude, time of day, sky clarity, and altitude (Kimmins, 1987). The canopy is a three-dimensional structure that changes over time (Grant, 1997). The canopy's heterogeneous area modifies the reflection, transmission and absorption of solar radiation coming into the forest (Geiger et al., 2003; Grant, 1997). Thus, only a portion of the incident solar radiation falling upon the forest canopy reaches the forest floor (Kimmins, 1987). Therefore, measuring below-canopy solar radiation is complicated, as there is an uneven distribution of solar radiation in space and time, and a variable distribution of gaps in the forest canopy (Geiger et al., 2003). Generally, and because of this variability, below-canopy solar radiation in a forest has been expressed as transmittance. This can be defined as the ratio of solar radiation that reaches a sampling point within a forest in relation to the outside measurement or over the forest canopy (Comeau, 2000).

Several instruments have been designed and used to directly measure or indirectly estimate the below-canopy light environment in a forest (Comeau, 2000). However, there is often confusion about which methods are the most appropriate and what type of solar radiation is actually being measured (Jennings et al., 1999). The aim of this paper is to review the available methods to measure and estimate the below-canopy light environment in forests whilst clarifying their meaning.

Direct measurements of the light environment in forests

Direct measurements of the light environment within a forest have been classified into three groups according to their ecological implications: 1) photometric, 2) radiometric and 3) quantum (Jennings et al., 1999). Photometric measurement (lumen, lux, candela·m⁻²) is a measure of the incident light intensity or illuminance. This measurement has been called into question as a method for use in understanding plant ecology due to differences between the spectral sensitivities of the human eye and photosynthesis mechanisms. Furthermore, photometric measurements cannot be converted into relevant measurements for understanding plant

entendimiento de la ecología de plantas, debido a las diferencias entre las sensibilidades espectrales del ojo humano y los mecanismos de fotosíntesis. A su vez, las mediciones fotométricas no pueden ser convertidas en medidas relevantes para comprender procesos en las plantas sin el conocimiento de la composición espectral de la luz (Jennings et al., 1999). Además, la composición espectral de la luz en el interior del bosque cambia respecto a la del exterior, debido a las propiedades de reflexión, absorción y transmisión de los doseles arbóreos (Grant, 1997; Kimmins, 1987). A pesar de estos inconvenientes, las mediciones fotométricas se han utilizado para caracterizar ambientes lumínicos bajo el dosel arbóreo y para tratar de explicar algunos patrones de las plantas (Duchoslav, 2009). La medición radiométrica (joule o watt) es una medida de la radiación solar de onda corta que alcanza la superficie de la tierra. La radiación solar de onda corta puede separarse en los componentes directo y difuso, siendo la radiación solar global la suma de ambos (Klassen & Bugbee, 2005; Monteith & Unsworth, 1990). La radiación solar directa proviene desde el disco solar, mientras que la difusa incluye la radiación que es dispersada en todas las direcciones por el agua y las partículas del aire (Klassen & Bugbee, 2005; Monteith & Unsworth, 1990). Klassen y Bugbee (2005) señalan que para medir la radiación solar global se utilizan solarímetros o piranómetros (basados en respuestas termoelectricas o fotométricas). Estos autores indican, además, que los componentes directo y difuso de la radiación solar pueden ser medidos separadamente; de esta manera, la radiación solar directa es medida con pirheliómetros y la difusa con piranómetros sombreados con un disco para no medir el componente directo de la radiación solar. La medición quantum es una medida de la radiación solar fotosintéticamente activa en la longitud de onda entre 400 y 700 nm de la composición espectral de la luz (Jennings et al., 1999). Los sensores quantum se usan para medir esta radiación cuantificada normalmente en $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, una medida de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) por unidad de área y tiempo (Newton, 2007).

