

Relación Entre el Índice de Área Foliar y el Índice Normalizado de Vegetación en el Bosque Húmedo Tropical de Panamá, en Gamboa

Dafni Y. Mora G.

Facultad de Ingeniería Mecánica,
Universidad Tecnológica de Panamá
dafni.mora@utp.ac.pa

José Ulises Jiménez

Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas,
Universidad Tecnológica de Panamá
ulises.jimenez@utp.ac.pa

José Fábrega

Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas,
Universidad Tecnológica de Panamá
jose.fabrega@utp.ac.pa

Resumen— El índice de área foliar (LAI) es una variable útil para describir la productividad y dinámica de los ecosistemas forestales además de un indicador de la salud y desarrollo del dosel. Se han realizado pocos estudios de esta variable en regiones de bosque húmedo tropical (Bh-T). En este proyecto se desarrolló un modelo empírico para estimar el LAI en el Bh-T, a través de imágenes satelitales y se realizó su validación mediante el desarrollo de campañas de medición con metodología óptica indirecta utilizando el Ceptómetro AccuPAR LP-80. Se utilizaron imágenes de alta resolución del satélite WorldView-2 y Quickbird. Este estudio fue de tipo correlacional, relacionando las variables LAI y el Índice normalizado de vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés). En estudios previos, se ha demostrado la correlación que existe entre ambos. Los programas Erdas Imagine y Atcor fueron empleados para el análisis de imágenes satelitales y la obtención del NDVI. Las mediciones de campo se desarrollaron en el “Camino del Oleoducto”,

en el Área de Avifauna (Gamboa), en donde se ubicaron los puntos de control. Mediciones adicionales fueron tomadas en las parcelas del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI) ubicadas en la Isla de Barro Colorado y en el Parque Nacional Soberanía. El empleo de diferentes sitios permitió estudiar el comportamiento espacial del LAI. Las correlaciones resultantes entre las variables LAI-NDVI para los diferentes conjuntos de datos, presentaron correlaciones positivas de moderadas a bajas. Se utilizó el error cuadrado medio para hacer las comparaciones entre modelos.

Palabras Claves— Ceptómetro, índice de área foliar, Gamboa, NDVI, WorldView-2

Abstract— Leaf area index (LAI) is a useful variable for characterizing the dynamics and productivity of forest ecosystems. Also, it is an indicator of canopy health and development. There have been few studies of this variable for

regions of tropical rainforest (TRF). In this project, it was developed an empirical model to estimate LAI in the TRF using satellite image. Their validation was performed by developing indirect measurement campaigns using optical methods Ceptometer AccuPAR LP-80. High resolution images WorldView-2 and Quickbird satellites were employed. A correlational research was done, relating variables such as LAI and normalized vegetation index (NDVI). Previous studies have shown a correlation between both of them. Erdas Imagine and Atcor software were used to analyze satellite images and to obtain the NDVI. Field campaigns were performed in the Pipeline Road on the Avifauna area (Gamboa), where the control points were located. Additional measurements were taken at plots of the Smithsonian Tropical Research Institute (STRI), located in the Barro Colorado island and the Sovereignty National Park. The employment of different sites allowed to study LAI spatial behavior. The resultant correlations between variables LAI-NDVI for different datasets showed moderately to low positive correlations. The mean squared error is used to make comparisons between models.

Keywords— Ceptometer, leaf area index, Gamboa, NDVI, WorldView-2

Autor: Dafni Mora

Tipo de artículo: original

Fecha de recepción: 26 de febrero de 2014

Fecha de aceptación: 27 de mayo de 2014

1. Introducción

El cambio climático y su efecto en los ecosistemas terrestres es un tema de gran actualidad, cuyas repercusiones son difíciles de medir debido a la escala global del problema. Igualmente, la falta de estudios en los trópicos y las grandes reservas de biodiversidad existente en éstos, hace que este tema sea particularmente relevante para nuestro país.

Con los avances tecnológicos a nivel computacional y el desarrollo en las telecomunicaciones, las técnicas de teledetección están siendo utilizadas para múltiples aplicaciones, entre ellas, la caracterización de parámetros ecológicos. Es aquí en donde el uso de algoritmos y correlaciones que permitan relacionar las interacciones del espectro electromagnético y las coberturas vegetales, mediante el uso de

imágenes satelitales adquiere relevancia científica importante, sobre todo, por la falta de estudios en el tema para los trópicos [1].

Los espectros únicos de reflectancia que poseen las coberturas vegetales permiten determinar aspectos como cambios en el uso de suelo o en la actividad fotosintética de estas. Estos comportamientos no se presentan de manera aislada en la naturaleza. No es una sola hoja la monitoreada, sino masas vegetales. En este sentido, el grado de influencia del suelo (proporción de hojas-suelo) es un parámetro importante que afecta la observación del sensor, la cual se estima en función del área de cobertura verde de suelo. Es aquí en donde el cálculo del índice de área foliar (LAI) cobra relevancia, dado que relaciona el área de cobertura de suelo de manera directa [2].

