

Estimación remota del área de planta en un bosque seco: validación de un sistema autónomo de captura y almacenamiento de datos

*Tesis presentada para optar al título de Especialista de la Universidad de Buenos Aires en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria*

**Carolina Isabel Llavallol**

Ingeniera Ambiental – Universidad Católica Argentina - 2004

Lugar de trabajo: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

## COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

**Carlos Marcelo Di Bella**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)  
Doctor (Institut National Agronomique Paris-Grignon)

## JURADO DE TESIS

Director de tesis

**Carlos Marcelo Di Bella**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)  
Doctor (Institut National Agronomique Paris-Grignon)

JURADO

**Gabriela Posse**

Licenciada en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)  
Doctora (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

**Gustavo Piñeiro**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de la República Oriental del Uruguay)  
Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa de la tesis: 19 de junio de 2014

**Agradecimientos**

A mi director, Carlos Di Bella, por su dedicación y paciencia en la dirección de esta tesina; a Alfredo García por su disponibilidad para consultas, ayuda en el trabajo de campo y procesamiento de datos y el tiempo y esfuerzo vertidos en la lectura y corrección de este trabajo; a María Eugenia Beget por su ayuda en el muestreo, en la revisión del proyecto de tesis y la respuesta a consultas; a Julieta Straschnoy por su apoyo; a Esteban Jobbágy por el apoyo logístico brindado durante las campañas.

## **Resumen**

El índice de área foliar es clave en el control de los procesos de los ecosistemas y como tal se busca estimarlo cada vez con mayor precisión y frecuencia para estudios locales, regionales y globales. Los métodos han evolucionado desde la medición directa hasta la utilización de instrumentos ópticos, logrando reducir los esfuerzos y los costos y permitiendo ampliar la frecuencia, la cobertura geográfica y la variedad de ambientes en la estimación de la variable. Una herramienta de estimación es el sistema PASTiS 57, desarrollado en el INRA, que permite registrar la transmitancia de la radiación en la porción del azul del espectro automáticamente cada 1 minuto, derivando de ella el índice de área de planta (PAI). El sistema se ha probado con éxito en bosques boreales y áreas agrícolas, pero no ha sido validado en bosques secos o en áreas semiáridas. El objetivo de este trabajo fue estimar la evolución de PAI con sensores autónomos en tres sitios en un bosque seco en la provincia de San Luis bajo diferentes coberturas a lo largo de un año y evaluar su desempeño en relación a estimaciones realizadas con fotografías hemisféricas, ampliamente validadas para la obtención de PAI. El PAI obtenido mostró una evolución temporal similar al estimado con el método convencional, presentándose hasta el momento como la única herramienta para realizar un monitoreo continuo de esta variable en tierra, en una escala de detalle mayor que la de los sensores remotos satelitales, y requiriendo un menor esfuerzo de muestreo que el habitual con fotografías hemisféricas y otros sensores ópticos manuales.

## **Palabras clave**

Métodos ópticos, área de planta, fracción de huecos, fotografías hemisféricas.

*Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.*

## Índice general

Resumen.....	iv
Palabras clave.....	iv
I. Introducción.....	1
II. Materiales y métodos.....	5
II.1 Sitio de estudio.....	5
II.2 Unidades de muestreo.....	6
II.3 Datos.....	8
II.4 Procesamiento y análisis de datos.....	14
II.5 Análisis de datos.....	16
III. Resultados y discusión.....	17
III.1 Evolución de PAI.....	17
III.2 PASTIS vs. fotografías hemisféricas.....	21
IV. Conclusiones.....	27
V. Referencias.....	29

## Lista de Figuras

Figura 1. (a) Ubicación del área de trabajo en la provincia de San Luis. (b) Sitios de muestreo sobre una imagen Landsat TM en falso color compuesto (IRcercano/IRmedio/R) de noviembre de 2011.....	6
Figura 2. Vistas de las parcelas y ejemplos de fotografías hemisféricas tomadas en cada una.....	7
Figura 3. Alambrado de una parcela. Sobre el poste se ve el sensor que registra energía incidente. ....	8
Figura 4. Modelo de parcela.....	10
Figura 5. Esquema de sensor PASTiS 57.....	10
Figura 6. Ejemplo de datos medidos por un sensor PASTiS (un registro por minuto) el 01/10/11.....	11
Figura 7. Esquema del proceso de estimación de LAI en MODIS (adaptado de Knyazikhin et al., 1999) .....	13
Figura 8. Precipitación (mm) y temperatura (°C) en la estación Beazley.....	14
Figura 9. Procesamiento en CANEye®.....	15
Figura 10. Evolución de PAI efectivo derivado de fotografías hemisféricas por sitio.....	17
Figura 11. Desvío estándar entre parcelas por fecha de medición.....	18
Figura 12. a) $\lambda_{\square_0}$ por sitio; b) desvío estándar de $\lambda_{\square_0}$ por sitio.....	19
Figura 13. PAI diario registrado por PASTiS.....	20
Figura 14. Promedio de PAI PASTiS mensual por sitio.....	20
Figura 15. Desvío estándar de PAI PASTiS entre parcelas, por fecha de registro.....	21
Figura 16. IAF obtenida de MOD15A1 para los tres sitios.....	22
Figura 17. Estimaciones de PAI por ambos métodos para cada sitio y con IAF.....	23
Figura 18. PAI efectivo PASTiS 57 vs. DHP.....	25

Figura 19. PAI efectivo vs. PAI PASTiS por sitio.....	25
Figura 20. Relación entre PAI estimado por PASTiS y PAI verdadero utilizando toda la sensibilidad direccional de los sensores (izquierda) o utilizando la dirección 57,5° (derecha) (extraído de Baret et al., 2010).....	26
Figura 21. PAI efectivo vs. PAI PASTiS en meses húmedos y meses secos.....	26

### **Lista de Tablas**

Tabla 1. Valores de LAI y PAI en diferentes trabajos. ....	3
Tabla 2. Raíz del error cuadrático medio de PAI PASTiS 57 vs. PAI efectivo. ....	26

## I. Introducción

Numerosos trabajos describen la importancia del índice de área foliar (IAF) –definido como la mitad de la superficie foliar total por unidad de área (Chen y Black, 1992) – para la caracterización de la estructura y el funcionamiento de la vegetación (Knyazikhin *et al.*, 1998; Bonan, 2001; Eklundh *et al.*, 2001; Ryu *et al.*, 2012; Olivas *et al.*, 2013). Esta variable está estrechamente relacionada con el intercambio de materia y energía (Fensholt *et al.*, 2004; Garrigues *et al.*, 2008; Pontailier *et al.*, 2003; Myneni *et al.*, 1997) y como consecuencia, ha sido utilizada como variable de entrada en muchos modelos de simulación para describir la estructura y la productividad de la vegetación y ciclos de agua y nutrientes de los ecosistemas terrestres (Running y Coughlan, 1988; Duchemin *et al.*, 2006; Foley *et al.*, 1998, Gamon *et al.*, 1995), entre otros.

Por ejemplo, Duchemin *et al.* (*op cit.*) estudiaron la viabilidad de utilizar el índice de vegetación normalizado como estimador indirecto del índice de área foliar en un modelo de procesos para el monitoreo de la fenología de trigo y el riego en el centro de Marruecos. Pauwels *et al.* (2008) utilizaron observaciones de LAI y del suelo en 18 sitios en Bélgica para evaluar las posibilidades de optimización de dos modelos acoplados para describir la hidrología y la productividad de los cultivos. Running y Coughlan (*op. cit*) desarrollaron un modelo de procesos ecosistémicos para describir el flujo de agua, carbono y nitrógeno en un bosque y utilizaron el índice de área foliar como variable independiente principal en la descripción de la estructura forestal, clave para los procesos de intercambio de masa y energía.

En el último trabajo mencionado los autores destacan la sensibilidad de los procesos ecosistémicos al índice de área foliar y subrayan la necesidad de obtener valores precisos de este parámetro. Este interés se ha visto reflejado en el desarrollo de investigaciones en las más diversas escalas espaciales; desde enfoques locales (por ejemplo Battaglia *et al.*, 1998; Kalácska *et al.*, 2005) y regionales (por ejemplo Kalácska *et al.*, 2005b; Scott *et al.*, 2006) hasta globales (por ejemplo Asner *et al.*, 2003; Scurlock *et al.*, 2001; Myneni *et al.*, 1997; Baret *et al.*, 2007; Weiss *et al.*, 2007).

La medición directa del IAF implica medir la superficie de todas las hojas recolectadas en una muestra superficial conocida. Estos métodos son económicamente costosos, laboriosos y lentos (Bréda, 2003), y por otra parte implican la destrucción de la muestra, lo que dificulta además el seguimiento de IAF a través del tiempo. Tratándose de bosques, el costo es tan alto que la técnica más comúnmente utilizada consiste en pesar y medir la superficie de una submuestra de hojas de biomasa conocida, la que es luego extrapolada a la muestra. Ésta a su vez es llevada a todo el canopeo con los supuestos apropiados (especies, modelos arquitectónicos, densidad, etc.). Por ejemplo, se han desarrollado ecuaciones alométricas que estiman el IAF a partir de una variable fácil de medir como diámetro o altura, cuya relación con IAF ha sido previamente estudiada para un sitio y especie en particular (Jonckheere *et al.*, 2004).



La necesidad de conocer IAF tanto en estudios a nivel individual, de rodal o de paisaje, como a niveles regionales o globales ha impulsado el desarrollo de técnicas de estimación con el objetivo de obtener la información a bajo costo, con alta frecuencia, en poco tiempo y de manera no destructiva. Debido a las dificultades asociadas a la medición directa del IAF, en los últimos años se han desarrollado métodos indirectos que facilitan su estimación basándose en el uso de sensores remotos. Los métodos más comúnmente utilizados se sustentan sobre la ley de extinción de Beer-Lambert, o en el análisis de la fracción de huecos en el canopeo (por ej.: Jonckheere et al., 2004). En otras palabras, se utiliza un modelo de transmisión de radiancia que considera un coeficiente de extinción ( $k$ ) y se utilizan valores medidos de radiación por encima y por debajo del canopeo (Bréda, 2003). Este método requiere obtener transmitancia y IAF por otro método (directo o indirecto) para una submuestra, con el fin de obtener  $k$ .

$$I = I_0 e^{-k \text{ IAF}}$$

donde

$I$ : radiación medida debajo del canopeo

$I_0$ : radiación incidente

$k$ : coeficiente de extinción

Los segundos, en cambio, analizan la arquitectura del canopeo para estudiar la fracción de huecos y la distribución de huecos por tamaño (Bréda, 2003). Esta información asociada a la probabilidad de que un haz de luz atraviese el canopeo (descrita por una distribución de Poisson) permite estimar IAF.

$$P_{(\theta)} = e^{\frac{-G_{(\theta,\varphi)} \cdot \text{IAF}}{\cos(\theta)}}$$

donde

$P_{(\theta,\varphi)}$ : fracción de huecos

$\theta$ : ángulo cenital

$\varphi$ : azimut

$G$ : función de proyección de las hojas en las direcciones  $\theta, \varphi$

Los métodos que se basan en el uso de la fracción de huecos normalmente subestiman IAF principalmente porque suponen una distribución al azar de los huecos (Chen et al., 1997) que no se cumple en la realidad, ya que en general existe agrupamiento entre hojas, entre ramas e incluso entre plantas (Nilson, 1999) que es especialmente importante en bosques ralos (Sprintsin et al., 2011). Como consecuencia, se desarrolló el concepto de IAF efectivo, que es el resultado del producto de IAF por un índice que describe el agrupamiento de los elementos del canopeo (Van Gardingen et al., 1999; Bréda, 2003). El grado de agrupamiento entre los elementos de un canopeo es un parámetro importante porque, además de permitir la corrección del índice de área foliar, influye sobre la capacidad fotosintética de la vegetación, ya que a mayor agrupamiento, mayor superposición de hojas, lo que reduce la superficie fotosintética en relación a la superficie total (Chen et al., 1999).

Por otra parte, muchas veces estos métodos no distinguen tejido fotosintético de no fotosintético (Gower et al., 1999; Garrigues et al., 2008), por lo cual la variable medida no es estrictamente IAF sino índice de área de planta (PAI – del inglés *Plant Area Index*). En especies no leñosas, los trabajos que comparan métodos indirectos con métodos directos en general asumen que IAF es equivalente a PAI. Sin embargo, es importante mantener esta distinción en bosques y arbustales. Diversos autores han analizado la relación entre el área de tejido no fotosintético (“woody area index” o WAI), IAF (o “green leaf area index” o GLAI) y PAI, y han hallado proporciones variables entre material verde y leñoso en distintos ambientes y para distintas especies (Tabla 1). Aunque algunos suponen que en estos casos IAF puede obtenerse de PAI-WAI, otros indican que esta relación no siempre se cumple debido a la superposición de ramas y hojas (Bréda, 2003).