Existen instrumentos que se instalan bajo el dosel del bosque en forma permanente para medir directamente la radiación solar, como también sensores que se pueden utilizar manualmente (Comeau, 2000). Los sensores instalados permanentemente permiten un registro continuo de la radiación solar y la radiación solar fotosintéticamente activa. Es posible registrar la información de dichas radiaciones continuamente por periodos prolongados mediante el uso de piranómetros y sensores quantum conectados a un aparato de colección o almacenamiento de información continua (dataloggers) (Comeau, 2000; Lieffers, Messier, Stadt, Gendron, & Comeau, 1999; Newton, 2007). Sin embargo, la radiación solar bajo el dosel es muy variable debido al movimiento diurno del sol, a las condiciones meteorológicas y a los cambios en el dosel del bosque (Jennings et al., 1999; Lieffers et al., 1999). Por lo tanto, para caracterizar esta alta variabilidad del ambiente lumínico se requiere instalar un gran número de sensores, lo que muchas veces afecta los

processes without knowledge of the spectral composition of light (Jennings et al., 1999). In addition, the spectral composition of light inside the forest changes in relation to that outside, due to the properties of reflection, absorption and transmission of forest canopies (Grant, 1997; Kimmins, 1987). Despite these drawbacks, photometric measurements have been used to characterize below-canopy light environments and to try to explain some plant patterns (Duchoslav, 2009). Radiometric measurement (joules or watts) is a measure of the short-wave solar radiation reaching the earth's surface. Short-wave solar radiation can be separated into direct and diffuse components, with global solar radiation being the sum of both (Klassen & Bugbee, 2005; Monteith & Unsworth, 1990). Direct solar radiation comes from the Sun's disc, while diffuse radiation includes that which is scattered in all directions by water and air particles (Klassen & Bugbee, 2005; Monteith & Unsworth, 1990). Klassen and Bugbee (2005) state that for measuring global solar radiation, either solarimeters or pyranometers (based on thermoelectric or photometric responses) are used. These authors further indicate that direct and diffuse components of solar radiation can be measured separately; thus, direct solar radiation is measured with pyrheliometers and indirect with pyranometers shaded with a disc to prevent measuring the direct component of solar radiation. Quantum measurement is a measure of the photosynthetically active solar radiation in the wavelength between 400 and 700 nm of the spectral composition of light (Jennings et al., 1999). Quantum sensors are used to measure this radiation typically quantified in $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, a measure of the photosynthetic photons flux density (PPFD) per area unit and time (Newton, 2007).

There are instruments that are permanently installed under the forest canopy to directly measure solar radiation, as well as sensors that can be utilized manually (Comeau, 2000). Permanently installed sensors allow for a continuous record of solar radiation and photosynthetically active solar radiation. It is possible to continuously record information of these radiations for prolonged periods using pyranometers and quantum sensors connected to a storage or collection device of continuous information (dataloggers) (Comeau, 2000; Lieffers, Messier, Stadt, Gendron, & Comeau, 1999; Newton, 2007). However, the below-canopy solar radiation in a forest is highly variable due to the Sun's diurnal motion, weather conditions and changes in the forest canopy (Jennings et al., 1999; Lieffers et al., 1999). Hence, for characterizing this high variability in the light environment, a large number of sensors must be installed, which often affects research costs and implementation (Jennings et al., 1999). Thus, for instantaneous measurements of the solar radiation beneath the canopy, between 4 and 800 sensors are recommended, whereas to obtain daily averages only 1 to 10 sensors are needed (Balandier, Sonohat, Sinoquet, Verlet-Grancher, & Dumas, 2006; Baldocchi & Collineau, 1994). Handheld sensors include instruments containing a sensor such as the LI-COR LAI-2000 model or multiple-linear sen-