De igual manera, la dinámica de cambio en la productividad y los impactos climáticos en los ecosistemas forestales, pueden monitorearse mediante el LAI [3]. Este trabajo busca cuantificar y validar la correlación entre el LAI y el índice normalizado de vegetación (NDVI) para un bosque tropical húmedo en Gamboa, Panamá, considerando la variabilidad temporal y espacial, usando técnicas de teledetección y medidas experimentales.

1.1 Índice de área foliar

El LAI es una variable adimensional (m^2/m^2) definida por Watson [4] como el área total de una cara del tejido fotosintético por unidad de área de superficie. Es aceptable en especies con hoja ancha, ya que ambas caras de la hoja tienen la misma superficie.

El LAI puede ser utilizado para diferentes propósitos, tales como indicador de la salud o desarrollo del dosel y por lo tanto, es considerado útil en el monitoreo de programas de compensación por servicios ecosistémicos [5, 6], también es apropiado para monitorear el crecimiento de la vegetación, actividad fisiológica y establecer los

regímenes de radiación solar en cubiertas vegetales.

El LAI se ha relacionado más recientemente con variables físicas tales como precipitación [7], lo cual nos ayuda a comprender mejor el comportamiento de nuestro ecosistema.

Se han propuesto diferentes definiciones del LAI, en función de su uso. De aquí, la necesidad de establecer una definición común y aceptable del LAI, que permita hacer comparaciones confiables de los resultados obtenidos [3]. Este artículo usó la definición conocida como LAI efectivo o índice de área de planta (PAI) [8], que es un tipo de definición por proyección, y representa lo que realmente se mide con la instrumentación óptica, ya que no se puede distinguir entre hojas o tejidos fotosintéticamente activos y otros elementos tales como ramas, lianas, troncos, frutos, flores ni tallos.

Actualmente, no existe un estándar universal para la medición del LAI [1]. Cualquier método usado implica tiempo y resultados imprecisos [9]. Sin embargo, existen diferentes metodologías propuestas para la estimación de este parámetro, las cuales pueden subdividirse en dos grandes categorías: Métodos directos y métodos indirectos [10, 11]. Los primeros miden el área foliar propiamente sobre el material, mientras que los segundos derivan el área foliar de parámetros más fácilmente medibles.

Para este trabajo se utilizó una metodología indirecta de campo, utilizando un ceptómetro modelo AccuPAR LP80 [12]. Esta metodología se explica en la sección de materiales y métodos.

1.2 Índice normalizado de vegetación

Una forma de homogenizar criterios a la hora de exponer resultados propios de una masa vegetal frente a la radiación incidente, es la utilización de los llamados índices espectrales de vegetación (IEV, SVIs por sus siglas en inglés), los mismos fueron creados con la finalidad de darle un significado físico a los valores de reflectancia que se pueden extraer de las imágenes y poder correlacionarlos

con otras variables tales como humedad del suelo, cantidad de clorofila en la hoja [13], cantidad de agua recibida por el dosel [14] y el índice de área foliar [15], que es nuestro parámetro de estudio en esta investigación.

Uno de los SVIs más empleados para el análisis de la vegetación a escala continental, es el índice normalizado de vegetación (NDVI), el cual fue definido por Rouse [16]. Tiene como referencia el comportamiento espectral teórico de las cubiertas vegetales, que se basan en el contraste entre las reflectividades de las bandas del rojo R (ρ_R) e infrarrojo cercano IRC (ρ_{IRC}) del espectro.

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R} \quad (1)$$

El NDVI, ha sido ampliamente utilizado en estudios globales de seguimiento y evaluación de la dinámica vegetal, gracias a su facilidad de cálculo e interpretación [17].

1.3 Modelo empírico que relaciona LAI y NDVI

Existen grandes esfuerzos a nivel internacional por validar en sitio este parámetro por medio de teledetección. Así tenemos el CEOS (Comité de Satélites de Observación Terrestre) y VALERI (en Europa). También algunos investigadores han sugerido la necesidad de validar estos datos generados a macro escala [1].

Existen estudios previos en donde se han relacionado las variables NDVI y el LAI, obteniendo modelos lineales, con diferentes valores del parámetro de coeficiente de correlación (R^2) tales como 0.63 [18], 0.56 [19] ó 0.45 [20], en donde esta última se dio con una correlación negativa entre estos parámetros al utilizar imágenes de alta resolución.

Algunas otras correlaciones fueron desarrolladas específicamente para regiones de bosques tropicales, utilizando imágenes del sensor LANDSAT y algunos

últimos estudios han utilizado imágenes de alta resolución, como las usadas en este trabajo. El modelo de Ureña [21] fue desarrollado en la localidad de Bh-T de Gamboa con imágenes de alta resolución. El modelo de Ibrahim [22] fue desarrollado con imágenes LANDSAT para bosques tropicales, finalmente el modelo para bosques tropicales desarrollado por Pierce [23] generó una ecuación para estimar el LAI en bosques tropicales latifoliados utilizando imágenes TIROS-NOAA (AVHRR, Radiómetro avanzado de muy alta resolución). Pierce [23] estimó el LAI mediante una metodología directa, con un planímetro electrónico. Cada una de estas correlaciones se presenta en la tabla 1.

