

ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR Y FACTORES DE PERTURBACIÓN EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO TEHUANTEPEC¹

[LEAF AREA INDEX AND DISTURBANCE FACTORS IN A BASIN OF TEHUANTEPEC RIVER]

Cesar Gil Vásquez-Agustín, Gerardo Rodríguez-Ortiz[§], José Raymundo Enríquez-del Valle,
Vicente Arturo Velasco-Velasco, Gisela Virginia Campos-Ángeles

Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca. C. P. 71230. Tel. 01(951) 5170788. [§]Autor responsable (grodriguez.itvo@yahoo.com)

RESUMEN

El índice de área foliar (IAF) es factor importante en ecosistemas forestales por su estrecha relación con el ciclo hidrológico y el uso actual de suelo. La investigación se realizó durante 2011 con el objetivo de relacionar los factores de perturbación del sitio y el IAF en la cuenca de Santa María Quiegolani, Yautepec, Oaxaca. Selectivamente, se establecieron cuatro sitios (400 m²) distribuidos en los factores de perturbación presentes. En los sitios se realizaron muestreos destructivos de 12 árboles. Se obtuvo peso verde y seco en la muestra y peso verde total de follaje en tres individuos por sitio. El área foliar de la muestra (AF, m²) se obtuvo en el programa ImageJ®. A nivel árbol, se ajustó un modelo logarítmico (pseudo-R² = 0.89) para estimar AF usando como variables independientes diámetro normal (DN, cm) y área de copa (AC, m²), $AF = 0.052 \times (DN^2 + AC)^{1.08}$. La zona con vegetación de pino-encino y factor de perturbación agrícola mostró un IAF de 3.26. El área conservada y con vegetación de pino con IAF = 6.29, siendo el mayor en el área de estudio. El bosque de pino bajo uso agrícola-ganadero, presentó IAF=3.62. Finalmente, áreas bajo descanso (de 12 años) y con vegetación secundaria (*Baccharis* sp), mostraron el menor IAF=0.15.

Palabras clave: área foliar, zonas perturbadas, zonas de conservación.

ABSTRACT

The leaf area index (LAI) is an important factor in forest ecosystems because of its close relationship with the hydrological cycle and current land use. The research was conducted in 2011 in order to study the relationship between disturbance factors and LAI in a basin of Santa Maria Quiegolani, Yautepec, Oaxaca. Four sites (400 m²) distributed in the disturbance factors were established selectively. A destructive sampling of 12 trees was conducted. In three trees per plot, green and dry weight of the leaves in the sample and total green weight of the tree leaves were obtained. Leaf area of the sample (AF, m²) was obtained using ImageJ ® program. At tree level, a logarithmic model (pseudo-R² = 0.89) was adjusted in order to estimate AF using diameter at breast height (DN, cm) and crown area (AC, m²), like independent variables ($AF = 0.052 \times (DN^2 + AC)^{1.08}$). The area with pine-oak vegetation and agricultural disturbance factor showed LAI=3.26. Areas with pine vegetation under preservation a LAI=6.29, the highest in the study area. The pine forest on agricultural-livestock, showed IAF=3.62. Finally, areas without land use (of 12 years) and secondary vegetation (*Baccharis* sp) showed the lowest LAI=0.15.

Index words: leaf area, disturbance sites, conservation sites.

INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos son procesos por los cuales los ecosistemas producen bienes y servicios, mismos que son necesarios para el ser humano. El uso inapropiado de los recursos naturales tendrá consecuencias negativas para

Recibido: 1 de octubre de 2013.

Aceptado: 10 de abril de 2014.

las futuras generaciones (Costanza, 2006). Con el afán de buscar el bienestar de las poblaciones, los seres humanos han transformando al planeta a tasas aceleradas desde la segunda mitad del siglo pasado (Balvanera y Cotler, 2009).