costos y la implementación de investigaciones (Jennings et al., 1999). Así, para mediciones instantáneas de la radiación solar bajo el dosel se recomienda el uso de entre cuatro y 80 sensores y, para obtener sólo promedios diarios se necesitan entre uno y 10 sensores (Balandier, Sonohat, Sinoquet, Verlet-Grancher, & Dumas, 2006; Baldocchi & Collineau, 1994). En los sensores de uso manual se incluyen los instrumentos que contienen un sensor como el LI-COR modelo LAI-2000 o sensores lineales múltiples. Los sensores lineales múltiples consisten en una barra con varios sensores quantum sensitivos al ancho de banda de la radiación solar fotosintéticamente activa, por ejemplo, el ceptómetro AccuPAR Decagon modelo LP-80 activa; (Newton, 2007). Por un lado, el LAI-2000 mide la luz difusa (restringida la longitud de onda entre 320 y 490 nm) con una lente casi hemisférica (campo de visión de 148°) que presenta cinco anillos detectores concéntricos de silicio (Newton, 2007; Strachan, Stewart, & Pattey, 2005). Por otro lado, el ceptómetro AccuPAR mide DFFF con 80 sensores en la longitud de onda entre 400 y 700 nm (Strachan et al., 2005). Ambos sensores se han utilizado frecuentemente para medir la transmisión de luz en el interior del bosque y para estimar estructuras del dosel arbóreo, tal como el índice de área foliar (Newton, 2007; Strachan et al., 2005). Otros métodos y sensores para medir directamente la radiación solar en diferentes longitudes de onda son los tubos solarímetros (Newton, 2007), como el instrumento denominado DEMON (Strachan et al., 2005) y el papel ozalid (Jennings et al., 1999; Lieffers et al., 1999).

Estimaciones indirectas del ambiente lumínico en el bosque

Muchos investigadores y profesionales prefieren las aproximaciones indirectas para estimar el ambiente lumínico en el interior del bosque debido a las dificultades para medir directamente la radiación solar bajo el dosel del mismo. Estas técnicas y métodos utilizan estimaciones de la cobertura y cierre del dosel o de la fracción de claros (Jennings et al., 1999). Los medios más utilizados para estimar indirectamente el ambiente de radiación solar son la fotografía hemisférica (ojo pez), los densitómetros esféricos, las redes de punto (*canopy-scope*), las mediciones de rodal y los modelos computacionales (Comeau, 2000; Jennings et al., 1999; Newton, 2007).

La fotografía hemisférica se ha utilizado para estimar la estructura del dosel de copas y la transmisión de la radiación solar bajo el dosel en bosques templados, tropicales y boreales (Clearwater, Nifinluri, & Van Gardingen, 1999; Engelbrecht & Herz, 2001; González-Tagle, Jiménez-Pérez, & Himmelsbach, 2011; Promis, Caldentey, & Cruz, 2012; Rich, Clark, Clark, & Oberbauer, 1993; Roxburgh & Kelly, 1995). Las fotografías se toman enfocando hacia el dosel con una cámara fotográfica (actualmente digital), en la que se encuentra montada una lente ojo de pez. Ésta es una técnica aprobada para estimar la transmisión de la radiación solar bajo el dosel, pero su uso todavía debe ser verificado en ambientes extremadamente sombríos (Roxburgh & Kelly, 1995). Actualmente, existe una variedad de programas

s. The latter consist of a rod with various quantum sensors sensitive to the bandwidth of photosynthetically active solar radiation, for example, the AccuPAR Decagon LP-80 ceptometer (Newton, 2007). On one hand, the LAI-2000 measures the scattered light (wavelength restricted between 320 and 490 nm) with a nearly hemispherical lens (148° field of view) that has five concentric light-detecting silicon rings (Newton, 2007; Strachan, Stewart, & Pattey, 2005). On the other hand, the AccuPAR ceptometer measures the PPFD with 80 sensors in the wavelength between 400 and 700 nm (Strachan et al., 2005). Both sensors have been frequently used to measure the below-canopy light transmission in a forest and to estimate forest canopy structures, such as the leaf area index (Newton, 2007; Strachan et al., 2005). Other methods and sensors for directly measuring solar radiation at different wavelengths are solarimeter tubes (Newton, 2007), such as the instrument known as DEMON (Strachan et al., 2005), and ozalid paper (Jennings et al., 1999; Lieffers et al., 1999).

Indirect estimates of the light environment in forests

Many researchers and professionals prefer indirect approaches to estimate the below-canopy light environment in a forest because of the difficulties involved in directly measuring below-canopy solar radiation in a forest. These techniques and methods use estimates of canopy coverage and closure or gap fraction (Jennings et al., 1999). The most used means to indirectly estimate the solar radiation environment are hemispherical photography (fisheye), spherical densitometers, point networks (canopy-scope), stand measurements and computer modeling (Comeau, 2000; Jennings et al., 1999; Newton, 2007).