2. Materiales y métodos

La metodología utilizada para esta investigación consistió en un diseño No experimental de tipo transversal. El estudio es de tipo correlacional, relacionando las variables LAI y el NDVI.

Tabla 1. Correlaciones propuestas para bosques tropicales.

Correlación	R ²	Fuente
$LAI = 10.13NDVI - 0.52$	$R^2 = 0.79$	[21]
$LAI = 12.74NDVI + 1.34$	$R^2 = 0.74$	[22]
$LAI = \left(\frac{NDVI}{0.26}\right)^2$	$R^2 = 0.93$	[23]

2.1 Área de estudio

Este estudio se efectuó en una región de Bosque húmedo tropical (Bh-T), dentro de la comunidad de Gamboa, corregimiento de Cristóbal, distrito y provincia de Colón, Panamá. Las mediciones de campo se realizaron en cuatro sitios de muestreo: camino del Oleoducto (Avifauna); Isla Barro Colorado y los Senderos de El Charco y Espíritu del Bosque dentro del Parque Nacional Soberanía.

2.1.1 Camino del Oleoducto (Avifauna)

Está ubicado a 25 kms de la ciudad de Panamá, en la entrada del Sendero Camino del Oleoducto (Pipeline Road), comunidad de Gamboa, corregimiento de Cristóbal, distrito y provincia de

Colón, Panamá. Coordenadas geográficas 08°42'59" a 08°54'3" latitud norte y 81°47'60" a 81°52'56" longitud oeste.



Figura 1. Localización del área de estudio: camino del Oleoducto, Isla Barro Colorado y Parque Nacional Soberanía. Imagen Google Earth.

2.1.2 Isla Barro Colorado, Sendero El Charco y Sendero Espíritu del Bosque

El segundo sitio de estudio fue la Isla Barro Colorado, ubicada en el Canal de Panamá a 30 kms de la ciudad de Panamá. Esta isla fue declarada reserva en 1923 y ha sido administrada por el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI por sus siglas en inglés) desde 1946. Coordenadas geográficas 09°09'0" latitud norte y 79°50'60" longitud oeste. Con una extensión de 1500 hectáreas, es la isla más grande del lago Gatún.

El tercer sitio de estudio fue el sendero de El Charco, en el Parque Nacional Soberanía, ubicado a 27 km de la ciudad de Panamá, comunidad de Gamboa, corregimiento de Cristóbal, distrito y provincia de Colón. Coordenadas geográficas 09°05'02.6" latitud norte y 79°39'48.2" longitud oeste. Finalmente, se realizaron mediciones dentro del sendero Espíritu del Bosque, también dentro del Parque Nacional Soberanía, en el sendero ubicado en la entrada del Parque Municipal Summit. Coordenadas geográficas 09°03'43.0" latitud norte y 79°38'21.8" longitud oeste.

2.2 Descripción del sitio

De acuerdo al mapa de vegetación de la ANAM (2000) estas regiones corresponden a un Bosque Tropical Semicaduceo de tierras bajas y según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1972) caen en la categoría de Bosque húmedo tropical (Bh-T), caracterizada por recibir precipitaciones entre 2000 y 3000 milímetros, temperaturas entre 24 y 27°C de promedios anuales y humedad relativa de $\pm 80\%$ [24].

En el Camino del Oleoducto se estableció una parcela de una hectárea, este sitio mantiene las mismas características físicas del Parque Nacional Soberanía.

En la Isla de Barro Colorado, la campaña de medición se hizo en una parcela permanente de cincuenta hectáreas, la cual es un rectángulo de 1000 metros de largo por 500 metros de ancho localizada en la meseta central de la isla. Esta parcela pertenece al STRI y al Centro de Ciencias Forestales del Trópico (CTFS) [25, 27] y toda la descripción del clima, flora y fauna de la isla fue presentada en la publicación *Tropical Forest Ecology: A view from Barro Colorado Island* [28]. Dentro de estas 50 hectáreas, se seleccionaron 5 subparcelas de una hectárea cada una, las cuales se denominaron BC1, BC2, BC3, BC4 y BC5 (figura 2).

Las mismas fueron seleccionadas buscando la cercanía de áreas con claros disponibles, para la correcta utilización del ceptómetro.

En el Parque nacional Soberanía se realizaron mediciones en dos parcelas de una hectárea cada una, dichas parcelas fueron reinventariadas por parte del CTFS en octubre de 2010. La primera corresponde al sendero El Charco, el cual tiene una extensión aproximada de 0.8 km de largo. La publicación "Un recorrido por el Sendero El Charco" [29], describe alguna de las plantas y palmas llamativas de este sendero. La segunda parcela está ubicada en El Sendero Espíritu del Bosque y tiene una extensión de 1.7 km, la cual puede recorrerse de manera autoguiada.