Por consecuencia, la cubierta vegetal se encuentra amenazada por numerosas actividades antropogénicas, entre las causas más importantes están la pérdida de hábitat, la fragmentación de ecosistemas, la introducción de especies exóticas invasoras, la sobreexplotación de recursos, la contaminación del aire, tierras, ríos y mares, los efectos visibles del cambio climático (De Groot, 2002). Dichas causas son generadas por las actividades humanas que han transformado algunos ecosistemas, en sistemas de producción intensiva de bienes; por ejemplo, bosques, selvas y pastizales naturales han sido convertidos en sistemas agropecuarios para la producción de alimentos (Aparicio, 2005).

Por otro lado, el Protocolo de Kyoto (Noss, 2001) establece la importancia de los bosques para la mitigación del cambio climático por los servicios ambientales que ofrecen; el calentamiento global constituye también una fuente más de presión sobre los bosques en el planeta, lo cual podría contribuir a intensificar los conflictos entre sectores por el acceso a los bienes y servicios ecosistémicos del bosque (Cabrera *et al.*, 2009). De acuerdo con Leguía *et al.* (2008) el índice de área foliar (IAF) es uno de los parámetros más útiles para caracterizar la vegetación. Se define como las unidades de superficie de hoja verde por unidad de superficie de terreno, se puede reportar como total o proyectada. La función de la cobertura forestal en la regulación del ciclo hidrológico es de vital importancia; por esta razón, es prioritario desarrollar investigaciones que relacionen el IAF con la calidad y cantidad de los escurrimientos superficiales de una cuenca hidrográfica (Cifuentes *et al.*, 1999).

El IAF en el ecosistema forestal de una cuenca influye sobre la escorrentía, la evapotranspiración y la infiltración y, por ende, en el balance hídrico y la calidad del recurso (Pérez *et al.*, 2005). El aumento en la frecuencia de perturbaciones por la acción humana reduce de manera acelerada la cubierta vegetal en el estrato superficial del suelo, junto con todos los servicios ambientales (Mendoza *et al.*, 2001).

Ante esta situación una de las alternativas para frenar esta grave problemática de los servicios ecosistémicos es la conservación de la vegetación en los bosques naturales, pues la superficie foliar influye de manera significativa en la retención de humedad en los suelos y, al mismo tiempo, evita la rápida evaporación del agua captada durante la época de lluvia (Dzhogan y Lozinskaya, 1993). Por estas razones, el objetivo de la presente investigación fue estimar el índice de área foliar y relacionarlo con los factores de perturbación antropogénica en la cuenca hidrográfica de Santa María Quiegolani, Yautepec, Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Elección y establecimiento de sitios

El área de estudio comprendió territorios comunales de Santa María Quiegolani, Yautepec, Oaxaca, que se encuentra situada al sur del estado (INEGI, 1998). El clima del área es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación media anual de 514.9 mm y temperatura media anual de 18.1° C.

Se realizó un recorrido preliminar en la parte boscosa y con ayuda de un geoposicionador satelital (GPS) Garmin® se delimitó el área de estudio y las zonas de perturbación existentes: uso agrícola, uso agrícola-ganadero, área sin uso visible (zona de conservación) y terreno en descanso (periodo aproximado de 12 años). En zonas estratégicas de cada microcuenca se localizó y estableció de manera selectiva, un sitio de muestreo circular de 400 m² (total de cuatro sitios) (Cuadro 1); se trató que el área elegida representara las condiciones promedio de densidad y cobertura vegetal de la microcuenca.

En cada sitio (unidad muestral) se realizó el inventario del arbolado, midiendo en todos los individuos encontrados, diámetro normal (DN, cm), altura total (AT, m), altura del fuste limpio (AFL, m), longitud de copa (LC, m), diámetro de copa (DC, m). Esta última variable se midió con la proyección de la sombra del árbol en dos ejes, norte-sur y este-oeste; el área de copa (AC, m²) se obtuvo mediante la expresión: $AC = \pi/4 \times (DC^2)$. Para la medición de estas variables se utilizó cinta diámetrica® y métrica® (Forestry Suppliers, Inc.) y clinómetro digital Haglof®. Con los datos de DN y AT se formó la estructura diamétrica y de altura, respectivamente, misma que se utilizó para distribuir la muestra de tres individuos por sitio y que fuesen representativos del área de estudio.