Hemispherical photography has been used to estimate the crown canopy structure and transmission of solar radiation beneath the canopy in temperate, tropical, and boreal forests (Clearwater, Nifinluri, & Van Gardingen, 1999; Engelbrecht & Herz, 2001; González-Tagle, Jiménez-Pérez, & Himmelsbach, 2011; Promis, Caldentey, & Cruz, 2012; Rich, Clark, Clark, & Oberbauer, 1993; Roxburgh & Kelly, 1995). The photographs are taken looking toward the canopy with a camera (nowadays digital), in which a fisheye lens is mounted. This is an approved technique for estimating the transmission of solar radiation under the canopy, but its use has yet to be verified in extremely shaded environments (Roxburgh & Kelly, 1995). Currently, there is a variety of computer programs (commercial versions and others for free) available for the analysis of these photographs (Comeau, 2000; Promis et al., 2011). High statistical correlations have been found when comparing estimates made with commercial software (HemiView or WinSCANOPY) with those of free programs (Gap Light Analyzer, hemIMAGE, Winphot, CIMES), accessible on Internet (Promis et al., 2011). In different research papers and in software user manuals one can find more details on the theory, methods and applications of hemispherical photographs in forests.

de cómputo (versiones comerciales y otros gratuitos) disponibles para el análisis de estas fotografías (Comeau, 2000; Promis et al., 2011). Se han encontrado altas correlaciones estadísticas al comparar las estimaciones realizadas con programas comerciales (HemiView o WinSCANOPY) con aquellas de programas gratuitos (Gap Light Analyzer, hemIMAGE, Winphot, CIMES), accesibles en internet (Promis et al., 2011). En diferentes artículos de investigación y en los manuales de usuario de los programas se pueden encontrar mayores detalles sobre la teoría, métodos y aplicaciones de las fotografías hemisféricas en los bosques.

El densitómetro esférico es utilizado para estimar el cierre de copas. El instrumento consiste en un espejo hemisférico convexo o cóncavo que presenta una retícula de 24 cuadros (Newton, 2007). Para realizar lecturas del cierre de copas se deben distribuir homogéneamente cuatro puntos en el interior de los cuadros (Jennings et al., 1999; Newton, 2007). Las lecturas del cierre de copa, estimadas con el densitómetro esférico, han sido criticadas debido a su baja resolución (Jennings et al., 1999). Sin embargo, se han encontrado correlaciones razonables entre estas lecturas y las mediciones directas de la transmisión de la radiación solar bajo el dosel de copas (Bellow & Nair, 2003; Engelbrecht & Herz, 2001).

La red de puntos llamada *canopy-scope* es un instrumento diseñado para evaluar el medio ambiente lumínico en el interior del bosque (Brown, Jennings, Wheeler, & Nabe-Nielsen, 2000). El instrumento consiste en una lámina de plástico transparente marcada con una retícula de 5 x 5 puntos, distanciados a intervalos de 3 cm (Brown et al., 2000; Hale & Brown, 2005). El instrumento debe colocarse a 20 cm del ojo y apuntar al claro de dosel más grande que se encuentra sobre el punto que se desea medir. En esta posición se cuentan todos los puntos que entran en el claro del dosel. Las lecturas con el *canopy-scope* han sido correlacionadas estadísticamente con las estimaciones de la abertura de dosel a partir de fotografías hemisféricas (Brown et al., 2000). El *canopy-scope* no ha sido recomendado para obtener estimaciones de la abertura de dosel en una base de punto individual dentro de rodales de plantaciones de coníferas (Hale & Brown, 2005), pero si ha sido recomendado para evaluar la abertura de dosel en un rango amplio de tipos de bosques (Brown et al., 2000; Hale & Brown, 2005).

Las mediciones de rodal también se han utilizado para estimar el ambiente de luz bajo el dosel de copas. En varios estudios, las mediciones del área basal, densidad y altura de los árboles, dimensiones de las copas y el índice de área foliar (en forma individual o en combinación) se han correlacionado bastante bien con la radiación solar bajo el dosel de copas (Comeau & Heineman, 2003; Promis, Schindler, Reif, & Cruz, 2009). Sin embargo, y aunque las correlaciones son razonables, tales relaciones deberían ser solamente utilizadas dentro del rango de condiciones de rodal que fueron consideradas en el muestreo (Comeau, 2000).