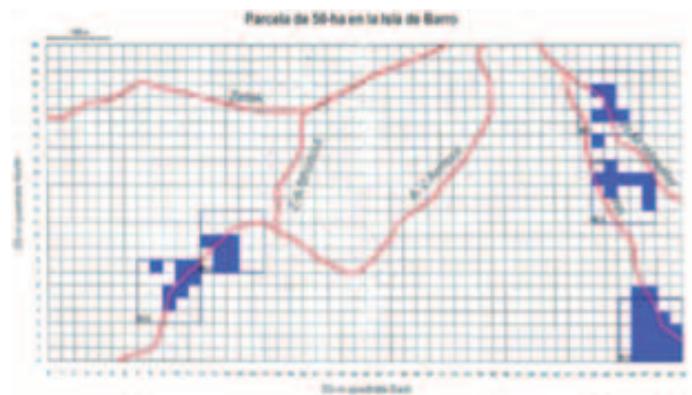


Figura 2. Ubicación de cinco subparcelas en BCI, identificadas como BC1, BC2, BC3, BC4 y BC5.

Para describir el sitio de estudio localizado en Camino del Oleoducto, se realizó un inventario florístico de los árboles con diámetro a la altura del pecho (medida del diámetro del tronco principal tomada a una altura de 1.30 metros desde el nivel del suelo o base del árbol) $dap \geq 10$ cm, en una parcela permanente de 40m x 40 m.

Para caracterizar el resto de los sitios de muestreo, en cuanto a composición, diversidad y estructura horizontal de la comunidad vegetal, se realizaron cálculos de los siguientes indicadores ecológicos: valor de dominancia, valor de abundancia y el Índice de Valor de Importancia (I.V.I.). El I.V.I. formulado por Curtis & Mc Intosh, fue usado en este trabajo, debido a que es uno de los instrumentos más conocidos para evaluar la estructura horizontal de los bosques. El I.V.I. se calcula para cada especie a partir de la suma de la frecuencia relativa, la abundancia relativa y la dominancia relativa. Con este índice es posible comparar, el peso ecológico de cada especie dentro del ecosistema. La metodología se encuentra en [30]. Fueron utilizados los registros de los últimos inventarios realizados por CTFS [25]–[27].

En la tabla 2, tabla 3 y tabla 4 se encuentran listadas de mayor a menor, las tres primeras especies con mayor I.V.I. de cada una de las parcelas de camino del Oleoducto (calculada con los valores de abundancia relativa y dominancia), Isla Barro Colorado y del Parque

Nacional Soberanía (calculada con los valores de frecuencia relativa, abundancia relativa y dominancia relativa), respectivamente. Todos los cálculos del I.V.I. fueron ajustados al 100%.

Tabla 2. Especies con mayor valor de importancia: parcela de Avifauna.

Avifauna	I.V.I.
<i>Anacardium excelsum</i> (espavé)	14.30
<i>Astrocaryum standleyanum</i> (palma negra)	8.94
<i>Luehea speciosa</i> (guácimo blanco)	8.69
Subtotal/100	31.93

Con estos resultados se puede concluir que a pesar de ser regiones de Bh-T, las mismas difieren tanto en estructura horizontal, estructura vertical, composición, abundancia y dominancia. Este resultado resalta la importancia de la correcta caracterización de las parcelas de estudios y la necesidad de imágenes de cada estación, para la debida validación de los datos.

2.3 Uso del PAR para la determinación de LAI

Utilizando el método indirecto de Ceptometría se mide la radiación fotosintéticamente activa (PAR), que es una combinación de la radiación transmitida a través del dosel y la dispersada por las hojas. Fue utilizado un ceptómetro AccuPAR LP-80 [12] para estimar el LAI en las parcelas estudiadas. El mismo es un sensor lineal cuántico que incorpora 80 fotosensores los cuales miden el PAR que se encuentra en el rango de 400 y 700 nm de longitud de onda. La ecuación específica usada por este equipo para determinar el LAI se basa en el modelo de Norman y Jarvis según (2).

$$LAI = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K} \right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0.47f_b)} \quad (2)$$

Las lecturas tomadas debajo y sobre el dosel fueron usadas para calcular el radio PAR, tau (τ), que es la razón de estas dos medidas; el coeficiente de extinción (K) es determinado automáticamente por el LP80 usando la latitud, longitud, fecha y hora del día para calcular el ángulo cenit (Θ).

$$K = \frac{1}{2\cos\theta} \quad (3)$$

El cálculo del coeficiente de extinción asume una distribución de las hojas esférica. La fracción del haz de radiación (f_b) es el radio entre el haz proveniente directamente del sol y el proveniente de todas las fuentes ambientales como la atmósfera y las otras superficies reflectantes, calculado para la hora solar y cenit de la medición. La constante A es determinada por el instrumento sobre la base de la distribución de las hojas y las cualidades de absorbanza de las hojas en el dosel.

2.4 Mediciones experimentales del LAI

2.4.1 Camino Oleoducto (Avifauna)

Durante la estación seca de 2012 se inició la campaña de mediciones, en la región de camino de Oleoducto (Avifauna), se estableció de manera aleatoria una parcela con un perímetro de 100m x 100m (10,000 m²) que representa una hectárea, esta parcela fue orientada con el norte magnético.