**Tabla 1. Valores de LAI y PAI en diferentes trabajos.**

Ambiente	Comunidad	LAI	PAI	Autor
Arbustal de <i>Prosopis</i> (70%), <i>Ephedra</i> , <i>Yucca</i> , pastos. Temperatura media 16°C Pp media anual 210 mm	<i>Prosopis</i>	1.71	2.08	White et al., 1999
	<i>Ephedra</i>	0.70	1.28	
	<i>Yucca</i>	1.38	1.82	
Plantación de <i>Eucalyptus nitens</i> en Tasmania	<i>Eucalyptus</i>	2 – 8	1.54 x LAI - 0.11	Battaglia et al., 1998
Bosques nativos de eucaliptos y acacias en la sabana australiana. Estación seca. Precipitación entre 450 y 1700 mm/año.	<i>Eucalyptus</i>	0.6 – 1	1,27 x LAI	Sea et al., 2011
	<i>Acacia</i>	0.1 – 0.3		

Los trabajos que utilizan métodos ópticos para obtener IAF en comunidades de especies leñosas usualmente no pueden prescindir del muestreo destructivo para poder establecer una relación entre IAF y PAI que permita inferir el primero a partir del segundo. En un trabajo desarrollado por Sea et al. (2011) se utilizaron fotografías hemisféricas para evaluar la colección 5 de IAF de MODIS en ecosistemas arbustivos sin muestreo destructivo. Los autores procesaron una submuestra de las fotografías hemisféricas para obtener una relación entre la fracción leñosa y la cobertura total de la planta. Los resultados mostraron que la parte leñosa representó aproximadamente el 21% de PAI y esta información se utilizó para estimar IAF de toda la muestra. La concordancia entre MODIS y IAF en terreno en este trabajo fue menor en áreas con baja cobertura o con vegetación senescente.

Entre las herramientas utilizadas más ampliamente para analizar la fracción de huecos se encuentran las fotografías hemisféricas, cuya precisión ha sido probada en numerosos trabajos (Garrigues et al., 2008; Sprinstin et al., 2011; White et al., 1999; Demarez et al., 2007).

Para el monitoreo continuo a escala global se han desarrollado algoritmos que permiten estimar IAF a partir de índices espectrales (combinaciones de valores de reflectancia de superficie en

diferentes bandas del espectro electromagnético) obtenidos de sensores remotos montados sobre plataformas satelitales (Myneni *et al.*, 1997a; Knyazikhin *et al.*, 1999; Baret *et al.*, 2007). En este aspecto, los esfuerzos se han orientado a desarrollar algoritmos lo suficientemente robustos y sensibles para detectar diferencias espaciales y temporales de manera precisa y en los tiempos requeridos. Los algoritmos asocian comúnmente el IAF a diferentes índices espectrales definidos para maximizar la señal de la vegetación y separarla de otras superficies; más comúnmente al NDVI –índice de vegetación normalizado, que mide la relación entre la señal en las regiones del rojo e infrarrojo cercano del espectro. El desarrollo y perfeccionamiento de los diferentes productos exige validarlos con información de campo (Pisek y Chen, 2006; Yang *et al.*, 2006) y con este fin suelen existir sitios de muestreo permanentes en los diferentes tipos de cobertura vegetal.

Entre los productos de IAF existentes pueden citarse ECOCLIMAP (1 km), GLOBCARBON, CYCLOPES, MODIS y POLDER. La estimación de IAF con sensores remotos presenta incertidumbres descritas por varios autores (Fensholt *et al.*, 2004; Garrigues *et al.*, 2008, Pontailier *et al.*, 2003, Fang *et al.*, 2003) entre las que se incluyen:

- La calibración del algoritmo de transformación de reflectancia a IAF.
- la integración de la señal en la superficie de la resolución espacial del sensor,
  - verticalmente: en el caso de ecosistemas con varios estratos puede haber diferencias porque la reflectancia percibida por el sensor no toma toda la vegetación y porque la medición en el campo no toma el sotobosque.
  - horizontalmente: la integración de píxeles heterogéneos, debido a la relación no lineal entre NDVI y IAF, genera una diferencia entre el IAF exacto y el IAF integrado (Garrigues *et al.*, 2006).
- La integración en la dimensión temporal en el caso de productos compuestos. En ambientes templados no intervenidos la variación temporal se da en el componente de la vegetación de hoja caduca, por lo que se requiere cuidado al escalar la medición puntual también en la dimensión temporal (Garrigues *et al.*, 2008.)
- errores generados por interferencias atmosféricas.

A pesar del gran progreso que significó el desarrollo de instrumentos manuales de estimación indirecta de IAF como el ©LiCOR, ©LAI 2000, las fotografías hemisféricas y otros (Jonckheere *et al.*, 2004), la recolección de datos de campo con estos métodos todavía requiere mucho esfuerzo material y de tiempo. Con el fin de obtener un seguimiento fenológico más detallado y para precisar mejor las estimaciones generadas a partir de plataformas satelitales, cubriendo mayor diversidad de ambientes y detectando mejor las variaciones temporales, el INRA de Francia ha desarrollado un sistema de sensores autónomos para la estimación de PAI (Baret *et al.*, en preparación). Este sistema, llamado PASTiS57 (Pai Autonomous System from Transmittance Sensors at 57°), consiste en un grupo de seis sensores que detectan la irradiancia en la región azul del espectro con un ángulo cenital de 57,5°, para maximizar el contraste entre la vegetación y el cielo y minimizar el efecto de la distribución de ángulos de las hojas y el agrupamiento a nivel de individuo (ver II.3.1, Métodos). Para validarlo, Lecerf *et al.* (2010) han utilizado estimaciones de PAI con fotografías hemisféricas y LAI-2000, probando el

sistema en bosques boreales densos de diferentes especies (Lecerf et al., 2010). En los bosques hallaron correlaciones positivas con  $R^2$  variando entre 0,68 y 0,83.

Aproximadamente 42% de la superficie de bosques tropicales y subtropicales del mundo corresponden a bosques secos (Murphy y Lugo, 1986), de los cuales más de la mitad se encuentran en Sudamérica (Miles et al., 2006). Estas formaciones crecen en áreas caracterizadas por una temperatura promedio cercana a 17°C, precipitaciones fuertemente estacionales con promedio anual entre 250 mm y 2000 mm y una relación evapotranspiración potencial:precipitación anual mayor a uno (Murphy y Lugo, 1986). En la Argentina están representados mayormente en las regiones del Chaco seco y húmedo, el monte y el espinal. Durante las últimas décadas del siglo XX e inicios del siglo XXI la expansión de las áreas agrícolas y el desplazamiento de los sistemas de producción ganaderos a áreas más marginales ha significado una tasa de deforestación en estos bosques cercana a 0,9% anual (UMSEF, 2007). Conocer el impacto de este proceso sobre los ciclos de agua y nutrientes y sobre la productividad de estos ecosistemas es fundamental para la planificación del uso del suelo, tanto a nivel predial como regional. Contar con información detallada de la evolución del índice de área foliar en estos bosques permitiría ajustar las estimaciones desde plataformas satelitales y los modelos globales o locales de productividad que utilizan esta variable.

El objetivo de este trabajo fue estimar PAI bajo diferentes coberturas en tres sitios en un bosque seco en la provincia de San Luis a lo largo de un año utilizando sensores autónomos, y evaluar su desempeño en relación a estimaciones realizadas con fotografías hemisféricas, ampliamente validadas para la obtención de PAI. Se espera que la incorporación de datos provenientes de un ambiente en el que estos sensores no han sido probados previamente sea un aporte a la comprensión sobre sus potencialidades y limitaciones para la estimación de PAI.

## II. Materiales y métodos

### II.1 Sitio de estudio

El sitio de estudio está ubicado al sudoeste de la ciudad de San Luis, San Luis, a 33° 27' 50,4" de latitud sur y 66° 27' 32,4" de longitud oeste (Figura 1). Se trata de un bosque seco ubicado en el extremo sur del Chaco semiárido, con una precipitación anual media de entre 400 y 500 mm (Echeverría y Giullieti, 2006), de régimen estacional, con más de 70% de las precipitaciones ocurriendo en primavera-verano (Garay y Veneciano 2005). La temperatura media ronda los 18°C, con máximas que superan los 40°C en enero y mínimas inferiores a -10°C en junio y julio (datos meteorológicos estación Beazley – San Luis).

El bosque es caducifolio y está dominado por *Prosopis flexuosa* D. C. (algarrobo negro), acompañado por *Aspidosperma quebracho-blanco* Schlecht (quebracho blanco) en el estrato arbóreo, mientras que en el sotobosque domina *Larrea divaricata* acompañado de *Lycium chilensis* y *Cercidium* sp., entre otras especies (Figura 2a). La estación de crecimiento se

extiende entre noviembre y abril en coincidencia con en el período de lluvias (Marchesini, 2009).

Durante los últimos años grandes parcelas de bosque han sido intervenidas antrópicamente removiendo el estrato leñoso (excepto árboles aislados), mediante el uso de rolos mecánicos (Rolado), para favorecer el desarrollo del estrato herbáceo al reducir la competencia por agua y radiación fotosintéticamente activa y facilitar el manejo del ganado.

## II.2 Unidades de muestreo

Se instalaron nueve parcelas cuadradas de 400 m<sup>2</sup> (20 m x 20 m) distribuidas en tres sitios representativos de dos ambientes: una de ellas en monte rolado y dos en monte sin rolar, a razón de tres parcelas por sitio: rolado La Esperanza (RLE), bosque Darvich (BDA) y bosque Los Patos (BLP), respectivamente (Figura 1). Aunque originalmente se estableció un cuarto sitio en ambiente rolado, el ingreso de ganado en las parcelas obligó a descartar los datos, por lo que no fue posible realizar una comparación entre ambientes.



**Figura 1. (a) Ubicación del área de trabajo en la provincia de San Luis. (b) Sitios de muestreo sobre una imagen Landsat TM en falso color compuesto ( $IR_{\text{cercano}}/IR_{\text{medio}}/R$ ) de noviembre de 2011.**

Los dos sitios de bosque son ligeramente diferentes, presentando el bosque en Darvich un estrato superior más bajo y abierto que el bosque en Los Patos (Figura 2 a y b). Cada parcela fue cercada para evitar el ingreso del ganado (Figura 3).

Los datos fueron recolectados en las semanas del 4 de abril, 6 de junio, 21 de julio, 5 de octubre y 28 de noviembre de 2011 y 17 de enero, 16 de abril, y 16 de mayo de 2012, totalizando ocho muestreos.



**a) Bosque Los Patos**



**b) Bosque Darvich**



**c) Rolado La Esperanza**



**Figura 2. Vistas de las parcelas y ejemplos de fotografías hemisféricas tomadas en cada una.**



**Figura 3. Alambrado de una parcela. Sobre el poste se ve el sensor que registra energía incidente.**

## II.3 Datos

### II.3.1 Fotografías hemisféricas

En el momento de realizar la descarga de datos del sistema PASTiS se tomaron fotografías hemisféricas con lente ojo de pez con una cámara Nikon Coolpix E995 y un lente Nikon FC-E8, de resolución máxima 2048 x 1536 píxeles hacia el cenit desde el nivel del suelo en ocho puntos alrededor de cada parcela y en cada sensor (Figura 4) exceptuando el incidente. De esta manera se obtuvieron un total de entre 38 y 40 fotografías por parcela.

Aunque las prácticas usuales recomiendan tomar las fotografías hacia el cenit con cielo cubierto o, en su defecto, en horas de amanecer o del atardecer para evitar distorsiones debidas a la luz directa (Chen *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2005) las condiciones del muestreo no lo permitieron debido a que simultáneamente se realizaron mediciones de fAPAR que requerían cielo despejado y ángulos solares más próximos al cenit. Garrigues *et al.* (2008b) concluyeron que de los métodos más comúnmente utilizados para obtener PAI, las fotografías hemisféricas son las más robustas frente a condiciones de iluminación directa.

Para estimar PAI, se utilizó un software conocido como CANEye<sup>®</sup>. Este programa informático utiliza la relación entre la fracción de huecos y PAI dada por el modelo de Poisson:

$$P(\theta, \varphi) = e^{-G(\theta, \varphi) \cdot PAI / \cos(\theta)}$$

Donde:

$\theta$ : ángulo hacia el cenit (0° vertical, 90° horizontal)

$\varphi$ : azimut

$P(\theta, \varphi)$ : fracción de huecos

$G(\theta, \varphi)$ : proyección de las hojas en la dirección  $\theta, \varphi$  definida a partir de una función que describe la distribución en la inclinación de las hojas. En CANEye<sup>®</sup> se asume que esta función es independiente de la altura y el azimut.

El valor obtenido de PAI se define como “PAI efectivo”. CANEye<sup>®</sup> obtiene también “PAI real”, cuya relación con el PAI efectivo está dada por el índice de agrupamiento de las hojas en el canopeo ( $\lambda_0$  de tal manera que  $PAI_{ef} = \lambda_0 \times PAI_{real}$ ).