The spherical densitometer is used to estimate crown closure. The instrument consists of a hemispheric convex or concave mirror with a 24-square grid (Newton, 2007). To perform crown closure readings, four points must be homogeneously distributed within the squares (Jennings et al., 1999; Newton, 2007). Crown closure readings, estimated with the spherical densitometer, have been criticized due to their low resolution (Jennings et al., 1999). However, reasonable correlations have been found between these readings and direct measurements of below-canopy solar radiation transmission (Bellow & Nair, 2003; Engelbrecht & Herz, 2001).

The points' network called *canopy-scope* is an instrument designed to assess the light environment inside the forest (Brown, Jennings, Wheeler, & Nabe-Nielsen, 2000). The instrument consists of a transparent plastic sheet marked with a grid of 5 x 5 dots, spaced at intervals of 3 cm (Brown et al., 2000; Hale & Brown, 2005). The instrument must be placed at 20 cm from the eye and aimed at the largest canopy gap located over the area to be measured. In this position all points within the canopy gap are counted. Readings with the *canopy-scope* have been statistically correlated with estimates of canopy closure from hemispherical photographs (Brown et al., 2000). The *canopy-scope* has not been recommended to obtain estimates of canopy closure on a single point basis within coniferous plantation stands (Hale & Brown, 2005), but it has been recommended to assess canopy closure in a wide range of forest types (Brown et al., 2000; Hale & Brown, 2005).

Stand measurements have also been used to estimate below-canopy light environment. In several studies, the measurements of basal area, tree density and height, crown dimensions and leaf area index (individually or in combination) have been fairly well correlated with below-canopy solar radiation (Comeau & Heineman, 2003; Promis, Schindler, Reif, & Cruz, 2009). However, although the correlations are reasonable, such relationships should be only utilized within the range of stand conditions considered in the sampling (Comeau, 2000).

There are also several numerical and computational models with which it is possible to model the transmission of light passing through the forest canopy, by using data from a three-dimensional arrangement of the trees in the stand and crown models. Among these methods one could mention MIXLIGHT (Stadt & Lieffers, 2000), LITE and SLIM (Comeau, Fielder, MacDonald, & Bryce, 2012) as the most recent ones.

Method comparison

Several research articles have been published to compare methods that directly measure or indirectly estimate below-canopy solar radiation or light (Bellow & Nair, 2003; Chazdon & Field, 1987; Clearwater et al., 1999; Comeau, Gendron, & Letchford, 1998; Engelbrecht & Herz, 2001; Promis

También existen varios modelos numéricos y computacionales con los cuales es posible modelar la transmisión de luz que pasa a través del dosel arbóreo, por medio del uso de datos de disposición tridimensional de los árboles en el rodal y modelos de copa. Entre estos métodos se pueden nombrar MIXLIGHT (Stadt & Lieffers, 2000), LITE y SLIM (Comeau, Fielder, MacDonald, & Bryce, 2012) como los más recientes.