Dentro de este perímetro se ubicaron los puntos de control cada 20 metros. Luego se establecieron 4 transectos de 20m x 20m en donde se realizaron 7 medidas en cada uno. Para delimitar la parcela y seguir los rumbos, así como para georeferenciar los puntos de control se utilizó un receptor GPS Garmin Montana 650st. Para medir distancias se utilizó cinta métrica de 60 metros convencional. Cada punto de control fue identificado con tubos de pvc de 1/2" cortados en tramos de 0.75 cm y se les colocó cinta roja y su respectiva numeración.

Para escoger la parcela, se tomó en cuenta los requerimientos del equipo AccuPAR Modelo LP-80, para mediciones en bosques, debido a que se requiere el valor de la radiación PAR sobre el dosel (valor tomado en un alto o una torre), para el cálculo del radio PAR Tau (τ), se seleccionaron los puntos de control de manera que se pudiera medir el valor de radiación PAR sobre el dosel para cada una de las mediciones del PAR bajo el dosel. Este procedimiento se realizó debido a las características propias del bosque húmedo tropical, en lo que se refiere al dosel cerrado, con pocos claros disponibles para las mediciones del PAR sobre el dosel.

Tabla 3. Especies con mayor valor de importancia: parcelas de la Isla Barro Colorado.

Parcelas Isla Barro Colorado									
BC1		BC2		BC3		BC4		BC5	
Especie	I.V.I.	Especie	I.V.I.	Especie	I.V.I.	Especie	I.V.I.	Especie	I.V.I.
<i>Poulsenia armata</i> (cucúa)	9.96	<i>Oenocarpus mapora</i> (maquenque)	6.32	<i>Poulsenia armata</i> (cucúa)	9.78	<i>Prioria copaifera</i> (cativo)	14.21	<i>Prioria copaifera</i> (cativo)	10.69
<i>Beilschmiedia pendula</i> (aguacatillo)	7.45	<i>Alseis blackiana</i> (mameicillo)	6.02	<i>Hirtella triandra</i> (camaroncillo)	9.36	<i>Trichilia tuberculata</i> (alfajia)	9.46	<i>Faramea occidentalis</i> (huesito)	6.11
<i>Quararibea asterolepis</i> (Guayabillo)	6.76	<i>Drypetes standleyi</i> (madroño)	5.12	<i>Quararibea asterolepis</i> (Guayabillo)	8.06	<i>Faramea occidentalis</i> (huesito)	7.15	<i>Alseis blackiana</i> (mameicillo)	4.75
Subtotal/100	24.16		17.46		27.20		30.81		21.55

Tabla 4. Especies con mayor valor de importancia: parcelas del Parque Nacional Soberanía.

Parcelas del Parque Nacional Soberanía			
Sendero El Charco		Sendero El Espíritu del Bosque	
Especie	I.V.I.	Especie	I.V.I.
<i>Anacardium excelsum</i> (espavé)	16.50	<i>Amaioua corymbosa</i> (madroño)	40.59
<i>Attalea butyracea</i> (palma real)	6.80	<i>Enterolobium schomburgkii</i> (corotú de montaña)	21.58
<i>Gustavia superba</i> (membrillo)	6.36	<i>Heriottella fascicularis</i>	3.60
Subtotal /100	29.66		65.76

Luego se fijaron los parámetros iniciales del modelo experimental que utiliza el equipo, con los datos que corresponden a la ubicación geográfica, hora/fecha, región UTM y distribución de hojas. Otro aspecto importante para la calidad de nuestros datos depende de las condiciones de luz al momento de la toma de las medidas. Se debe procurar realizar el muestreo en días con poca presencia de nubes; según el fabricante se requiere como mínimo un valor de 85% de la fracción del haz de radiación (fb), que no es posible obtener en días nublados. De igual manera para garantizar la máxima precisión, todas las lecturas fueron tomadas en luz directa del sol durante las horas picos de radiación solar, entre las 10:00 a.m. y 1:00 p.m. En cada punto de control se tomaron 20 lecturas del PAR por encima del dosel y 20 lecturas del PAR por debajo del dosel, que luego fueron promediadas, para la estimación del LAI.

2.4.2 Isla Barro Colorado, Sendero El Charco y Sendero Espíritu del Bosque

En estos sitios experimentales, a diferencia del área de Camino del Oleoducto, ya se contaba con parcelas de estudio permanentes, debidamente inventariadas, en las cuales el STRI y el CTFS [25, 27] realizan estudios desde hace varias décadas. Una vez ubicadas geográficamente estas parcelas en campo, se identificaron los sitios con claros cercanos, de manera de cumplir con los requerimientos del ceptómetro y poder realizar las mediciones del PAR por encima del dosel; luego se realizaron mediciones aleatorias alrededor de cada uno de estos sitios de claro. Al menos una lectura debe ser tomada debajo y sobre el dosel para poder estimar el LAI.

Dentro de las limitaciones presentadas al momento de evaluar el parámetro LAI en la estación lluviosa, fue la poca disponibilidad de días soleados

en este período (requisito necesario para el uso de la ceptometría). El área de bosque húmedo tropical se caracteriza por abundancia de lluvias. Se realizaron varias visitas a los sitios de mediciones durante la estación lluviosa, pero fue poca la información que pudimos obtener durante este período. Luego se realizaron mediciones en la estación seca, teniendo más acceso a datos de campo, debido a la existencia de días soleados.