El PAI efectivo se calcula para cada anillo cenital, dependiendo de  $\lambda_0$  y de la inclinación angular promedio de las hojas. Esto significa que PAI efectivo tiende a subestimar PAI, pero no lo hace de manera lineal. El índice de agrupamiento se ve afectado tanto por el agrupamiento a nivel de hojas y ramas como por el agrupamiento en el canopeo y asume valores iguales a 1 en canopeos con distribución al azar, menores a 1 para canopeos irregulares y mayores a 1 para canopeos regulares.

$$\lambda_0 = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n \log(P_0)}{N}}{\log\left(\frac{\sum_{i=1}^n P_0}{N}\right)} = \frac{PAI_{ef}}{PAI_{real}}$$

Donde:

$P_0$ : fracción de huecos

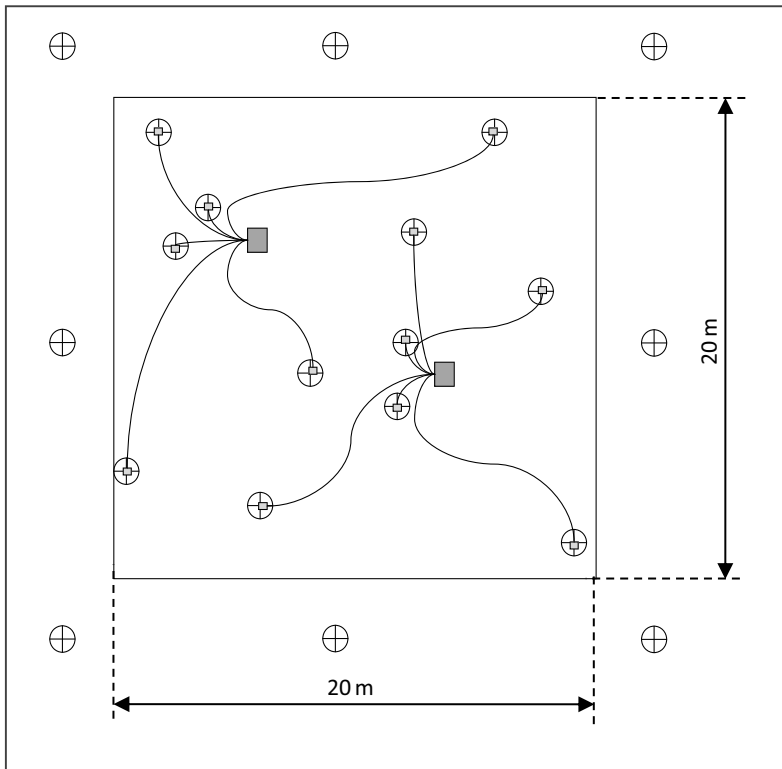
$N$ : número de anillos cenitales

$\lambda_0$ : índice de agrupamiento

### II.3.2 Sensores PASTiS

Cada sistema PASTiS 57 está compuesto por seis sensores (Figura 4) conectados a un colector de datos. Cada sensor contiene un fotodiodo sobre un soporte que se clava en el suelo (Figura 5). El fotodiodo mide radiación recibida en la porción del azul del espectro electromagnético, en el que se maximizan las diferencias entre el cielo y la vegetación. En esta longitud de onda el cielo se muestra brillante debido a la dispersión de Rayleigh, que es producida por partículas de mucho menor tamaño que la longitud de onda que dispersan. La intensidad de esta dispersión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de la onda dispersada y por este motivo el cielo tiene alta dispersión en el azul. La vegetación por su parte tiene alta absorción, lo que maximiza el contraste entre ambos. La frecuencia de registro puede ser de un registro por minuto o de un registro cada cinco minutos (Figura 6). Los sensores tienen un ángulo de inclinación de  $57,5^\circ$  debido a que en esa dirección la función de proyección de las hojas es prácticamente independiente de su distribución direccional (Weiss et al., 2004), lo que evita la necesidad de integrar todas las direcciones para la estimación del IAF.



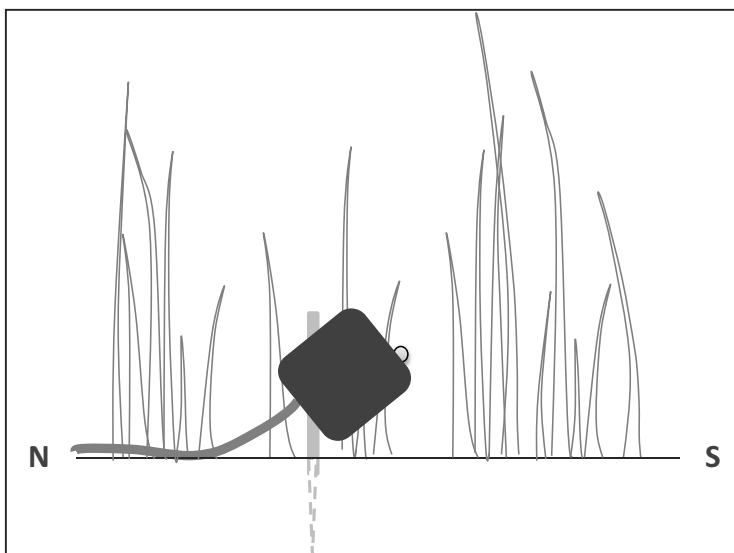


**Figura 4. Modelo de parcela**

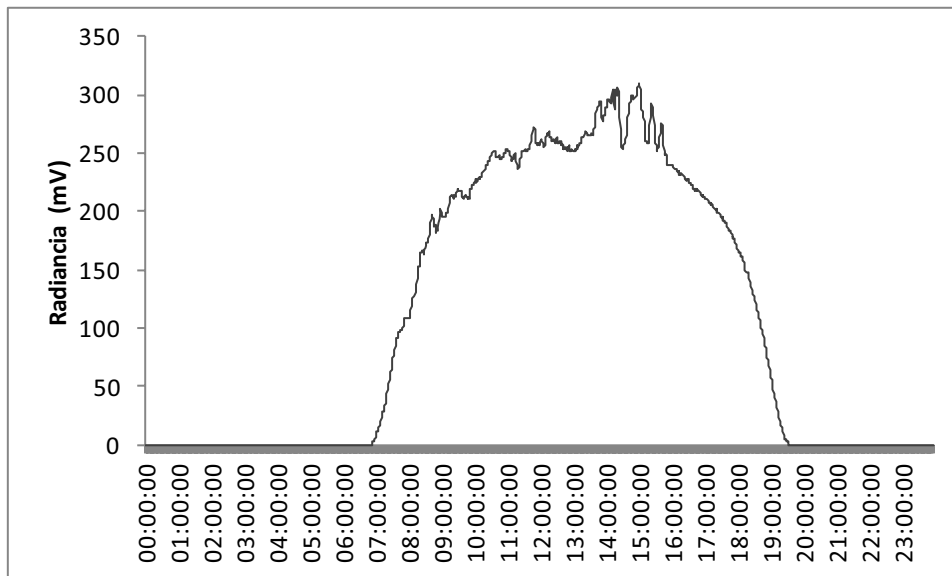
⊕: fotografía hemisférica y medición con ceptómetro.

□: sensor

■: captador de datos



**Figura 5. Esquema de sensor PASTiS 57**



**Figura 6. Ejemplo de datos medidos por un sensor PASTiS (un registro por minuto) el 01/10/11.**

Previo a su instalación en el campo se calibraron los sensores con el fin de reducir las diferencias de medición atribuibles al sensor. Para ello se colocaron sobre una plataforma ubicada en un sitio libre de obstrucciones a la radiación incidente durante setenta y dos horas. Se tomó la mediana de los registros de todos los sensores como base para calcular el coeficiente de calibración de cada sensor (García *et al.*, en edición).

En cada parcela se instalaron dos sistemas PASTiS. Los sensores se clavaron sobre la superficie del terreno y se orientaron hacia el sur para evitar la luz solar directa. Se distribuyeron aleatoriamente a distancias aproximadas de 2 m, 6 m y 10 m del captador automático de datos, de modo de obtener una distribución representativa de la superficie total de 400 m<sup>2</sup> (Figura 4). En cada parcela uno de los doce sensores fue instalado sobre un poste a una altura aproximada de 2 m con el objeto de medir la radiación total incidente en el azul (Figura 3).

El sistema PASTiS estima PAI a partir de la misma base teórica que las fotografías hemisféricas, pero en lugar de derivarlo de la fracción de huecos lo obtiene a partir de la transmitancia en el azul calculada a partir de la diferencia entre la radiación captada sobre el canopeo y debajo del canopeo a un ángulo de 57,5°. Registra de manera continua la transmitancia bajo el canopeo en condiciones tales que se minimicen los efectos del agrupamiento de las hojas, de su distribución angular y de las condiciones de iluminación (Baret *et al.*, 2010).

A partir de la relación entre la radiación captada por el sensor debajo del canopeo (transmisividad) y por el sensor incidente (radiación incidente) es posible calcular la fracción de la radiación incidente que no es interceptada por el canopeo (transmitancia,  $P_0$ ). Para calcular la transmitancia se utilizó una ventana temporal de 5 días para la cual se realizó una regresión entre la radiación incidente y la transmisividad, asignando la pendiente a  $P_0$  del tercer día de la ventana temporal. Se estimó PAI utilizando la siguiente ecuación derivada del modelo de Poisson (ver II.4.1):

$$PAI = -\frac{\cos(57,5^\circ)}{G(57,5^\circ)} \ln(P_0(57,5^\circ))$$

donde:

$P_0$ : transmitancia

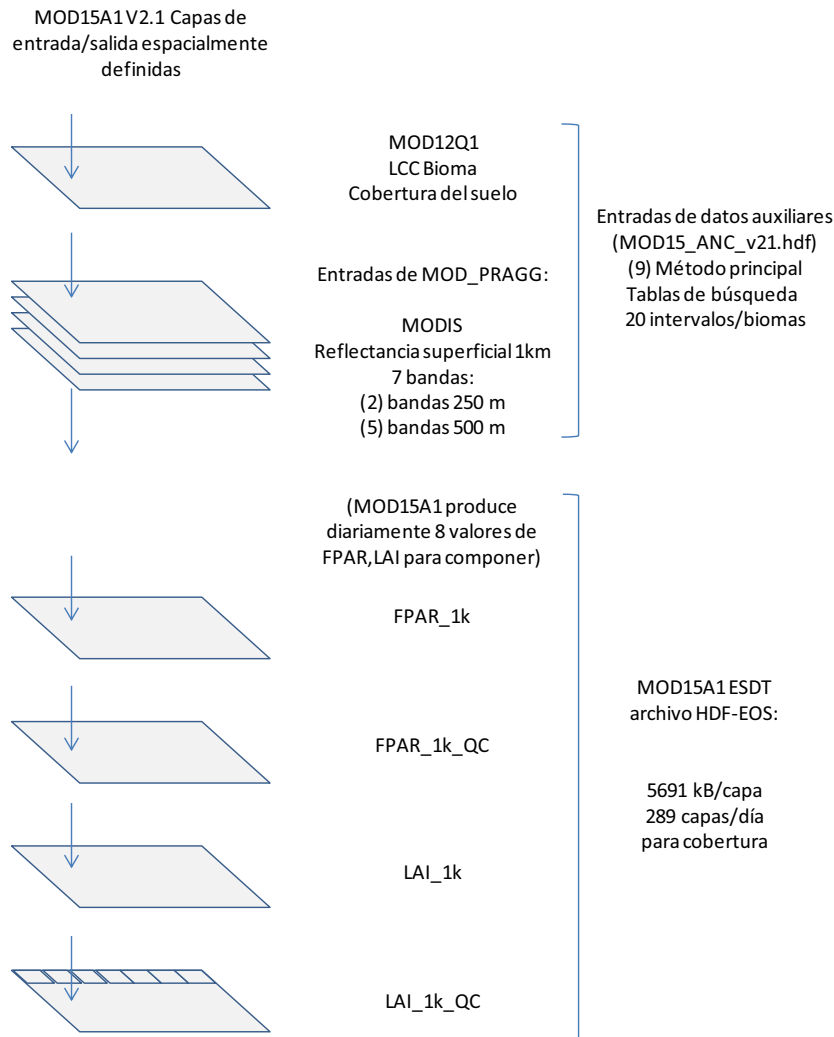
G: función de proyección de las hojas. La función de proyección para PASTiS a  $57,5^\circ$  es igual a 0,5.

### **II.3.3 Imágenes satelitales del sensor MODIS**

Se descargaron los datos del producto de índice de área foliar (MOD15A1) de la colección 5 del Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) para un píxel contiguo o que incluyera las parcelas en cada sitio, disponibles en el centro de archivos del laboratorio Oak Ridge (daac.ornl.gov). Los tres píxeles fueron seleccionados de tal forma que toda el área incluida dentro del píxel tuviera las características de las parcelas correspondientes. Este producto estima el índice de área foliar con una resolución de 1 km x 1 km en una imagen de máximo valor compuesto cada ocho días.

MODIS es un sensor de alta resolución radiométrica que registra radiancia en 36 bandas entre  $0,4 \mu\text{m}$  y  $14,4 \mu\text{m}$  (desde el violeta hasta el infrarrojo cercano), con resolución espacial variable de 250 m, 500 m y 1 km, dependiendo de la banda. Actualmente hay dos sensores montados sobre los satélites Terra y Aqua, ambos con órbita polar y con una resolución temporal diaria excepto en altas latitudes. Terra fue puesto en órbita en diciembre de 1999 y Aqua en mayo de 2002.

Para obtener el producto índice de área foliar (MOD15A1) se utiliza la clasificación de suelos obtenida con MOD12Q1 (cobertura de suelo) y las reflectancias en hasta siete bandas del satélite (Knyazikhin et al., 1999; Figura 7).



**Figura 7. Esquema del proceso de estimación de LAI en MODIS (adaptado de Knyazikhin et al., 1999)**

El algoritmo modela las reflectancias bidireccionales basado en modelos de transferencia radiativa para el tipo de vegetación, propiedades ópticas de las hojas y heterogeneidad y suelo y las compara con las reflectancias obtenidas por el sensor a través de una “look-up table”, promediando todas las soluciones aceptadas (Gessner et al., 2013).