Comparación de métodos

Varios artículos de investigación se han publicado para comparar los métodos que miden directamente o estiman indirectamente la radiación solar o la luz bajo el dosel arbóreo (Bellow & Nair, 2003; Chazdon & Field, 1987; Clearwater et al., 1999; Comeau, Gendron, & Letchford, 1998; Engelbrecht & Herz, 2001; Promis et al., 2012; Rich et al., 1993; Roxburgh & Kelly, 1995). Chazdon y Field (1987) concluyen que con las fotografías hemisféricas, durante condiciones claras, se estima con confianza la medición directa de la DFFF y su patrón temporal. Sin embargo, bajo condiciones muy sombrías, la estimación del ambiente lumínico por medio de fotografías hemisféricas no es muy precisa (Chazdon & Field, 1987; Roxburgh & Kelly, 1995). Rich et al. (1993) concluyen que sus análisis revelaron una excelente relación entre las mediciones directas de DFFF y las estimaciones con las fotografías hemisféricas. En este sentido, Clearwater et al. (1999) señalan que es posible modelar con bastante precisión el porcentaje diario de transmisión de DFFF, en un rango que va desde 5 a 50 % diario, medido en el interior del bosque respecto al que se registra en el exterior. Comeau et al. (1998) señalan que existe correlación entre las mediciones directas del porcentaje de DFFF transmitido bajo el dosel arbóreo y las estimaciones realizadas con fotografías hemisféricas, densitómetros esféricos cóncavos y con el modelo matemático LITE. Promis et al. (2012) concluyen que para estimar el promedio del porcentaje de DFFF transmitido en el interior del bosque durante la temporada de crecimiento vegetativo debe existir una buena correlación estadística entre la medición directa y el uso de fotografías hemisféricas. Por otro lado, Engelbrecht y Herz (2001) indican que con ninguno de los métodos indirectos se pudo estimar con precisión las condiciones lumínicas en sitios puntuales bajo el dosel arbóreo por periodos cortos (un día o una semana), esto debido a la variación diaria y semanal de la radiación solar. Sin embargo, estas técnicas indirectas pueden servir para hacer una jerarquización del ambiente lumínico en diferentes sitios del interior del bosque. Por último, Bellow y Nair (2003) encontraron que el densitómetro fue la mejor técnica para predecir la radiación solar fotosintéticamente activa en el interior del bosque. Asimismo, concluyen que utilizando de manera individual los parámetros arquitecturales del dosel y estructurales del rodal, no fue posible predecir con precisión la transmisión de dicha radiación bajo el dosel arbóreo.

Escoger el método o técnica más apropiada dependerá de los objetivos de la investigación y de la disponibilidad de

et al., 2012; Rich et al., 1993; Roxburgh & Kelly, 1995). Chazdon and Field (1987) conclude that with hemispherical photographs, under clear conditions, the PPFD and its temporal pattern can confidently be estimated. However, under very shaded conditions, the light environment estimated by hemispherical photographs is not very accurate (Chazdon & Field, 1987; Roxburgh & Kelly, 1995). Rich et al. (1993) conclude that their analysis revealed an excellent relationship between PPFD direct measurements and estimates with hemispherical photographs. In this sense, Clearwater et al. (1999) note that it is possible to quite accurately model the daily PPFD transmission percentage, in a range from 5 to 50 % daily, measured inside the forest with respect to that recorded outside. Comeau et al. (1998) point out that there is a correlation between the direct measurements of the PPFD percentage transmitted below the forest canopy and the estimates made with hemispherical photographs, concave spherical densitometers and the LITE mathematical model. Promis et al. (2012) conclude that to estimate the average PPFD percentage transmitted inside the forest during the vegetative growing season there should be a good statistical correlation between direct measurement and the use of hemispherical photographs. Furthermore, Engelbrecht and Herz (2001) indicate that none of the indirect methods could accurately estimate the lighting conditions in specific sites below the forest canopy for short periods (a day or a week), due to daily and weekly variation in solar radiation. However, these indirect techniques can be used to make a hierarchy of the below-canopy light environment in different sites within the forest. Finally, Bellow and Nair (2003) found that the densitometer was the best technique to predict below-canopy photosynthetically active radiation within a forest. They also conclude that individually using the architectural parameters of the canopy and the structural ones of the stand, it was not possible to accurately predict the transmission of this radiation under the forest canopy.

Selecting the most appropriate method or technique will depend on research objectives and resource availability (Engelbrecht & Herz, 2001; Newton, 2007). However, indirect methods also have some drawbacks, because some of them require time investment in their estimation (hemispherical photographs) (Jennings et al., 1999), are expensive or have low correlations when compared with direct measurements conducted in short periods (days or weeks) due to daily light variability (Engelbrecht & Herz, 2001).