Cuadro1. Ubicación y características de los sitios evaluados en la cuenca de Santa María Quiebolani, Yautepec, Oaxaca.

Sitio	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m)	Nombre de microcuenca	Factor de perturbación
1	16° 15' 50.9"	96° 01' 35.1"	2146	El Isle	Agrícola
2	16° 15' 15.7"	96° 06' 11.6"	2878	Llano de Altar	Zona conservada
3	16° 15' 44.3"	96° 04' 39.4"	2473	Santiago, paraje El Rincón	Agrícola-ganadero
4	16° 15' 22.1"	96° 02' 04.1"	2279	Varita, paraje Las Tres Cruces	Terreno en descanso (sin usarse durante 12 años).

En el muestreo destructivo se incluyeron 12 individuos de *Quercus conspersa*, *Q. candicans*, *Pinus michoacana*, *P. pseudostrobus* y *Bacharis* sp. El derribo de los árboles se realizó con motosierra (Stihl, modelo MS 660 con espada 1.2 m). La copa de cada árbol se dividió en tres secciones iguales. Se midió la longitud de cada sección y tomó una muestra de aproximadamente 300 g de hojas o fascículos en cada sección, tomadas en ramas de diferentes tamaños. Se retiraron todas las hojas en cada sección de copa, se registró el peso de las hojas en fresco (kg) por cada sección de la copa del árbol utilizando una báscula Tororey modelo EOB de 100 ± 0.2 kg.

Análisis de laboratorio y de datos

Las hojas muestra se pesaron en fresco (g) con una balanza analítica PCE-LS 500 con una resolución de 0.011 g. Posteriormente, las hojas se escanearon en formato JPG utilizando un escáner HP 4890® de cama plana. El área foliar (cm^2) de la muestra se determinó en el programa ImageJ®. Las muestras de hojas se guardaron en bolsas de papel de 25×12 cm, la cual fue llevada a una estufa de secado Shel Lab FX14 (Cornelius, OR., USA.), hasta obtener peso constante a una temperatura de 70°C . Finalmente, se registró el peso seco de cada muestra con la misma báscula analítica. El área foliar específica (AFE) se determinó mediante el cociente de AF de la muestra (m^2) de cada sección y el peso seco de la muestra (g). El área foliar de toda la sección de copa (AF) se obtuvo mediante el producto del AFE y el peso seco total de la sección, transformándose en m^2 . La suma de AF de las tres secciones, proporcionó el AF de cada árbol derribado (Berril y O'Hara, 2007).

Los datos de AF por árbol se correlacionaron con las variables dasométricas determinadas con la finalidad de ajustar un modelo de regresión que estimara confiablemente el AF. Los análisis se realizaron en el paquete estadístico r° y la selección del modelo se realizó con base en su pseudo- R^2 , significancia, desviación estándar, residuales y coeficiente de variación. El modelo de mejor ajuste para estimar área foliar se utilizó para estimar ésta misma en todos los individuos que se encontraron dentro de cada uno de los sitios. Los resultados de AF de cada uno de los árboles del sitio calculados con base en el modelo de regresión fueron utilizados para obtener el índice de área foliar (IAF). En cada sitio de muestreo se calculó área foliar para cada árbol y se obtuvo la sumatoria total del sitio dividida entre el área de muestreo (Duursma *et al.*, 2003; Berril y O'Hara, 2007).