Según el procedimiento estándar establecido por el CEOS y el VALERI para el muestreo de áreas de bosque, se debe establecer los puntos de muestreo como lo indica la figura 3.

Esto se relaciona directamente con la resolución espacial de las imágenes con las cuales se esté trabajando. En un inicio la mayoría de los trabajos fueron realizados con imágenes Landsat, con una resolución espacial de 30 metros, por lo que se establecieron estos protocolos para garantizar homogeneidad en los procedimientos de validación y resultados en escalas similares. Sin embargo, recientemente por el incremento en el uso de satélites de alta resolución espacial, como los usados en esta investigación, se pueden tomar medidas individuales, ya que con un rango de tamaño de píxeles entre 2 a 5 metros, las mediciones no necesitan promediarse, para llegar a la escala de los píxeles de las imágenes Landsat, por ejemplo.

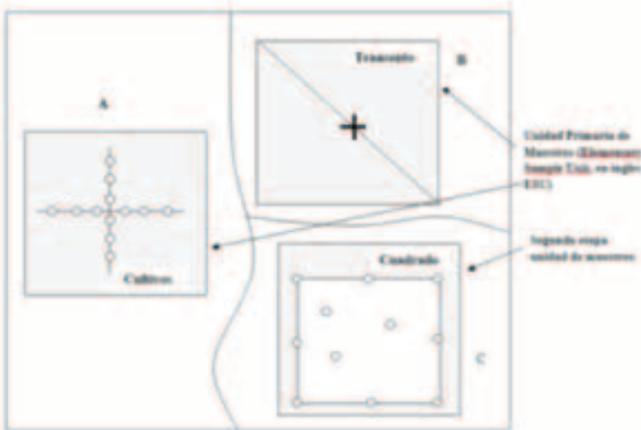


Figura 3. Especificación del diseño de muestreo dependiendo de la clase de cobertura terrestre y del dispositivo de medición. Diseño A corresponde a cultivos bajos y pastizales. Diseño B utilizado en transectos para el instrumento TRAC y el diseño C es para bosques [31].

2.5 Imágenes Satelitales

Las imágenes usadas fueron capturadas a través de sensores de satélites comerciales de alta resolución. La tabla 5 enumera algunas características importantes de cada una de las imágenes. Estos sensores fueron escogidos debido a sus características y alta capacidad de recoger imágenes pancromáticas y multiespectrales de alta resolución espacial. Además del amplio rango de las bandas espectrales, que permite mayor capacidad de discriminación sobre la cobertura del suelo [32].

La disponibilidad de la banda infrarroja es muy útil en términos de estudios relacionados con la vegetación, debido a su sensibilidad hacia la química de la vegetación y su composición física.

Tabla 5. Imágenes satelitales utilizadas.

Características	Sensores		
	World View-2	RapidEye	Quickbird
Fecha de adquisición	26/01/2012	03/01/2012	14/05/2008
Cantidad de bandas y secuencia	8/1 2 3 4 5 6 7 8	5/1 2 3 4 5	8/1 2 3 4 5 6 7 8

El color verde de la clorofila varía para los diferentes tipos de especies por lo tanto, puede ser útil para diferenciarlos e identificarlos [33].

En este sentido es particularmente interesante el artículo escrito por Cohen [34], en donde concluyen que la respuesta a la radiación incidente por parte de la vegetación se caracteriza por el siguiente comportamiento:

1. Baja reflectividad en la sección visible del espectro (VIS) debido al efecto de las diversas pigmentaciones presentes en las mismas.
2. Alta reflectividad en la sección correspondiente al infrarrojo cercano), debida a la baja absorptividad de las clorofilas y a la estructura interna de las hojas.
3. Caída en la reflectividad cerca de 1.4µm, debido a la presencia de agua en las hojas (entre más humedad menor reflectividad).

Dentro del proceso de análisis digital de las imágenes (ADI), para la extracción de la información

temática de nuestro interés, se debe seguir el procedimiento indicado en la figura 4. Para el ADI se utilizó el programa Erdas Imagine y para las correcciones atmosféricas el programa Atcor. En este proceso se necesita interpretar la metadata de cada una de las imágenes disponibles.

En la primera etapa se seleccionaron imágenes representativas de los tres sitios de estudio y en la medida de lo posible sin nubosidades. Luego se hizo la corrección radiométrica de las imágenes satelitales, la cual consistió en la eliminación de las distorsiones radiométricas que pueden ser producidas por el sensor, la atmósfera y la topografía [35]. Mediante esta técnica se modifican los niveles digitales (ND) originales de las imágenes satelitales, con objeto de acercarlos a los que habría presentes en la imagen en el caso de una recepción ideal. Se calcula la variable llamada radiancia espectral (L_{λ}) de la cubierta, que es la variable que registra el sensor, la cual es llamada la radiancia a la altura del sensor y que es a su vez la más importante para estimar las reflectividades (ρ) tanto aparentes como reales. La radiancia a la altura del sensor se calcula mediante (4):

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{ND_{max}} \right) ND + L_{min} \quad (4)$$

Donde, L_{λ} = radiancia espectral a la apertura del sensor [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$]; ND_{max} = máximo número digital grabado (255 para 8 bits); L_{min} = mínimo nivel de activación de respuesta del sensor, el cual será la menor radiancia detectable [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$]; L_{max} = punto de saturación del sensor, el cual es la máxima radiancia detectable [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$]. Generalmente el término L_{min} se conoce como desplazamiento (offset o Bias) y el término asociado al ND se le conoce como ganancia (gain).