### II.3.4 Datos climáticos

Se obtuvieron los datos de precipitación y temperatura del aire de la estación meteorológica ubicada en la localidad de Beazley (Figura 8), 25 km al suroeste del sitio de muestreo. La estación provee datos diarios desde octubre de 2007. Se obtuvo la precipitación mensual a partir de la suma de las precipitaciones para cada mes, y la temperatura mensual promedio de las temperaturas medias diarias para el período del muestreo (abril de 2011 a junio de 2012). Durante el período analizado se distingue una estación seca entre mayo y septiembre y una estación húmeda durante la cual ocurrieron más del 85% de las precipitaciones y las mayores temperaturas.

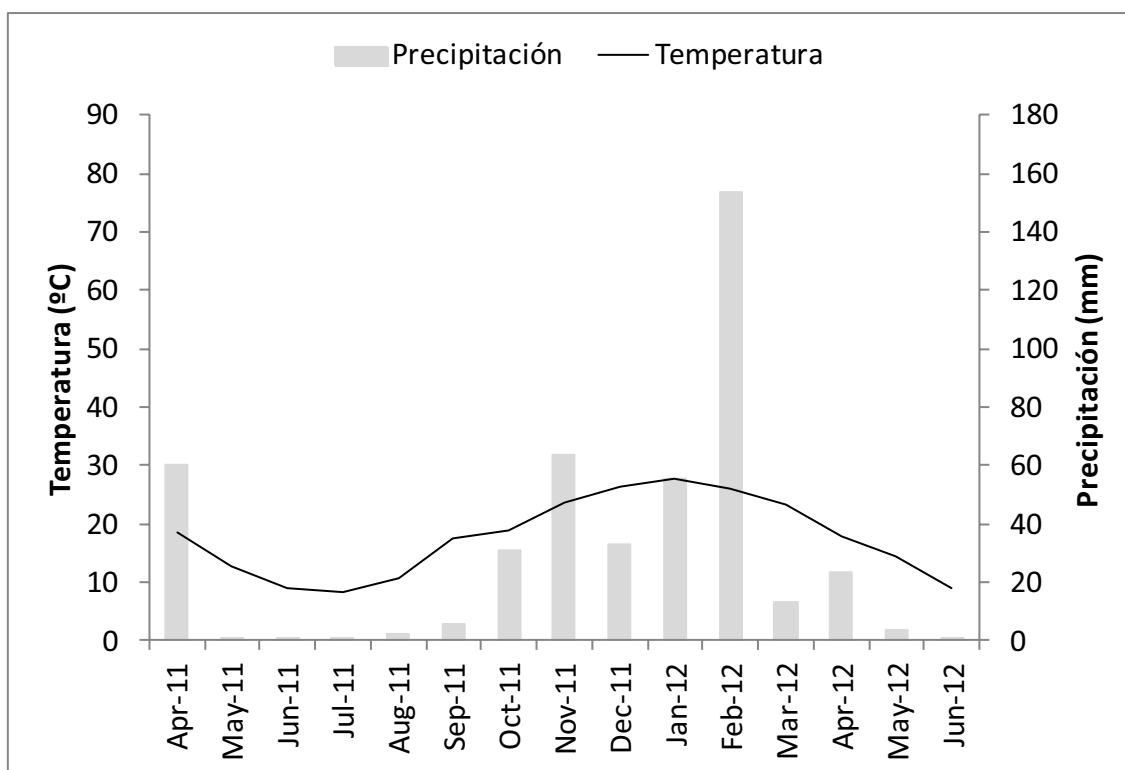


Figura 8. Precipitación (mm) y temperatura (°C) en la estación Beazley.

## II.4 Procesamiento y análisis de datos

### II.4.1 Fotografías hemisféricas

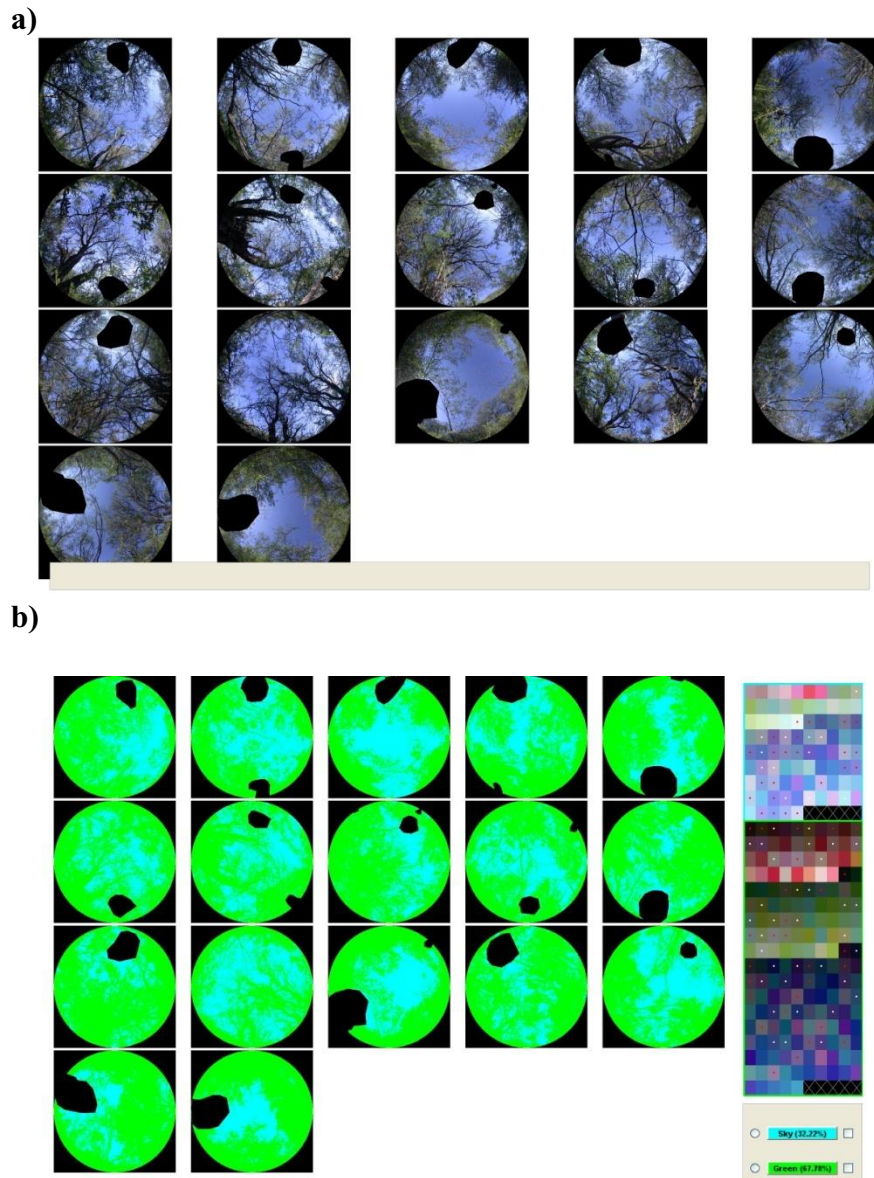
Las fotografías hemisféricas se procesaron con el software CanEye®, desarrollado por el INRA para obtener PAI efectivo (asumiendo distribución al azar de huecos) y PAI real (tomando en cuenta el agrupamiento entre hojas), entre otros parámetros (Weiss y Baret, 2010). Esta aplicación ha sido utilizada recientemente para analizar las estimaciones de IAF provistas por MODIS en Australia con buenos resultados (Sea *et al.*, 2011).

Para poder procesar fotografías hemisféricas para la descripción de variables de un canopeo es necesario conocer la función de proyección y las coordenadas del centro óptico del instrumento, ya que en general éste no coincide con el centro de la imagen. Los parámetros de calibración de la cámara se obtuvieron aplicando el método propuesto por Baret (2004). Esta información se ingresó, junto con la latitud y día del año para cada muestreo, y se redujo el círculo de interés de la imagen a 75°, ya que en fotografías hemisféricas las mayores distorsiones se producen en azimuts cercanos a la horizontal.

Para cada parcela se utilizaron todas las fotografías hacia el cenit, descartando las imágenes de baja calidad (e.g. fuera de foco). La aplicación permite remover áreas de cada fotografía previamente al análisis, lo que se utilizó para enmascarar el sol y objetos no correspondientes a vegetación (Figura 9a). Una vez realizado este pre-procesamiento el software clasifica las

imágenes asignando cada píxel a la categoría “cielo” o “verde” (Figura 9b). Esta clasificación fue corregida manualmente comparando las imágenes clasificadas con las originales.

De cada procesamiento se obtuvieron valores de PAI para cada fotografía y un valor de PAI global para la parcela en la fecha correspondiente. Este último fue el valor utilizado para la comparación con PASTiS 57.



**Figura 9. Procesamiento en CANEye®.**

#### II.4.2 Sensores PASTiS

El valor de transmitancia para cada parcela se estimó promediando los datos de transmitancia de los sensores y se obtuvo PAI de:

$$PAI = -\frac{\ln(P_0)}{0.93}$$

En cada ocasión de descarga de datos se corrigieron aquellos sensores que estuvieran desorientados y se limpiaron los sensores sucios. El procesamiento de datos se realizó en MATLAB. Debido a que valores bajos de radiación incidente pueden llevar a error en el cálculo de la transmitancia se filtraron los datos de la siguiente manera (García *et al.*, en preparación):

- 1) Se eliminaron los datos provenientes de ángulos cenitales superiores a 80° (con el sol cercano al horizonte)
- 2) Se eliminaron los datos correspondientes a cielos despejados debido a que en estas condiciones la radiancia en el azul es mínima en comparación con cielos cubiertos con nubes. Para esto se normalizó el registro de radiación incidente con respecto al ángulo cenital calculando  $I^* = \frac{I}{\cos(\theta)}$  y eliminando los valores calculados donde  $I^* < 1000$ .

Además se filtraron los datos consecutivos con más de 25% de variación, ya que esta variabilidad no corresponde a la realidad para datos registrados con cinco minutos de diferencia.

## II.5 Análisis de datos

Para el análisis descriptivo de PAI PASTiS se obtuvo un promedio diario a partir de las estimaciones de PAI cada cinco minutos y un valor mensual por parcela entre abril de 2011 y abril de 2012.

Se obtuvo  $\lambda_0$  por fecha para cada sitio del promedio de  $\lambda_0$  de las tres parcelas. Se obtuvo el valor promedio de  $\lambda_0$  del promedio de las fechas.

Debido a la gran variabilidad existente en los datos diarios se decidió comparar los datos obtenidos de las fotografías hemisféricas con el promedio de los datos obtenidos por los sensores PASTiS a lo largo de siete días, con centro en el día de la toma de las fotografías. Esto se hizo debido a que el proceso de descarga de datos ocasionalmente implicó la ausencia de registros en el día de la descarga.

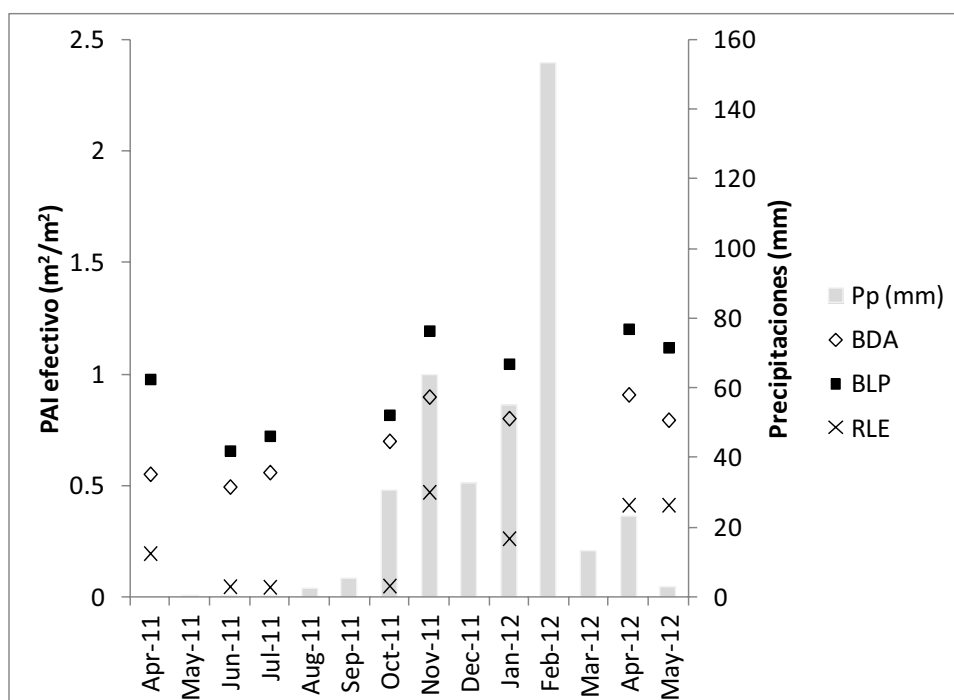
Se compararon los resultados obtenidos en cada método ajustando correlaciones por el método de cuadrados mínimos y analizando los errores medios cuadráticos de esos ajustes. Aunque los valores de  $R^2$  permiten observar qué porcentaje de la variación de una variable depende de la variación de otra, puede llevar a errores en casos en los que haya altos desvíos (llevando a ignorar errores grandes) o en casos en que, debido a desvíos muy pequeños, un error pequeño se considere significativo (Willmott, 1981). La raíz del error cuadrático medio (RMSE) además da una medida del error en las mismas unidades que las variables consideradas.