CONCLUSIONS

There are several methods, techniques and instruments that have different properties to measure or estimate the light environment within a forest. However, it is impossible to decide which one is better. The decision of selecting a particular method will depend on the question to be answered, the nature of the problem and the desired accuracy of the measurement or estimation. For example, for trends on general aspects it would be appropriate to have an understanding of

recursos (Engelbrecht & Herz, 2001; Newton, 2007). No obstante, los métodos indirectos tienen también algunas complicaciones, debido a que algunos requieren inversión de tiempo en su estimación (fotografías hemisféricas) (Jennings et al., 1999), son caros o tienen bajas correlaciones al comparar con las mediciones directas realizadas en periodos cortos (día o semana), debido a la variabilidad lumínica diaria (Engelbrecht & Herz, 2001).

CONCLUSIONES

Existen varios métodos, técnicas e instrumentos que tienen propiedades distintas, para medir o estimar el ambiente lumínico en el interior del bosque. Sin embargo, no es posible decidir cuál es mejor. La decisión de elegir un método en particular dependerá de la pregunta a responder, de la naturaleza del problema y de la exactitud de la medición o estimación que se desea tener. Por ejemplo, para tendencias sobre aspectos generales sería adecuado tener una comprensión de la cobertura del dosel arbóreo, pero si se desea estudiar la supervivencia o crecimiento de las plantas de regeneración en forma puntual se requerirían métodos, técnicas e instrumentos que proporcionen una precisión mayor en la estimación del ambiente lumínico. Por tanto, se hace necesario hacer una revisión de la información existente antes de comprar o adquirir el equipamiento. De esta manera, se puede tomar la decisión de manera informada sobre cuál es la longitud de onda y el método, técnica e instrumento que mejor pueden satisfacer los requerimientos de investigación.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece los aportes del Proyecto FONDECYT de Iniciación Núm. 11100093.

REFERENCIAS

- Balandier, P., Sonohat, G., Sinoquet, H., Verlet-Grancher, C., & Dumas, Y. (2006). Characterisation, prediction and relationships between different wavebands of solar radiation transmitted in the understorey of even-aged oak (*Quercus petraea*, *Q. robur*) stands. *Trees*, 20, 363–370. doi: 10.1007/s00468-006-0049-3
- Baldocchi, D., & Collineau, S. (1994). The physical nature of solar radiation in heterogeneous canopies: Spatial and temporal attributes. In M. M. Caldwell, & R. W. Pearcy (Eds.), *Exploitation of environmental heterogeneity by plants* (pp. 21–71). San Diego: Academic Press.
- Bellow, J. G., & Nair, P. K. R. (2003). Comparing common methods for assessing understorey light availability in shaded-perennial agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 114, 197–211. doi: 10.1016/s0168-1923(02)00173-9
- Brown, N., Jennings, S., Wheeler, P., & Nabe-Nielsen, N. (2000). An improved method for the rapid assessment of forest understorey light environments. *Journal of Applied Ecology*, 37, 1044–1053. doi: 10.1046/j.1365-2664.2000.00573.x
- Chazdon, R. L., & Field, C. B. (1987). Photographic estimation of photosynthetically active radiation: Evaluation of a computerized technique. *Oecologia*, 73, 525–532. doi: 10.1007/BF00379411
- Clearwater, M. J., Nifinluri, T., & Van Gardingen, P. R. (1999). Forest fire smoke and a test of hemispherical photography for predicting understorey light in Bornean tropical rain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97, 129–139. doi: 10.1016/S0168-1923(99)00058-1
- Comeau, P. (2000). *Measuring light in the forest* (Extension Note 42). Victoria, Canada: B. C. Ministry of Forests.
- Comeau, P., Fielder, P., MacDonald, R., & Bryce, R. (2012). LITE and SLIM programs for estimating light levels beneath tree canopies. Obtenido de http://www.ualberta.ca/~pcomeau/Light_Modeling/Lite_and_slim_intro.html
- Comeau, P., Gendron, F., & Letchford, T. (1998). A comparison of several methods for estimating light under a paper birch mixed wood stand. *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 1843–1850. doi: 10.1139/x98-159
- Comeau, P. G., & Heineman, J. L. (2003). Predicting understorey light microclimate from stand parameters in young paper birch (*Betula papyrifera* Marsh.) stands. *Forest Ecology and Management*, 180, 303–315. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00581-9
- Duchoslav, M. (2009). Effects of contrasting habitats on the phenology, seasonal growth, and dry-mass allocation pattern of two bulbous geophytes (Alliaceae) with partly different geographic ranges. *Polish Journal of Ecology*, 57, 15–32. Obtenido de http://www.pol.j.ecol.cbe-pan.pl/article/ar57_1_02.pdf
- Engelbrecht, B. M., & Herz, H. M. (2001). Evaluation of different methods to estimate understorey light conditions in tropical forests. *Journal of Tropical Ecology*, 17, 207–224. doi: 10.1017/S0266467401001146
- Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (2003). *The climate near the ground* (6a ed.). Maryland, USA: Rowman y Littlefield Publishers, Inc.
- González-Tagle, M. A., Jiménez-Pérez, J., & Himmelsbach, W. (2011). Impact of firewood extraction on leaf area index and canopy openness in mixed pine-oak forests in northeast Mexico.