$$IAF = \frac{AF}{AS}$$

Donde: IAF = índice de área foliar por sitio de muestreo, AF = área foliar arbórea proyectada por sitio (m^2). AS = área del sitio muestreado (400 m^2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la zona con perturbación agrícola, los dos individuos de encino (*Quercus conspersa* Benth.) presentaron área foliar específica (AFE) de 329.9 y $380.6 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, con área foliar (AF) de 270.7 y 141.7 m^2 . *Pinus devoniana* Lindley presentó AFE de $340.3 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ y 484.7 m^2 de AF (Cuadro 2). Estos valores difieren a los encontrados por Brown *et*

al. (1989), quienes usando una metodología similar, presentaron valores de AFE de 29.3 a 37.1 cm² g⁻¹ en bosques tropicales.

Para la zona de conservación se encontraron individuos de *Pinus pseudostrobus* Lindl con AFE entre 162.0 y 211.9 cm² g⁻¹ y área foliar de 199.1 a 552.0 m², mientras que Barrantes y Gracia (1987) presentaron valores de AF entre 9.8 m² y 345 m² para árboles de *Pinus sylvestris* L. Esta variabilidad puede deberse a que en esta zona de mayor densidad arbórea, los individuos tienden a mostrar una mayor tasa de crecimiento en altura, por lo que exponen su copa a una mayor radiación solar y presentan un área foliar menor en la parte superior que en la base de la copa (Rodríguez *et al.*, 2000; Warnock *et al.*, 2006).

Cuadro 2. Diámetro normal, área foliar específica y área foliar calculada para cada especie muestreada en los factores de perturbación evaluados.

Factor de perturbación	Especie	DN (cm)	AFE (cm ² g ⁻¹)	AFE promedio por factor ± DE	AF (m ²)
Agrícola	<i>Quercus conspersa</i>	44.2	329.9	350.3 ± 26.7	270.7
	<i>Q. conspersa</i>	38	380.6		141.7
	<i>Pinus michoacana</i>	29.6	340.3		484.7
Conservación	<i>P. pseudostrobus</i>	23.7	211.9	200.6 ± 34.3	199.1
	<i>P. pseudostrobus</i>	62.5	227.8		551.9
	<i>P. pseudostrobus</i>	96.1	162.0		443.3
Agrícola-ganadera	<i>Q. candicans</i>	75.6	287.3	258.2 ± 29.7	503.9
	<i>Q. candicans</i>	66.7	227.9		284.4
	<i>Q. candicans</i>	46.9	259.4		342.1
Terreno en descanso	<i>Bacharis</i> sp	7.8	767.2	768.6 ± 59.1	29.4
	<i>Bacharis</i> sp	8.1	828.5		26.3
	<i>Bacharis</i> sp	7.8	710.2		12.9

DN = diámetro normal, AFE = área foliar específica, AF = área foliar DE = desviación estándar.

Por otro lado, en la zona de perturbación agrícola-ganadera los individuos muestreados fueron encinos (*Quercus candicans* Née) con AF entre 284.4 y 503.9 m² y AFE de 227.9 y 287.3 cm² g⁻¹ (Cuadro 2). Este rango coincide con el reportado en un bosque de encino (*Quercus sp*), donde se encontraron valores de AFE entre 179 cm² g⁻¹ y 298 cm² g⁻¹ (Breda, 2003).

Por su parte, el terreno sin uso actual y perturbado presentó la menor cubierta arbórea. Se encontró chamizo (*Bacharis* sp) con AFE entre 710.28 y 828.56 cm² g⁻¹. Con lo que respecta al AF, este sitio presentó los valores más pequeños (entre 12.9 y 29.42 m²), puesto que mostró menos cobertura aérea. Estos valores son coincidentes con los encontrados en plantaciones de hule perturbadas cuyos valores de AF por árbol estuvieron en un rango de 14 a 189 m² (Rojo, 2003) y en zonas perturbadas dominadas por *Rosmarins officinalis* L. con un promedio de 147 m² (Palomo *et al.*, 2003). Valores bajos en área foliar son indicativos de la probable presencia de factores antropogénicos de degradación de los ecosistemas (Borja, 2005).