### III. Resultados y discusión

#### III.1 Evolución de PAI

##### III.1.1 Fotografías hemisféricas

Los valores de PAI (PAI efectivo) obtenidos a partir de las fotografías hemisféricas muestran una evolución similar en los tres sitios: los mínimos ocurren entrando en el invierno y los máximos en primavera-verano, con un período de incremento intermedio ocurriendo entre octubre y noviembre, y de decrecimiento entre abril y junio (Figura 10).



**Figura 10. PAI efectivo derivado de fotografías hemisféricas en los tres sitios en cada fecha de muestreo entre 2011 y 2012. En los meses sin datos no se realizaron muestreos. BDA: Bosque Darvich. BLP: Bosque Los Patos. RLE: Rolado La Esperanza.**

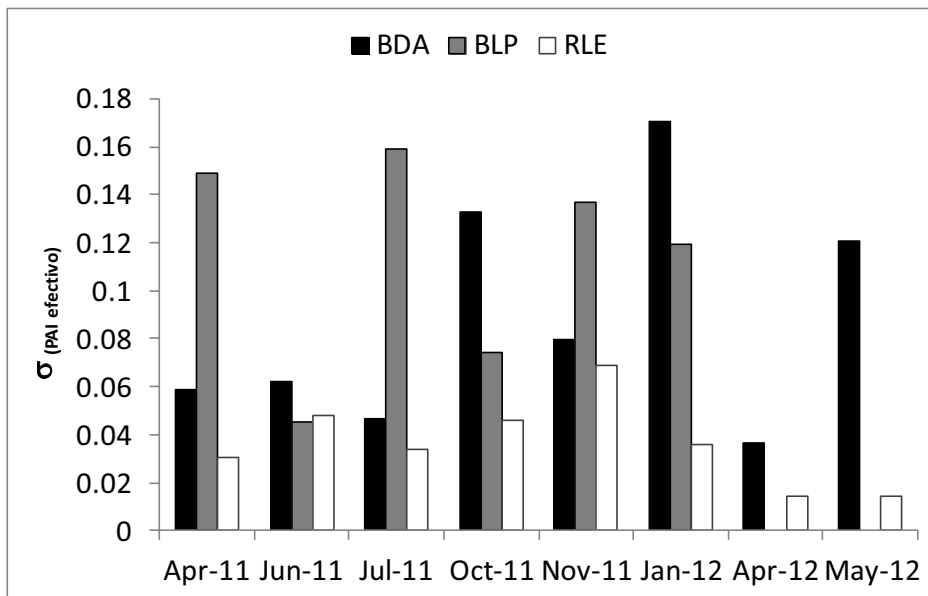
En los bosques los mínimos valores de PAI se alcanzan en junio (0,44 en BDA y 0,60 en BLP), comenzando a aumentar significativamente a partir de octubre hasta llegar a un máximo en noviembre (0,99 en BDA y 1,34 en BLP). A partir de ese momento fluctúan entre valores cercanos a los máximos hasta abril, cuando nuevamente empiezan a descender al inicio del otoño. El bosque en Darvich, por presentar menor cobertura que en Los Patos, muestra menores valores de PAI. Esto está de acuerdo con las mediciones de fAPAR que se obtuvieron con ceptómetro lineal simultáneamente a la toma de las fotografías hemisféricas (Raymaekers et al., en prensa).

En el rolado PAI se mantiene aproximadamente constante en los niveles de mínima (0,01 m²/m²) hasta el mes de octubre, cuando aumenta bruscamente y durante el resto de la primavera y el verano acompaña el comportamiento de los bosques, alcanzando un máximo



absoluto de  $0,54 \text{ m}^2/\text{m}^2$  en una de las parcelas. Al inicio del otoño los valores de PAI aún se mantienen altos.

Los desvíos entre parcelas para cada sitio muestran que los bosques son más heterogéneos que el rolado (Figura 11) a lo largo de todo el año. Los bosques muestran alta variabilidad en el período de crecimiento, mientras que el rolado se mantiene en valores bajos.

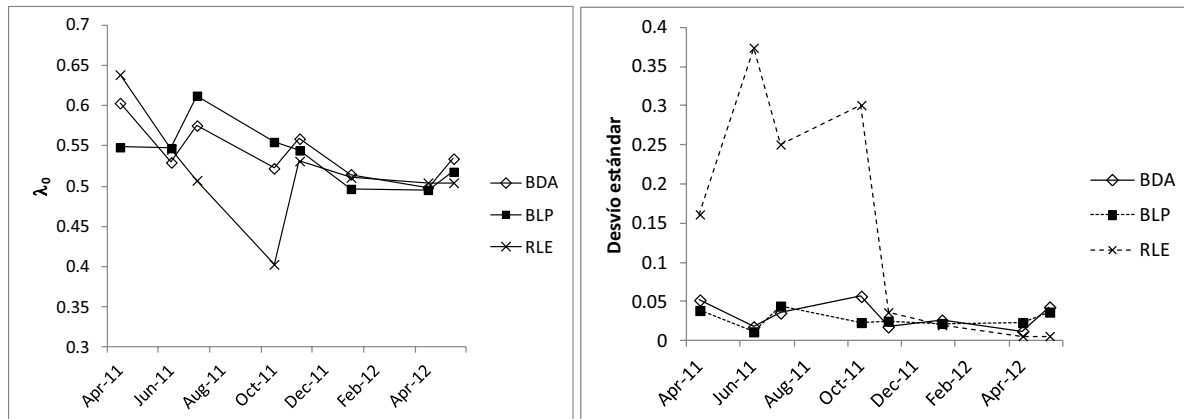


**Figura 11. Desvío estándar para PAI entre parcelas en los tres sitios en cada fecha de medición. En abril y mayo no se muestran los desvíos para BLP debido a la falta de datos en una parcela. BDA: Bosque en Darvich; BLP: Bosque Los Patos; RLE: Rolado en La Esperanza.**

Como se describió en la sección de métodos, CAN Eye<sup>®</sup> provee un valor de PAI efectivo y también de PAI real, en el que se considera el factor  $\lambda_0$  de agrupamiento entre hojas, ramas y fustes para evitar la subestimación del índice de área de planta. Al incorporarse el factor de agrupamiento los tres sitios mantienen la misma posición relativa, pero con mínimos mayores que los de PAI efectivo. La diferencia entre PAI real y PAI efectivo es mayor en los sitios de bosque que en el rolado, y en los tres casos es mayor durante el período de crecimiento, llegando a máximos de PAI real que duplican a PAI efectivo.

Las estimaciones de  $\lambda_0$  (Figura 12) indican que el canopy es irregular, con niveles de agrupamiento entre plantas, ramas y hojas similares para los tres sitios ( $\overline{\text{BDA}}=0,54$ ;  $\overline{\text{BLP}}=0,55$ ;  $\overline{\text{RLE}}=0,51$ ), aunque mucho más variables entre parcelas y entre fechas para el sitio rolado. En los dos sitios de bosque  $\lambda_0$  se muestra estable a lo largo de todo el año, resultado del peso más importante del componente leñoso, con una leve tendencia a decrecer con el crecimiento del PAI; es decir, a medida que crece el componente verde la distribución se vuelve más irregular. Estos resultados corroboran lo hallado por Chen *et al.* (2005) al estimar valores globales para el índice de agrupamiento basándose en valores de reflectancia en varias direcciones obtenidas del sensor remoto POLDER. Estos autores encontraron que el grado de agrupamiento se incrementaba en el hemisferio norte de diciembre a junio, mientras que en el hemisferio sur lo hacía de noviembre a enero. En el rolado, los muy bajos valores de PAI efectivo y real durante

el invierno (cerca de cero) hacen que cambios muy pequeños en esta variable generen grandes variaciones de  $\lambda_0$ , tanto entre fechas como entre parcelas (Figura 12 b)



**Figura 12. a) Factor de agrupamiento ( $\lambda_0$ ) por sitio en cada fecha de muestreo; b) desvío estándar de  $\lambda_0$  por sitio en cada fecha de muestreo. BDA: Bosque Darvich. BLP: Bosque Los Patos. RLE: Rolado La Esperanza.**

### III.1.2 PASTiS

Las estimaciones de PAI con PASTiS describen un comportamiento acorde con la evolución de las temperaturas y las lluvias, y coinciden con lo hallado en las fotografías hemisféricas. Durante la estación seca (entre abril y agosto) el PAI de los tres sitios disminuye paulatinamente y comienza a aumentar a partir de agosto-septiembre, con el inicio de las precipitaciones (Figura 13 y Figura 14). Luego de un período de rápido crecimiento (entre septiembre y noviembre) los sitios se comportan de manera divergente. En BLP, el PAI crece desde un mínimo de  $0,84 \text{ m}^2/\text{m}^2$  a inicios de septiembre hasta alcanzar un valor máximo de  $1,92 \text{ m}^2/\text{m}^2$  en el mes de noviembre, momento a partir del cual los valores se estabilizan entre aproximadamente  $1,76 \text{ m}^2/\text{m}^2$  y  $1,79 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . En BDA, en cambio, el crecimiento más pronunciado se produce entre septiembre y noviembre, y el PAI continúa creciendo, aunque en menor medida, hasta abril del año siguiente, llegando a  $2,29 \text{ m}^2/\text{m}^2$  a pesar de que el mínimo ( $0,66 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) es inferior al de BLP. En abril y mayo de 2012, a pesar de entrar nuevamente en la estación seca, los valores de PAI no descienden a los niveles del año anterior en ninguno de los dos sitios ( $p < 0,05$ ).

En el rolado la evolución es más variable, con repentinos crecimientos y decrecimientos de PAI. Así, se registra un valor ( $0,19 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) cercano al mínimo para el sitio el 5 de octubre y el máximo ( $1,70 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) el 17 de noviembre, volviendo a caer en enero para registrar un segundo pico ( $1,24 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) a finales de febrero.

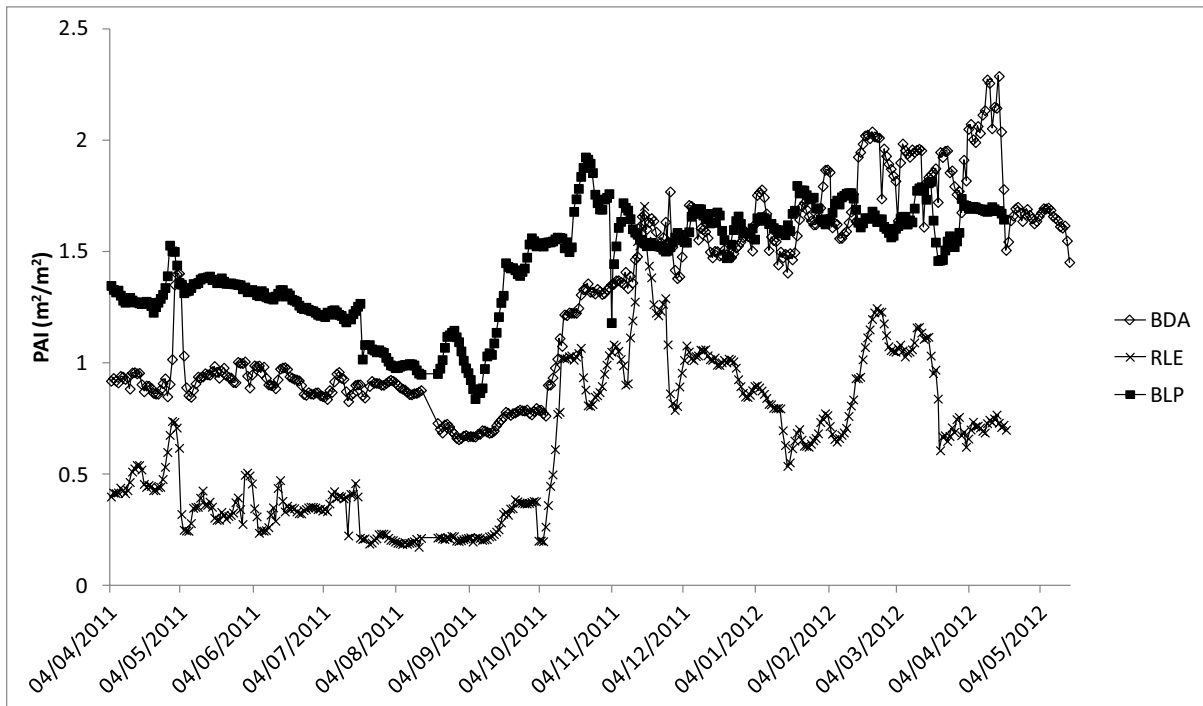


Figura 13. Valores de PAI diario registrado por PASTiS en los tres sitios. Los valores corresponden al promedio diario de las tres parcelas en cada sitio. BDA: Bosque Darvich; BLP: Bosque Los Patos; RLE: Rolado La Esperanza.