End of English Version

- Forstarchiv*, 82, 20–25. doi: 10.2376/0300-4112-81-20
- Grant, R. H. (1997). Partitioning of biologically active radiation in plant canopies. *International Journal of Biometeorology*, 40, 26–40. doi: 10.1007/BF02439408
- Hale, S. E., & Brown, N. (2005). Use of the canopy-scope for assessing canopy openness in plantation forests. *Forestry*, 78, 365–371. doi: 10.1093/forestry/cpi043
- Jennings, S. B., Brown, N. D., & Sheil, D. (1999). Assessing forest canopies and understorey illumination: Canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, 72, 59–73. doi: 10.1093/forestry/72.1.59
- Kimmins, J. P. (1987). *Forest ecology. A foundation for sustainable management* (2a ed.). New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Klassen, S., & Bugbee, B. (2005). Shortwave radiation. In J. L. Hatfield, & J. M. Baker (Eds.), *Micrometeorology in agricultural systems* (pp. 43–57). Madison, USA: American Society of Agronomy, Inc.
- Lieffers, V. J., Messier, C., Stadt, K. J., Gendron, F., & Comeau, P. G. (1999). Predicting and managing light in the understorey of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 29, 796–811. doi: 10.1139/x98-165
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (1990). *Principles of environmental physics* (2a ed.). London, UK: Edward Arnold.
- Newton, A. C. (2007). *Forest ecology and conservation. A handbook of techniques*. Oxford, UK: University Press.
- Promis, A., Caldentey, J., & Cruz, G. (2012). Evaluating the usefulness of hemispherical photographs as a means to estimate photosynthetic photon flux density during a growing season in the understorey of *Nothofagus pumilio* forests. *Plant Biosystems*, 146, 237–243. doi: 10.1080/11263504.2011.650727
- Promis, A., Gärtner, S., Butler-Manning, D., Durán-Rengel, C., Reif, A., Cruz, G., & Hernández, L. (2011). Comparison of four different programs for the analysis of hemispherical photographs using parameters of canopy structure and solar radiation transmittance. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 11, 19–33.
- Promis, A., Schindler, D., Reif, A., & Cruz, G. (2009). Solar radiation transmission in and around canopy gaps in an uneven-aged *Nothofagus betuloides* forest. *International Journal of Biometeorology*, 53, 355–367. doi: 10.1007/s00484-009-0222-7
- Rich, P. M., Clark, D. B., Clark, D. A., & Oberbauer, S. F. (1993). Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65, 107–127. doi: 10.1016/0168-1923(93)90040-O
- Roxburgh, J. R., & Kelly, D. (1995). Uses and limitations of hemispherical photography for estimating forest light environments. *New Zealand Journal of Ecology*, 19, 213–217. Obtenido de http://www.newzealandecology.org/nzje/free_issues/NZJecol19_2_213.pdf
- Stadt, K. J., & Lieffers, V. J. (2000). MIXLIGHT: A flexible light transmission model for mixed-species forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102, 235–252. doi: 10.1016/S0168-1923(00)00128-3
- Strachan, I. B., Stewart, D. W., & Pattey, E. (2005). Determination of leaf area index in agricultural systems. In J. L. Hatfield, & J. M. Baker (Eds.), *Micrometeorology in agricultural systems* (pp. 179–198). Madison, USA: American Society of Agronomy, Inc.