El diámetro normal y de copa de los árboles presentaron un coeficiente de correlación $r = 0.85$ significativo ($P \leq 0.0004$), con lo cual, la variable de fácil medición (DN) podría emplearse para inferir el comportamiento del área de copa y por ende, del área foliar proyectada (Barrantes y Gracia, 1987). Un nivel de correlación similar se encontró entre altura total y DN de los árboles ($r = 0.83$, $P \leq 0.0007$), mismo que podría emplearse con confiabilidad en la predicción de volumen y biomasa de estos individuos. El área foliar por árbol presentó una correlación significativa con el DN ($r = 0.77$, $P \leq 0.0029$), ya que el grosor de los árboles en el fuste tiene una relación lineal con la cantidad de follaje en la copa (Cuadro 3). Estas funciones han sido desarrolladas por Berger (2009) y otros autores, donde se relaciona la función alométrica del área de albura en el tallo con la biomasa y área foliar (AF).

Con base en los resultados de correlación obtenidos, se realizaron estimaciones de AF mediante modelos de regresión, usando DN, área de copa y altura total como variables independientes. Los modelos obtenidos mostraron un buen ajuste debido a la tendencia ascendente del AF con respecto al tamaño del DN y a los diferentes factores de perturbación del bosque en estudio (Figura 1). Estas funciones son de utilidad en las estimaciones futuras del índice de área foliar, útil para estudiar el efecto de las actividades antropogénicas y de manejo forestal en sistemas boscosos (Flores *et al.*, 2006).

Cuadro 3. Área foliar y variables dasométricas calculadas para cada individuo en los sitios de muestreo.

Factor de perturbación	Especie	DN (cm)	DC (m)	AT (m)	AF/árbol (m ²)
Agricultura	<i>Quercus conspersa</i>	44.2	6.5	18.3	270.75
	<i>Q. conspersa</i>	38.0	5.7	16.1	141.77
	<i>Pinus michoacana</i>	29.6	7.2	18.2	484.75
Conservación	<i>P. pseudostrobus</i>	23.7	4.9	29.5	199.13
	<i>P. pseudostrobus</i>	62.5	8.3	44.6	551.95
	<i>P. pseudostrobus</i>	96.1	9.3	46.2	443.38
Agricultura-ganadería	<i>Q. candicans</i>	75.6	14.7	29.1	503.91
	<i>Q. candicans</i>	66.7	11.3	24.2	284.47
	<i>Q. candicans</i>	46.9	10.1	31.6	342.19
Terreno en descanso	<i>Bacharis</i> sp	7.8	2.5	4.8	29.42
	<i>Bacharis</i> sp	8.1	2.1	5.4	26.31
	<i>Bacharis</i> sp	7.8	2.1	5.9	12.91

DN= diámetro normal (cm), DC= diámetro de copa (m), AT= altura total (m), AF/ARB= área foliar por árbol (m²).