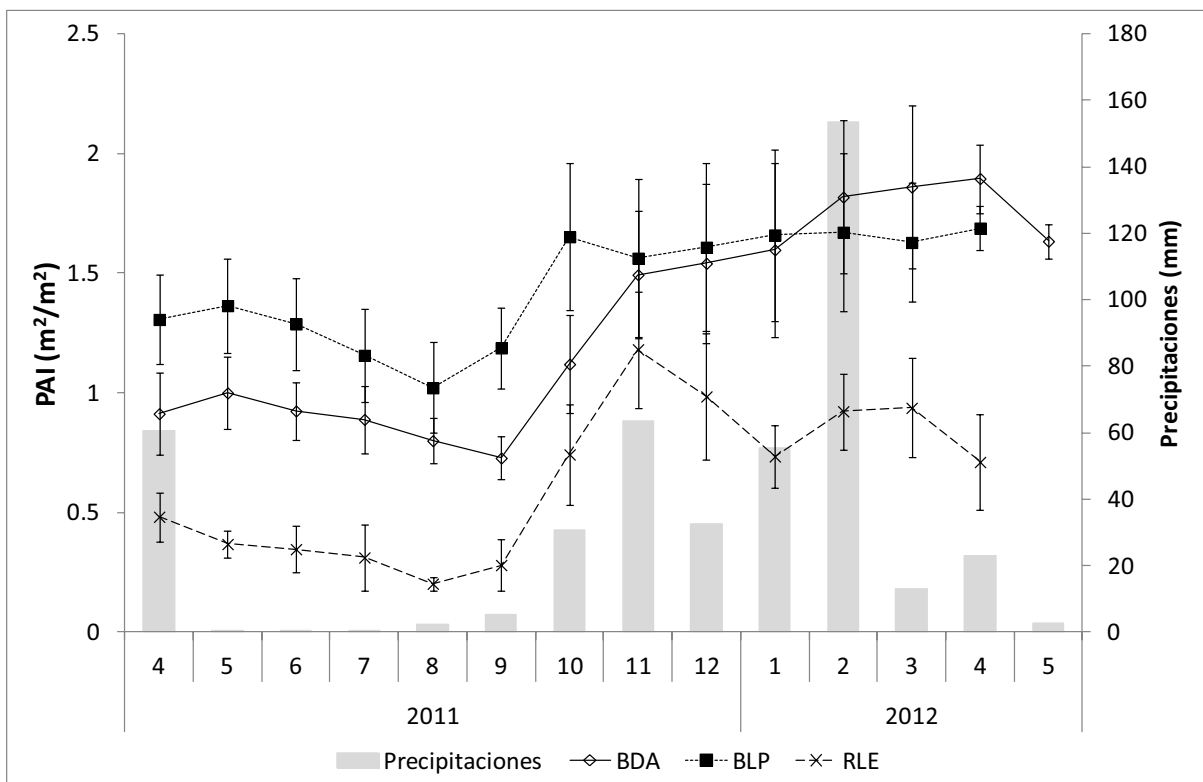
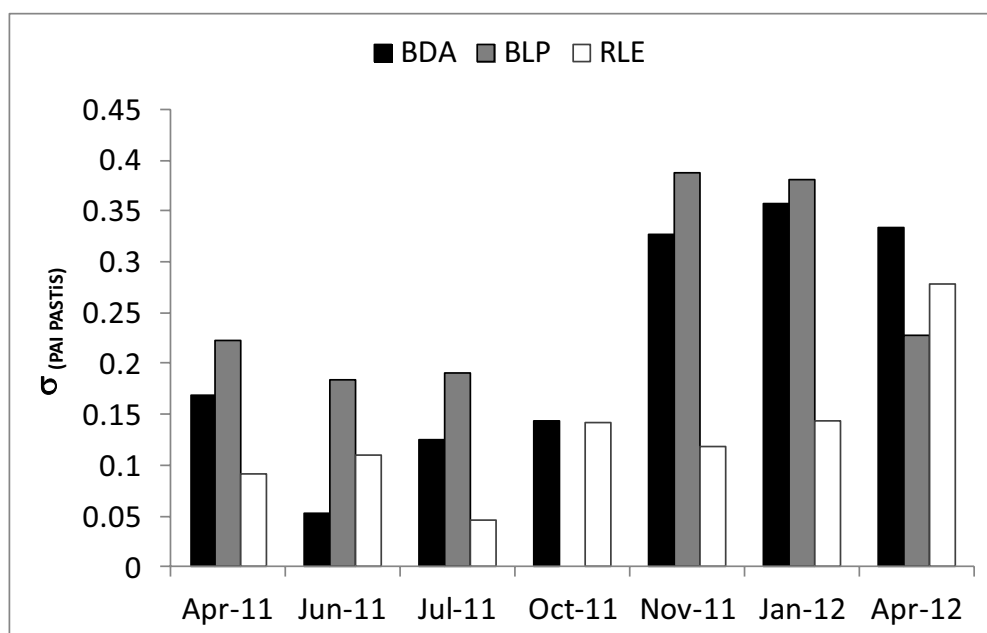


Figura 14. Promedio mensual de valores de PAI registrados por los sensores PASTiS en los tres sitios. Las barras muestran el desvío estándar entre parcelas. Se muestran las precipitaciones acumuladas para cada mes obtenidas de la estación Beazley. BDA: Bosque Darvich. BLP: Bosque Los Patos. RLE: Rolado La Esperanza.

La heterogeneidad en los sitios de bosque es siempre mayor en BLP seguido de BDA y por último RLE (excepto en el mes de octubre), y aumenta con el avance de la estación de crecimiento (Figura 15).

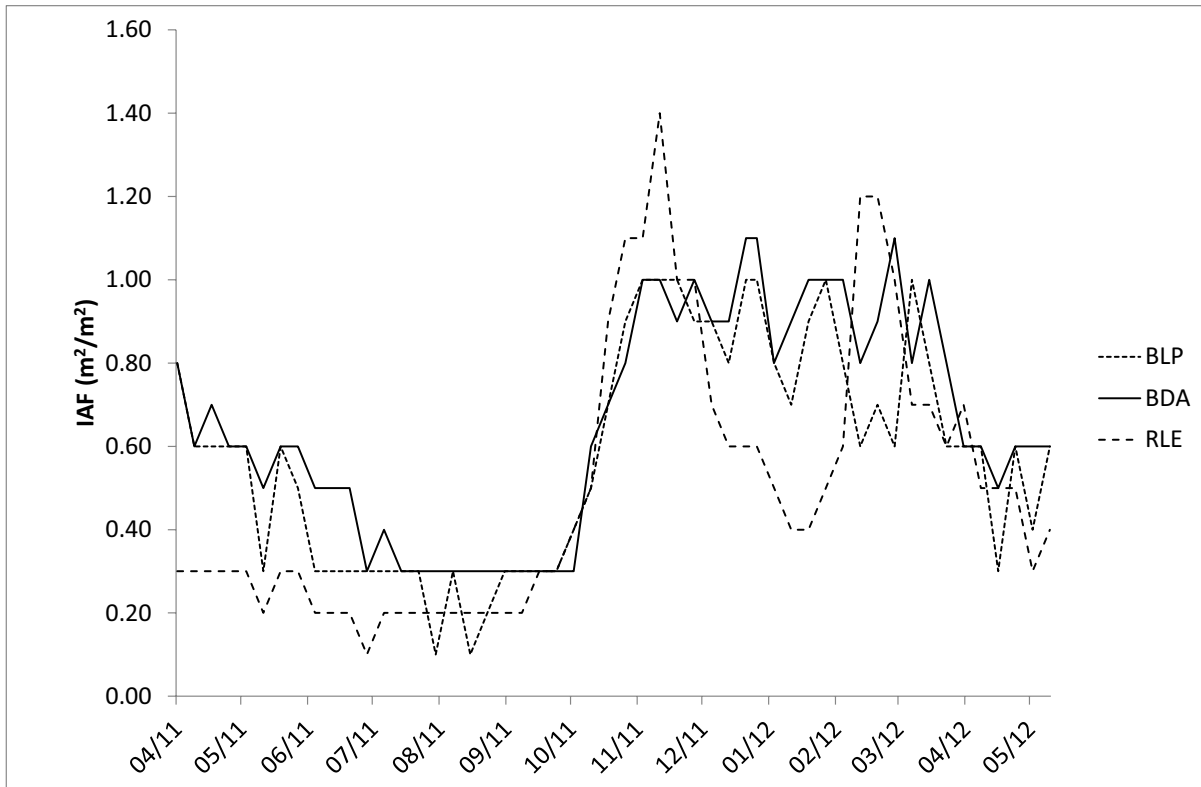


**Figura 15.** Desvío estándar de los valores de PAI registrados por PASTiS entre parcelas por fecha de registro. BDA: Bosque en Darvich; BLP: Bosque Los Patos; RLE: Rolado en La Esperanza. En octubre no se muestra el desvío de PAI PASTiS para BLP debido a que faltan datos para una parcela.

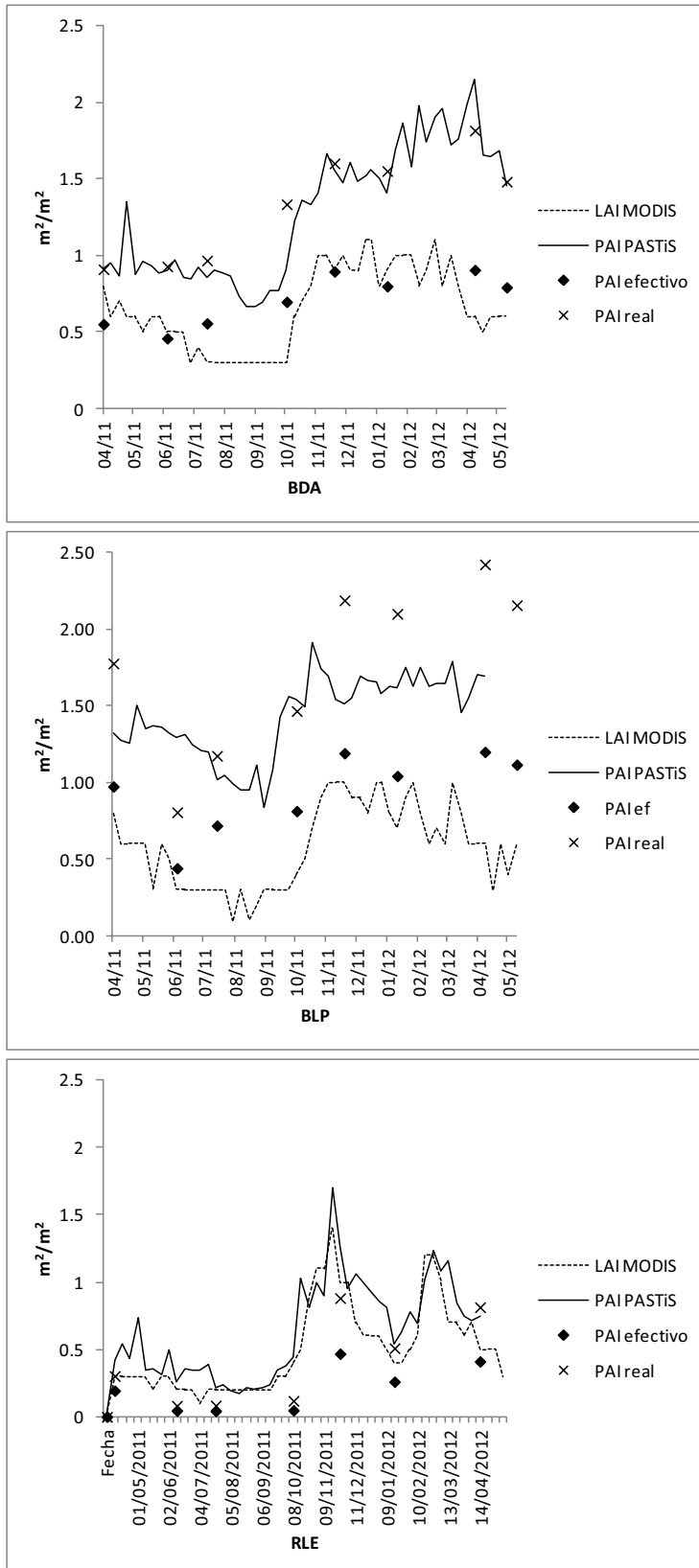
### III.2 PASTIS vs. fotografías hemisféricas

Los resultados hallados por ambos métodos son coherentes con la descripción del sitio derivada del análisis realizado por Marchesini (2009), quien analizó la evolución del índice de vegetación normalizado en parcelas cercanas a las que aquí se utilizaron, tanto en bosque como en sitios rolados, entre 2004 y 2009. Esto le permitió distinguir una estación de crecimiento que se inicia en la primavera (septiembre-octubre) y dura hasta el final del otoño (abril-mayo), con el período de menor NDVI (junio-agosto) ocurriendo antes del inicio de la estación lluviosa.

Los resultados obtenidos también acompañan los valores de IAF estimados por MODIS aunque las posiciones relativas de las curvas son distintas. IAF oscila aproximadamente entre los mismos valores en los tres sitios (Figura 16), mientras que PAI es similar a IAF en el rolado y mayor a IAF en los bosques debido a que incluye el componente leñoso (Figura 17). Además, Marchesini (2009) halló que el rolado acortó la estación de crecimiento en las parcelas entre 18 días y hasta 3 meses, lo que concuerda con el incremento más temprano de PAI en bosque hallado con las fotografías hemisféricas.