Con este análisis se calculó la radiancia a la altura del sensor, sin considerar ni evaluar las distorsiones que la atmósfera introduce en los

valores de radiancia que llegan al sensor de la superficie terrestre y que pueden modificar la señal de tres maneras: por absorción, por dispersión y por emisión.

En el siguiente paso se hicieron las correcciones atmosféricas a partir de los modelos físicos de transferencia radiativa con atmosfera estándar, conocidos como MODTRAN, los cuales son programas informáticos creados en un determinado lenguaje de programación, que permiten al usuario obtener parámetros atmosféricos (atmósferas estándar) o bien simular la radiancia que mediaría un determinado sensor a partir de una serie de datos de entrada. Para finalizar se realizaron los cálculos del NDVI mediante la herramienta Model Maker del programa Erdas Imagine.

Para determinar los valores de NDVI de cada una de las imágenes, realizamos una estimación dependiendo del tamaño del pixel de cada imagen. Realizamos un promedio de los valores de NDVI de cada pixel en un perímetro de 5 metros, según (5):

Una vez extraído el valor de cada NDVI pixel y el Área pixel por cada uno de los puntos de control, se procedió a estimar los valores de NDVI promedio.

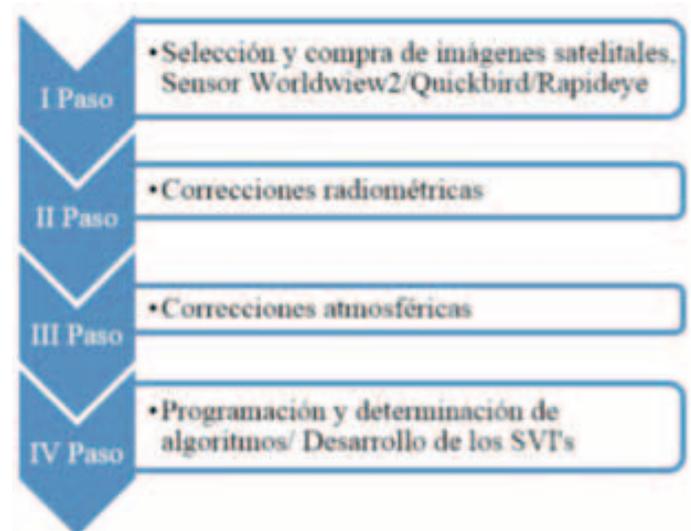


Figura 4. Modelo empírico para estimar el LAI en función de los índices espectrales de vegetación [2].

$$NDVI = \frac{\sum \left(\left(\frac{Area_{pixel}}{Area_{total_{pixel}}} \right) \cdot NDVI_{pixel} \right)}{\sum \left(\frac{Area_{pixel}}{Area_{total_{pixel}}} \right)} \quad (5)$$

3. Resultados

3.1 Estimación del NDVI

La tabla 6 muestra un resumen de los resultados del NDVI para cada sitio, incluyendo el valor promedio y la desviación estándar de cada conjunto de mediciones. Como se puede apreciar, la media de los valores del NDVI del área de la Isla de Barro Colorado muestra valores superiores a los encontrados en los otros tres sitios, con un valor promedio de 0.758. Este resultado refleja mayor densidad de hojas verdes en la Isla Barro Colorado, seguido por el sendero Espíritu del Bosque, Avifauna y por último en el sendero El Charco.

3.2 Mediciones experimentales de LAI

Las mediciones del LAI fueron agrupadas por sitio de muestreo, usando el método de rango intercuartil para eliminar los puntos salientes. El resumen de los resultados se presenta en la tabla 7 para cada uno de los sitios de muestreo.

Estos valores se encuentran dentro del rango de valores reportados para regiones de Bh-T por otro tipo de estudios. Para el trabajo realizado en los años 80 en la Isla de Barro Colorado, el promedio fue de 7.25 utilizando metodología alométricas [28].

Tabla 6. Estadísticas descriptivas de los valores del NDVI por sitio de la campaña de medición.

Localidad	Periodo	Estadístico		
		Media	Mediana	Desviación estándar
Avifauna	2012-2013	0.660	0.658	0.043
Isla Barro Colorado	Nov.2012-enero 2013	0.758	0.758	0.019
Sendero El Charco	Enero 2013	0.646	0.657	0.043
Sendero Espíritu del Bosque	Enero 2013	0.676	0.673	0.031

Tabla 7. Estadísticas descriptivas de las medidas experimentales del LAI, por sitio de medición.