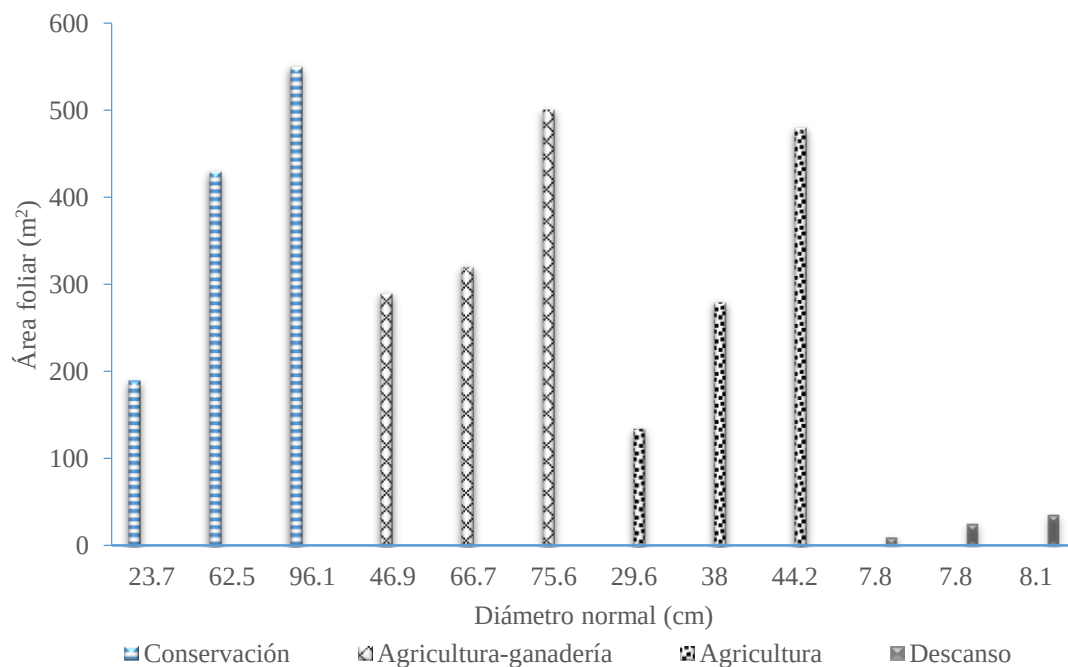


Figura 1. Comportamiento de área foliar como función de diámetro normal por árbol en los cuatro factores de perturbación.

El modelo de regresión no lineal de mejor ajuste (pseudo- $R^2 = 0.89$) que permitió estimar AF (m^2) por árbol en función de DN (cm) y área de copa (AC, m^2) en todos los individuos de los sitios tuvo la expresión: $AF = 0.052 \times (DN^2 + AC)^{1.08}$. Las variables independientes involucradas en la ecuación son de fácil medición en campo y permiten realizar estimaciones confiables del IAF para realizar futuras investigaciones en la microcuenca con la finalidad de evaluar el efecto de la cobertura arbórea sobre la escorrentía y pérdida de suelo (López *et al.*, 1991).

La microcuenca el Isle, con factor de perturbación agrícola, presentó un IAF = 3.26 indicando una cobertura foliar de al menos 50% del suelo forestal, ya que cuando un ecosistema presenta un IAF mayor a 2.5 influye en la lenta liberación del agua, evita la erosión excesiva del suelo y es indicativo del nivel de conservación de la vegetación (Martínez *et al.*, 1995; Vale *et al.*, 2001; Fuentes *et al.*, 2007).

La microcuenca Llano de Altar, sin factor de perturbación visible (zona conservada) y vegetación de pino y pocas especies suprimidas de encino (*Quercus sp*) y madroño (*Arbutus xalapensis* Kunth), mostró AF = 179.91 m^2 /árbol y el valor más alto de índice de área foliar (6.29). Esta condición es indicativo de la excelente cubierta vegetal en el bosque, poca luminosidad en el suelo y alta intercepción del agua de lluvia (Santos *et al.*, 2003; Berger, 2009). El valor encontrado en el área de estudio es ideal para bosques conservados de coníferas (Rautiainen, 2005) sin la presencia de actividades antropogénicas. Donde los factores de perturbación están presentes, el IAF es muy inferior (1.69) en bosques de pino, aunque este sea determinado por métodos indirectos de mayor precisión como el aparato Li-Cor 1992 (Jonckheere *et al.*, 2004).