**Figura 16. Valores de IAF obtenidos de MOD15A1 para cada sitio en las fechas indicadas para un pixel contiguo o que incluyera las parcelas evaluadas. BDA: Bosque en Darvich; BLP: Bosque Los Patos; RLE: Rolado en La Esperanza.**



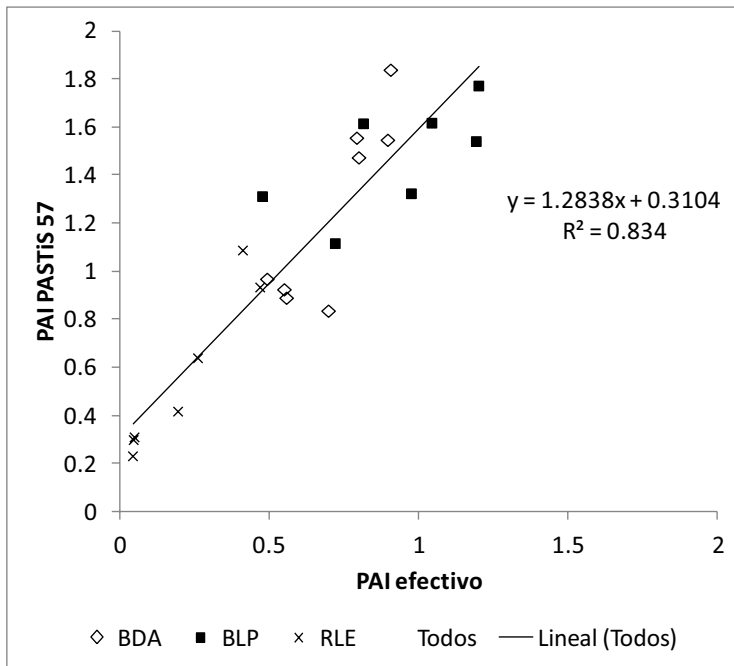
**Figura 17. Valores de PAI efectivo y PAI real estimados con fotografías hemisféricas en las fechas de muestreo, valores de PAI estimados con PASTiS y valores de IAF provistos por MODIS para las fechas indicadas. BDA: Bosque Darvich. BLP: Bosque Los Patos. RLE: Rolado La Esperanza.**

Dinámicas similares de PAI fueron hallados en otros ambientes semiáridos. Sea et al. (2006) estudiaron la evolución de PAI en la sabana australiana, con un régimen de precipitaciones estacional de entre cinco y ocho meses de duración y precipitación promedio de entre 450 y 1300 mm anuales. En este ambiente Sea et al. (2006) hallaron que la variación anual del IAF está formada por un componente estable de árboles siempre verdes, un componente variable atribuido al crecimiento de pastizales durante la estación lluviosa y un pequeño componente asignado a árboles deciduos que incrementan el área foliar antes del inicio del período de las lluvias. Este comportamiento es común en bosques secos (Borchert, 1994) y en la región chaqueña está relacionada con la característica freatófita facultativa de las especies de *Prosopis* (Villagra, 2000).

Por su parte Scott et al. (2006) analizaron el PAI para un ambiente semiárido en Estados Unidos (constituido por pastizales, arbustales y bosques) y encontraron una variación acoplada al régimen estacional de las precipitaciones con valores de PAI variando entre  $0,7 \text{ m}^2/\text{m}^2$  y  $2,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , en la que el pastizal presenta valores mínimos menores que el bosque y el arbustal, pero alcanza y supera los valores de PAI de esos ambientes en la estación húmeda.

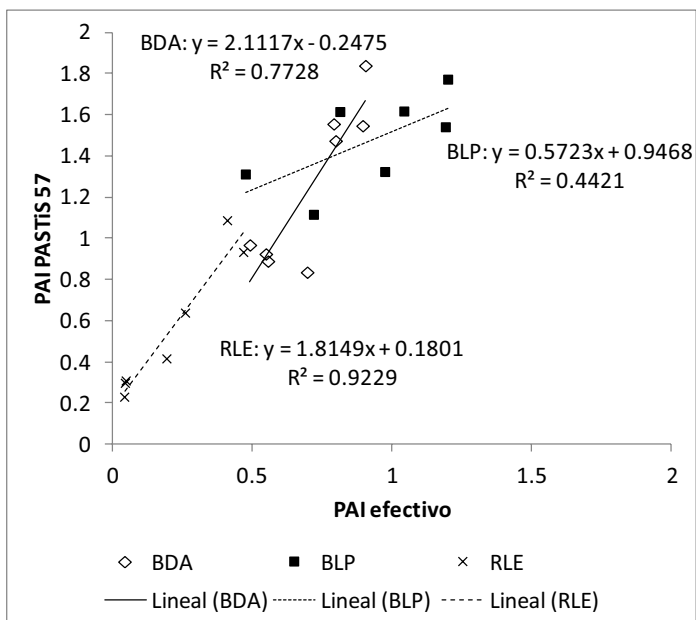
Por otra parte, Sprintsin et al. (2011) estudiaron la evolución de PAI y IAF en un bosque plantado de pino en un ambiente semiárido a lo largo de 2 años y encontraron un incremento en la proporción PAI/IAF, la cual atribuyeron al crecimiento de la parte leñosa del bosque. En el caso del bosque bajo estudio esto podría explicar que los valores de PAI al final del período estudiado no vuelvan a los niveles observados al inicio. Sin embargo esto también puede deberse a que en el período de lluvias agosto 2011 – abril 2012 cayeron casi 100 mm más que en el mismo período de la temporada anterior.

La posición relativa de PAI en los tres sitios es la misma por ambos métodos (PASTIS y fotos hemisféricas), con mayor PAI en BLP, seguido de BDA y por último RLE (Figura 10 y Figura 14). La correlación obtenida ( $R^2=0,83$ , Figura 18) es similar a las halladas comparando LAI-2000 con PASTiS en bosques de Finlandia (Lecerf et al., 2010). Sin embargo los valores promedio, máximos y mínimos obtenidos con PASTiS en todos los sitios son mayores que los estimados de PAI efectivo con las fotografías hemisféricas ( $p<0,05$ ; Figura 17), lo que se refleja en el alto componente sistemático del error cuadrático medio (Tabla 2). La diferencia más importante en la descripción de la fenología de cada sitio tiene lugar en el período de mayor PAI, entre octubre de 2011 y abril de 2012, cuando en PASTiS los bosques toman valores similares entre sí, mientras que en las fotografías hemisféricas, por el contrario, incrementan su diferencia. Esto sucede porque PAI PASTiS 57 en BDA muestra un comportamiento diferente al continuar aumentando entre enero y abril.



**Figura 18.** Valores de PAI obtenidos con PASTiS 57 y PAI efectivo con fotografías hemisféricas. Los valores mostrados de PASTiS corresponden al promedio de siete días con centro en el día del muestreo. BDA: Bosque Darvich. BLP: Bosque Los Patos. RLE: Rolado La Esperanza.

La similitud entre las estimaciones de PASTiS y de las fotografías hemisféricas es mayor en el rolado que en los sitios de bosque y entre estos últimos, en BDA que en BLP (Figura 19).

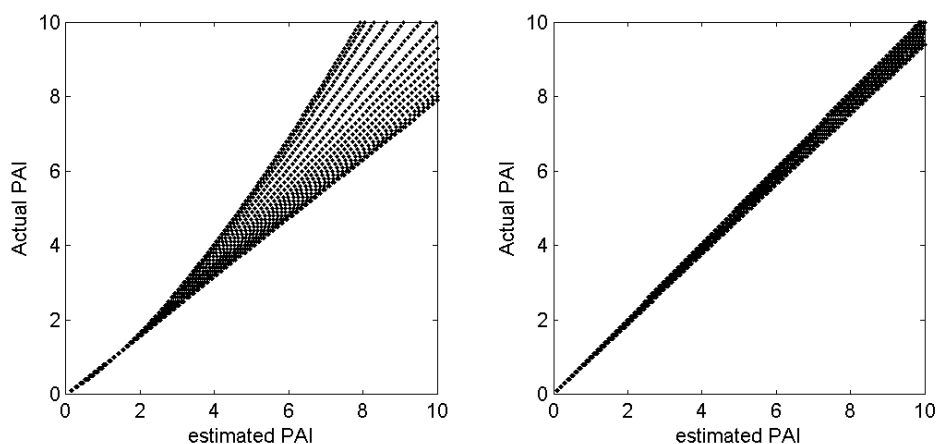


**Figura 19.** Valores de PAI obtenidos con PASTiS 57 y PAI efectivo con fotografías hemisféricas, analizados por sitio. Los valores mostrados de PASTiS corresponden al promedio de siete días con centro en el día del muestreo. BDA: Bosque Darvich. BLP: Bosque Los Patos. RLE: Rolado La Esperanza.

Baret et al. (2010) lo explican parcialmente al mostrar cómo, dado un valor estimado de PAI utilizando la metodología PASTiS, el rango de valores posibles para PAI verdadero aumenta a

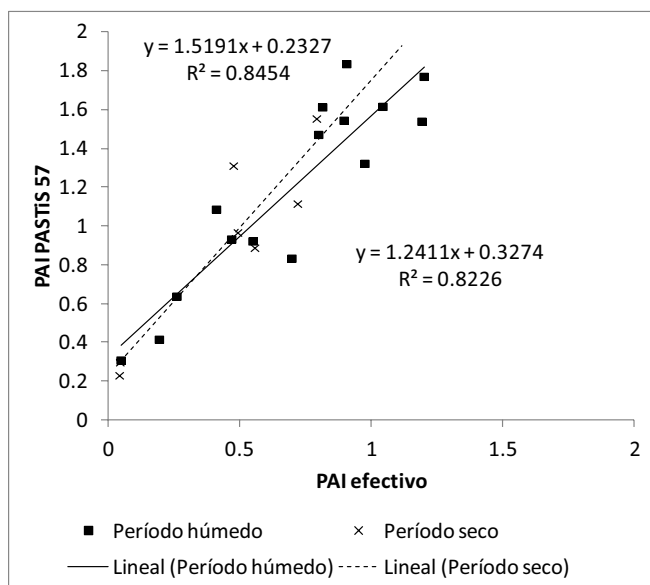


medida que crece PAI (Figura 20). En el trabajo citado (Lecerf *et al.*, 2010), al comparar resultados de LAI-2000 con PASTiS se obtuvieron correlaciones de entre 0,68 y 0,83 en sitios con valores de PAI entre 1,5 y 4,2.



**Figura 20.** Relación entre valores de PAI estimados por PASTiS y valores de PAI verdaderos utilizando toda la sensibilidad direccional de los sensores (izquierda) o utilizando la dirección  $57,5^\circ$  (derecha) (extraído de Baret *et al.*, 2010).

Sin embargo, los valores obtenidos en el trabajo actual se sitúan en la parte inferior izquierda de la figura, por lo que el motivo podría no estar tanto asociado a valores de PAI, sino a características intrínsecas de los sitios, como el aporte del componente leñoso que decrece desde BLP hasta RLE. Efectivamente, la raíz del error cuadrático medio sistemático, que constituye más de 70% del error total (Tabla 2), es similar en los sitios de bosque y más del doble que en el rolado, lo que fortalece esta hipótesis.



**Figura 21.** Valores de PAI obtenidos con PASTiS 57 y PAI efectivo con fotografías hemisféricas, analizados por período (seco y húmedo). Los valores mostrados de PASTiS corresponden al promedio de siete días con centro en el día del muestreo. BDA: Bosque Darvich. BLP: Bosque Los Patos. RLE: Rolado La Esperanza. en meses húmedos y meses secos.

**Tabla 2.** Raíz del error cuadrático medio de PAI PASTiS 57 vs. PAI efectivo.

	BDA	BLP	RLE	Total
RMSEs	0.059	0.052	0.022	0,496
RMSEu	0.005	0.004	0.001	0,203
RMSE	0.064	0.056	0.024	0,699

Las diferencias entre los métodos que podrían explicar estas discrepancias están relacionadas principalmente con (a) el campo visual y (b) el rango espectral capturado por los instrumentos utilizados. Como se explica en la sección II, las fotografías hemisféricas fueron procesadas con un círculo de interés (COI) de  $75^\circ$  en todas las direcciones de azimut, mientras que los sensores PASTiS apuntan en un azimut de  $180^\circ$  (es decir, en dirección sur) y en un ángulo cenital de  $57,5^\circ$ . El mayor campo visual de las fotografías hemisféricas brinda una mejor representatividad de la heterogeneidad del canopeo en relación a PASTiS (Figura 11 y Figura 15). Por otra parte las fotografías capturan todo el espectro visible, en tanto que los sensores PASTiS registran radiancia únicamente en el rango del azul, lo que al mejorar el contraste entre vegetación y cielo reduce la imprecisión debida a la dispersión en otras bandas del visible.

Debido a que nunca se recibe la luz solar directa y se reduce el efecto de la dispersión producida por radiancia que se refleja desde las plantas en rangos diferentes del azul, el impacto de la variación en las condiciones de iluminación sobre los sensores PASTiS es menor que sobre las fotografías hemisféricas,

Otra diferencia que podría explicar parte del error no sistemático está dada por la sensibilidad de los sensores a eventos de precipitaciones y tormentas. Debido a que están instalados permanentemente a poca distancia del suelo, las salpicaduras pueden ensuciar el fotodiodo, alterando los registros hasta la siguiente campaña, especialmente en sitios descubiertos como el rolado (García et al, en preparación).

#### IV. Conclusiones

En este trabajo se probó un nuevo instrumento, llamado PASTiS 57, para la medición continua del índice de área de planta (PAI), en un ambiente poco representado en los registros de PAI estimado con instrumentos en tierra en el mundo. El PAI derivado mediante este instrumento, mostró una evolución temporal similar al estimado con el método convencional (fotografías hemisféricas), y acompaña la evolución del IAF proveniente del producto satelital del sensor MODIS. Sin embargo, la incorporación del componente leñoso introduce una mayor discrepancia con el PAI obtenido con fotografías hemisféricas, que es el valor tomado como referencia en este trabajo.