Por su parte, la zona con perturbación agrícola-ganadera de la microcuenca Santiago, que contiene bosque de *Quercus conspersa*, mostró AF = 362.26 m^2 e IAF = 3.62. Este último valor coincide con el rango de 2.0 a 4.4 encontrado en bosques de encino (Eriksson *et al.*, 2005). Finalmente, en la zona sin uso actual del suelo (terreno bajo descanso de 12 años) por proceso de agricultura migratoria, se encontraron individuos de chamizo (*Bacharis sp*), con AF = 3.8 m^2 , por consecuencia, el IAF fue el más bajo (0.15). Valores pequeños indican baja cobertura vegetal para la microcuenca Varita y alta incidencia de factores de perturbación. La estructura vegetacional es el reflejo de vegetación secundaria o alterada, que se asemeja a condiciones de repoblamiento de especies de *Quercus* con IAF = 1.6 (Aragao *et al.*, 2005) o de especies de pino de baja densidad (Tianxiang *et al.*, 2002).

CONCLUSIONES

El valor más alto de área foliar (IAF = 6.29) se presentó en la zona de conservación (microcuenca Llano de Altar), en donde la ausencia de factores de perturbación permiten que haya mayor cobertura vegetal. La microcuenca Varita, sin uso actual e impactada por la actividad agrícola (agricultura migratoria), mostró la menor cubierta vegetal con bajo IAF = 0.15, lo que indica su alto nivel de deterioro por la presencia de actividades humanas antropogénicas.

Las microcuencas, el Isle y Santiago mostraron un término medio de conservación (IAF = 3.0, aproximadamente), asociándose factores de perturbación agrícola y agrícola ganadero, respectivamente. El índice de área foliar es un atributo importante que debe emplearse para determinar el nivel de conservación y deterioro de las microcuencas existentes en el área de estudio.

LITERATURA CITADA

- Aparicio M., F. J. 2005. La problemática presenta en las zonas de escurrimiento para las zonas sur sureste de México. *Terra Latinoamericana* 34(4): 6-89.
- Aragao, O., E. Shimabukuro, F. Santo and M. Williams. 2005. Landscape pattern and spatial variability of leaf area index in Eastern Amazonia. *Forest Ecology and Management* 211: 240-256.
- Balvanera, P. y H. Cotler. 2009. Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, en capital natural de México, vol. II: estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México, pp. 185-210.
- Barrantes, O. y A. Gracia C. 1987. Estimación del área foliar a partir de albura en *Pinus sylvestris*. *Options Mediterraneennes* 3(2): 53-56.