Las discrepancias entre los dos métodos están dadas principalmente por las diferencias en el rango de detección espacial y espectral de los sensores. El siguiente paso para verificar el ajuste de PASTiS al PAI verdadero es su comparación con un método de medición directa que además permita diferenciar el componente leñoso del no leñoso.

Al incorporar el análisis de PAI real obtenido con las fotografías hemisféricas se corrobora que el impacto del agrupamiento de hojas, ramas y plantas sobre la estimación de PAI es significativo, tal como ha sido verificado con frecuencia en diferentes ambientes y para distintas especies (Gower et al., 1999, Sea et al., 2011, Sprintsin et al., 2011), pudiendo producirse subestimaciones mayores a 50% con respecto al PAI verdadero si no es tenido en cuenta. En este trabajo no se analizó PAI real proveniente de PASTiS. Sin embargo, la similitud de los valores de PAI efectivo PASTiS a PAI real obtenido con las fotografías hemisféricas parecería indicar que PASTiS efectivamente se independiza de los efectos de agrupamiento, tal como afirman Baret et al. (2010).

El sistema PASTiS muestra buenos resultados en el seguimiento de PAI, presentándose hasta el momento como la única herramienta para realizar un monitoreo continuo de esta variable en tierra, en una escala de detalle mayor que la de los sensores remotos satelitales, y requiriendo un menor esfuerzo de muestreo que el habitual con fotografías hemisféricas y otros sensores ópticos manuales. Debido a que se trata de sensores que permanecen por largos períodos de tiempo en el campo, debe tenerse especial cuidado en su diseño, instalación y mantenimiento para asegurar la fiabilidad de los registros.

El uso de esta herramienta para validar las estimaciones desde plataformas satelitales requeriría la transformación de PAI en IAF. En este trabajo no fue posible derivar IAF de CANEye®. En caso de poder estimarse una relación constante IAF/PAI para cada sitio a partir de otras técnicas como la medición directa para momentos puntuales, como se ha realizado en otros casos (Sea et al., 2011; Scholes et al., 2004), o a través de modelos alométricos, la información provista por PASTiS podría utilizarse para completar los vacíos temporales y mejorar las validaciones.

## V. Referencias

- Asner, G. P.; J. M. O. Scurlock and J. A. Hicke. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology & Biogeography* 12:191-205.
- Baret, F. 2004. A simple method to calibrate hemispherical photographs.
- Baret, F.; O. Hagolle, B. Geiger, P. Bicheron, B. Miras, M. Huc, B. Berthelot, F. Niño, M. Weiss, O. Samain, J. L. Roujean and M. Leroy. 2007. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sensing of the Environment* 110(3):275-286.
- Baret, F.; R. Lecerf, M. Mottus and M. Rautinaen. 2010. PASTiS57: Description of the system, processing of the measurements and first results. Unedited.
- Battaglia, M; M. L. Cherry, C. L. Beadle, P. J. Sandas and A. Hingston. 1998. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. *Tree Physiology* 18:521-528.
- Bonan, G. B. 2001. Importance of leaf area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests. *Remote Sensing of the Environment* 4(3):303-314.
- Borchert, R. 1994. Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. *Ecology* 75(5):1437-1449.
- Bréda, N. J. J. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 54(392):2403-2417.
- Chen, J. M. and T. A. Black, 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*, 15:421-429
- Chen J. M.. 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 80:135-163.
- Chen, J. M., P. M. Rich, S. T. Gower, J. M. Norman and S. Plummer. 1997. Leaf area index of boreal forests: theories, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 102(24):29.429-29.443.
- Chen, J. M; J. Liu, J. Cihlar and M. L. Goulden. 1999. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological Modelling* 124:99-119.
- Chen, J. M.; C. H. Menges and S. G. Leblanc. 2005. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data. *Remote Sensing of Environment* 97:447-457.
- Demarez, V.; S. Duthoit, F. Baret, M. Weiss and G. Dedieu. 2007. Estimation of leaf area and clumping indices of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 148:644-655.
- Duchemin, B.; R. Hadria, S. Erraki, G. Boulet, P. Maisongrande, A. Chehbouni, R. Escadafal, J. Ezzahar, J.C.B. Hoedjes, M.H. Kharrou, S. Khabba, B. Mougenot, A. Olioso, J. C. Rodriguez, V. Simonneaux. 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management* 79:1-27
- Echeverria, J. C. y J. D. Giulietti. 2006. Precipitación media anual. En *Aptitud forestal de la provincia de San Luis*. Editores: Echeverria, J. C, E. G. Jobbágy y L. Collado.

- Eklundh, L.; L. Harrie and A. Kuusk. 2001. Investigating relationships between Landsat ETM+ sensor data and leaf area index in a boreal conifer forest. *Remote Sensing of Environment* 78:239-251.
- Fensholt, R., I. Sandholt and M. Schultz Rasmussen. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing and the Environment* 91:490–507.
- Foley, J. A., S. Levis, I. Colin Prentice, D. Pollard and S. L. Thompson. 1998. Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology* 4:561-579.
- Gamon, J. A.; C. B. Field, M. L. Goulden, K. L. Griffin, A. E. Hartley, G. Joel, J. Peñuelas and R. Valentini. 1995. Relationships between NDVI, canopy structure and photosynthesis In three Californian vegetation types. *Ecological Applications* 5(1):28-41.
- Garay, J. A. y J. H. Veneciano. 2005. La agricultura de cosecha en San Luis. *Información Técnica* N°170, 16 pág. EEA INTA San Luis.
- García, A.; C. M. Di Bella, M. E. Beget, M. Weiss, F. Baret, D. Raymaekers and C. Llavallol. Unedited. Assessment of Plant Area Index retrievals using a novel autonomous ground system over a South American dry forest.
- Garrigues, S., R. Lacaze, F. Baret, J. T. Morisette, M. Weiss, J. E. Nickeson, R. Fernandes, S. Plummer, N. V. Shabanov, R. B. Myneni, Y. Kyazikhin and W. Yang. 2008. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research* 113.
- Garrigues, S.; N. V. Shabanov, K. Swanson, J. T. Morisette, F. Baret, R. B. Myneni. 2008b. Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. *Agricultural and Forest Meteorology* 148:1193-1209.
- Gessner, U.; M. Niklaus, C. Kuenzer and S. Dech. 2013. Intercomparison of Leaf Area Index products for a gradient of sub-humid to arid environments in West Africa. *Remote Sensing* 5:1235-1257.
- Gower, S. T.; C. J. Kucharik and J. M. Norman. 1999. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, fAPAR, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. *Remote Sensing of the Environment* 70:29-51.
- Jonckheere, I; S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muysa, P. Coppin, M. Weiss, F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121:19–35.
- Kalácska, M.; J. C. Calvo-Alvarado and G. A. Sánchez-Azofeifa. 2005. Calibration and assessment of seasonal changes in leaf area index of a tropical dry forest in different stages of succession. *Tree Physiology* 25:733-744.
- Kalácska, M.; G. A. Sánchez-Azofeifa, J. C. Calvo-Alvarado, B. Rivard and M. Quesada. 2005b. Effects of season and successional stage on leaf area index and spectral vegetation indices in three mesoamerican tropical dry forests. *Biotropica* 37(4):486-496.
- Knyazikhin, Y.; J. V. Martonchik, R. B. Myneni, D. J. Diner and S. W. Running. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research* 103(24):32,257-32,276.

- Y. Knyazikhin, J. Glassy, J. L. Privette, Y. Tian, A. Lotsch, Y. Zhang, Y. Wang, J. T. Morisette, P. Votava, R. B. Myneni, R. R. Nemani, S. W. Running. 1999. MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis Document, <http://eospsso.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>, 130 pp.
- Lecerf, R.; F. Baret, J-F Hanocq, O. Marloie, M. Rautiainen, M. Möttöus, J. Heiskanen and P. Steinberg. 2010. PASTiS 57: Autonomous light sensors for PAI continuous monitoring. Principles, calibration and application to vegetation phenology. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco 17th December 2010.
- Marchesini, V. 2009. Cambios en el uso de la tierra y el balance de agua en ecosistemas semiáridos: el desmonte selectivo en el Chaco árido analizado a diferentes escalas espaciales. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. 188 pág.
- Miles, L.; A. C. Newton, R. S De Fries, C. Ravilious, I. May, S. Blyth, V. Kapos and J. E. Gordon. 2006. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography* 33(3):491-505.
- Murphy, P. G. y A. E. Lugo. 1986. Ecology of Tropical Dry Forest. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17:67-88.
- Myneni, R. B.; R. R. Nemani and S. W. Running. 1997a. Algorithm for the estimation of global land cover, LAI and FPAR based on radiative transfer models. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, 35: 1380-1393
- Myneni, R. B.; R. N. Ramakrishna and S. W. Running. 1997b. Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed PAR using Radiative Transfer Models. *IEEE Transactions of Bioscience and Remote Sensing* 35(6):1380-1393.
- Nilson, T. 1999. Inversion of gap frequency data in forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99:437-448.
- Olivas, P. C.; S. F. Oberbauer, D. B. Clark, M. G. Ryan, J. J. O'Brien, H. Ordoñez. 2013. Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology* 117:110-116.
- Pauwels, V. R. N., N. E. C. Verhoest, G. J. M. De Lannoy, V. Guissard, C. Lucau, and P. Defourny. 2007. Optimization of a coupled hydrology – crop growth model through the assimilation of observed soil moisture and leaf area index values using an ensemble Kalman filter. *Water Resources Research* Volume 43:1-17.
- Pontailier, J., G. J. Hymus and B. G. Drake. 2003. Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(3):381-387.
- Pisek, J. and J. M. Chen. 2006. Comparison and validation of MODIS and VEGETATION global LAI products over four BigFoot sites in North America. *Remote Sensing of Environment* 109:81–94
- Ratana, P.; A. Huete, T Miura, K. Didan, L. Ferreira, E. Sano. 2003. Characterization of biophysical vegetation - soil dynamics along an eco-climatic brazilian transect with MODIS vegetation indices. *Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 1433-1437.*

- Running, S. W. y J. C. Coughlan. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42:125-154.
- Ryu, Y.; J. Verfaillie, C. Macfarlane, H. Kobayashi, O. Sonnentag, R. Vargas, S. Ma and D. D. Baldocchi. 2012. Continuous observation of tree leaf area index at ecosystem scale using upward-pointing digital cameras. *Remote Sensing of Environment* 126:116-125.
- Scholes, R.J., Frost, P.G.H. and Tian, Y. 2004. Canopy structure in savannas along a moisture gradient on Kalahari sands. *Global Change Biology* 10 (3):292–302.
- Scott, R. L.; T. E. Huxman, D. G. Williams and D. C. Goodrich. 2006. Ecohydrological impacts of woody-plant encroachment: seasonal patterns of water and carbon dioxide exchange within a semiarid riparian environment. *Global Change Biology* 12:311-324,
- Scurlock, J. M. O.; G. P. Asner and S. T. Gower. 2001. Worldwide Historical Estimates of Leaf Area Index, 1932-2000. Oak Ridge National Laboratory, 40 pp.
- Sea, W. B.; P. Choler, J. Beringer, R. A. Weinmann, L. B. Hutley and R. Leuning. 2011. Documenting improvement in leaf area index estimates from MODIS using hemispherical photos for Australian savannas. *Agricultural and Forest Meteorology* 151 (2011) 1453-1461
- Sprintsin, M.; S. Cohen, K. Maseyk, E. Rotenbert, J. Grünzweig, A. Karnieli, P. Berliner and D. Yakir. 2011. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation. *Agricultural and Forest Meteorology* 151:565-574.
- Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal. 2007. Informe sobre deforestación en Argentina. Dirección de Bosques, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 10 pág.
- Van Gardingen, P. R.; G. E. Jackson, S. Hernandez-Daumas, G. Russell and L. Sharp. 1999. Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 94:243-257.
- Villagra, P. 2000. Aspectos ecológicos de los algarrobales argentines. *Multequina* 9(2):35-51.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J. and Jonckheere, I., 2004. Methods for in situ leaf area index measurement, part II: from gap fraction to leaf area index: retrieval methods and sampling strategies. *Agric. For. Meteorol.*, 121: 17-53.
- Weiss, M.; F. Baret, S. Garrigues, R. Lacaze. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment* 110(3):317-331.
- Weiss, M., F. Baret. 2010. CAN-Eye V6.1 User Manual. INRA, 47 pp.
- White, M. A.; G. P. Asner, R. R. Nemani, J. L. Privette and S. W. Running. 1999. Measuring Fractional Cover and Leaf Area Index in Arid Ecosystems: Digital Camera, Radiation Transmittance, and Laser Altimetry Methods. NASA Publications, paper 23.
- Willmott, J. C. 1981. On the Validation of Models. *Physical Geography* 2(2):184-194.
- Yang, W.; B. Tan, D. Huang, M. Rautiainen, N. V. Shabanov, Y. Wang, J. L. Privette, K. F. Huemmrich, R. Fensholt, I. Sandholt, M. Weiss, D. E. Ahl, S. T. Gower, R. R. Nemani, Y. Knyazikhin and R. B. Myneni. 2006. MODIS Leaf Area Index Products: From Validation to Algorithm Improvement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44(7): 1885-1898.
- Zhang, Y.; J. M. Chen and J. R. Miller. 2005. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation *Agricultural and Forest Meteorology* 133:166-181.