- Berger, R. 2009. Utilización de índice de área foliar para optimización de inventarios forestales – Estudio de caso. In: XIII Congreso Forestal Mundial, Buenos Aires, Argentina, 18-23 Octubre 2009.
- Berril, J. P. and K. L. O'Hara. 2007. Patterns of leaf area and growing space efficiency in young even-aged and multi-aged coast redwood stands. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 617-627.
- Borja, G. 2005. La equidad social, la participación y la resolución de conflictos en la gestión del agua. Documento de trabajo. UICN, Oficina Regional para América del Sur. Quito, Ecuador. pp. 23-24.
- Breda N., J. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 392(54): 2403-2417.
- Brown, S., J. R. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(3): 881-902.
- Cabrera, D., G., J. Calderón A., R. Jiménez P., L. Rodríguez y J. A. Balderas D. 2009. Biomasa aérea y factor de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 59-64.
- Cifuentes, S., V. J., M. Rafael y C. Navarro. 1999. Determinación del índice de superficie foliar (leaf area index) en masas forestales usando imágenes Landsat-TM. Conclusiones de un primer estudio en la Sierra Norte de Córdoba. *Geocampus* 3(3): 89-98.
- Costanza, L. F. 2006. Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Ecological Society of America* 2(7): 34-36.
- De Groot, R. S. 2002. A typology for the classification, description and evaluation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41(2): 93-108.
- Duursma, R. A., J. D. Marshall and A. P. Robinson. 2003. Leaf area index inferred from solar beam transmission in mixed conifer forests on complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 118: 221-236.
- Dzhogan, L. Y. and E. A. Lozinskaya. 1993. Method of LAI information convolution for estimating heat and water vapor fluxes over non-homogeneous land surface. Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales. *IAHS* 212. pp. 60-75.
- Eriksson, H., L. Eklund, H. Karin and A. Lindroth. 2005. Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 129: 27-37.
- Flores, F. J., H. L. Allen, H. M. Cheshire, J. G. Davis, M. Fuentes and D. L. Kelting. 2006. Using multispectral satellite imagery to estimate leaf area and response to silvicultural treatments in Loblolly pine stands. *Can. J. For. Res.* 36: 1587-1596.
- Fuentes, S., M. R. Palmer, D. Taylor, C. Hunt and D. Eamus. 2007. Automated procedures for estimating LAI of Australian woodland ecosystems using digital imagery, Matlab programming and LAI/MODIS LAI relationship. Institute for Water and Environmental Resource Management (IWERM), University of Technology, Sydney, Australia. pp. 23-35.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e informática). 1998. Carta Topográfica ED14-79 (Oaxaca). Escala 1:50 000. México, D.F.
- Jonckheere, I., B. Muys and P. Coppin. 2004. Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium. *Tree Physiology* 25: 723-732.
- Leguía E., J., B. Locatelli, P. Imbach, J. Pérez C. y R. Vignola. 2008. Servicios ecosistémicos e hidroenergía en Costa Rica. *Ecosistemas* 17(1): 16-23.
- López B., F., L. J. Pérez A., J. Martínez F., M. A. Romero D. y P. Marín S. 1991. Escorrentías y pérdida de suelo en calcisol pétrico bajo un ambiente mediterráneo semiárido. *Cuaternario y Geomorfología* 5: 1-4.
- Martínez, F., J., J. Martínez F., M. A. Romero D., F. López B. y F. Belmonte S. 1995. Biomasa e índice de área foliar de *Rosmarinus officinalis* L. en matorral semiárido (cuenca de Mula, Murcia). *Revista de Biología* 21(10): 83-92.
- Mendoza, F., M. Chévez y B. González. 2001. Sensibilidad de las zonas de vida de Holdridge en Nicaragua en función del cambio climático. *Revista Forestal Centroamericana* 22(33): 17-22.
- Noss, R. 2001. Beyond Kyoto: forest management in a time of rapid climate change. *Conservation Biology* 15(3): 578-590.
- Palomo, A., G., J. A. Orozco V., E. Gutiérrez R., A. Espinoza B. y S. Rodríguez H. 2003. Análisis de crecimiento de variedades de algodón transgénicas y convencionales. *Crop Science* 7: 171-173.
- Pérez, C., J., B. Locatelli, F. Vignola y P. Imbach. 2005. Importancia de los bosques tropicales en las políticas de adaptación al cambio climático. *Recursos Naturales y Ambiente* 51(6): 34-43.
- Rautiainen, M. 2005. Retrieval of leaf area index for a coniferous forest by inverting a forest reflectance model. *Remote Sensing of Environment* 99: 295-303.

- Rodríguez, A., S., L. Escalante G. y A. Estrada J. 2000. Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra* 17: 149-157.
- Rojo, M., G. 2003. Predicción de la producción de látex en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Müll Arg.) en Oaxaca, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 26(3): 183-190.
- Santos J., D., J. Procopio A. and D. Silva. 2003. Capture and utilization of solar radiation by the soybean and common bean crops and by weeds. *Bragantia* 62(1): 147-153.
- Tianxiang, L., P. N. Ronald, T. Hanqin, J. V. Charles, Z. Huazhong and L. Shirong. 2002. A model for seasonality and distribution of leaf area index of forest and its application to China. *Journal of Vegetation Science* 13: 817-830.
- Vale, F., R., F. Jesús W., R. Coelho and L. Costa. 2001. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean. *Agronomy Journal* 93:989-991.
- Warnock, R., J. Valenzuela, A. Trujillo, P. Madriz y M. Gutiérrez. 2006. Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de caraota. *Agronomía Trop.* 56(1): 21-42.