Localidad	Periodo	Estadístico		
		Media	Mediana	Desviación estándar
Avifauna	2012-2013	7.23	7.31	1.31
Isla Barro Colorado	Nov 2012-enero 2013	8.41	8.44	1.19
Sendero El Charco	Enero 2013	7.73	8.07	1.49
Sendero Espíritu del Bosque	Enero 2013	7.94	8.24	1.21

Garrigues [36] comparó los valores del LAI estimados mediante instrumentación óptica vs valores LAI obtenidos con técnicas de tipo directa como la recolección de hojas, lo que concluye una subestimación del LAI por instrumentación óptica indirecta.

3.3 Correlación entre mediciones experimentales del LAI y NDVI

Estas correlaciones fueron hechas pixel por pixel, relacionando los valores del NDVI con los valores medidos de LAI en campo, correspondientes a cada punto de control. Se utilizó el modelo resultante de la regresión lineal para mostrar los resultados, se separaron los datos por localidad y se aplicó el método de regresión lineal por separado para cada una de los sitios evaluados de acuerdo a las imágenes disponibles. La variabilidad estacional únicamente se pudo analizar en el área de Camino de Oleoducto, ya que se tienen datos de la estación seca y de la estación lluviosa. Los datos se analizaron por separado y luego en su totalidad. Los resultados de todos los sitios, a excepción de Barro Colorado se muestran en la tabla 8. Para Barro Colorado, se analizaron las parcelas por separado (Ver tabla 9).

Tabla 8. Correlaciones de los datos experimentales LAI (m²m⁻²) y valores NDVI, Camino del Oleoducto.

Parcela	Regresión	R ²
Avifauna	LAI= 2.98+6.22 NDVI	0.36
Avifauna- estación seca	LAI= 0.54 +9.96 NDVI	0.53
Avifauna- estación lluviosa	LAI=2.64+7.66 NDVI	0.39

Tabla 9. Correlaciones de los datos experimentales LAI (m²m⁻²) y valores NDVI, Isla Barro Colorado.

Parcela	Regresión	R ²
BC1	LAI= 8.06-1.10 NDVI	-0.05
BC2	LAI= 16.0-10.3 NDVI	-0.12
BC3	LAI= 2.59+7.10 NDVI	0.14
BC4	LAI= 4.02+5.00 NDVI	0.20
BC5	LAI= 7.93+1.55 NDVI	0.15

Con los datos de las mediciones realizadas en los senderos del Parque Nacional Soberanía (El Espíritu del Bosque y El Charco), se realizaron correlaciones por separado y luego se analizaron en dos conjuntos de datos (Ver Tabla 10).

Tabla 10. Correlaciones de los datos experimentales LAI (m²m⁻²) y valores NDVI, Parque Soberanía, senderos Espíritu del Bosque y El Charco.

Parcela	Regresión	R ²
Espíritu del Bosque	5.81+3.13 NDVI	0.10
El Charco	1.21+10.1 NDVI	0.29
Espíritu del Bosque y El Charco	3.35+7.11 NDVI	0.27

Las correlaciones LAI-NDVI resultantes para los diferentes conjuntos de datos, fueron positivas de moderadas a bajas.

4. Conclusiones

Luego de analizar los datos, se ha logrado una correlación empírica lineal entre el LAI y el NDVI para bosques tropicales, según la ecuación

$$LAI = 0.54 + 9.96NDVI \quad (6)$$

Se consideró el modelo generado con los datos de Avifauna en la estación seca, debido a que presenta una mayor correlación entre los datos, teniendo las

variables una correlación positiva moderada, con un nivel de significancia $\alpha=5\%$. También se calculó el error cuadrado medio (ECM) para la localidad de Avifauna, el cual resultó en un valor de 0.67. Para realizar la comparación entre los modelos, se utilizó el error cuadrado medio (ECM) y de esta manera se logró un parámetro comparable entre cada uno de los modelos propuestos para Bh-T.

La tabla 11 presenta los resultados de la validación de (6) con los datos de las mediciones realizadas del LAI en los diferentes sitios de estudio. Se empleó como función objeto el ECM calculado entre la predicción de la correlación lineal empírica generada y los valores medidos con el ceptómetro.

Tabla 11. Validación espacial modelo lineal propuesto en este trabajo y las mediciones en el Parque Nacional Soberanía.

Localidad	ECM
Avifauna estación seca	0.67
Barro Colorado	1.37
Parque Nacional Soberanía	1.97

Se compararon los resultados con los modelos propuestos para Bh-T, utilizando el ECM. En la tabla 12 se muestra un resumen de los resultados del ECM para los sitios de estudio. Se comprobó que en todas las localidades, el menor valor de ECM lo representan los resultados del modelo lineal propuesto en este trabajo según (6).

Tabla 12. ECM basado en los valores medidos de LAI para varios modelos LAI-NDVI, para las localidades estudiadas.

Localidad	Error Medio Cuadrado (ECM)			
	LAI nuestro modelo lineal	LAI Modelo Ureña (2010)	LAI Modelo Ibrahim (2001)	LAI Modelo de Pierce (1993)
Isla Barro Colorado	1.37	2.42	9.30	1.59
Sendero El Charco	1.97	4.64	4.01	3.85
Sendero Espíritu del Bosque	2.01	4.32	5.17	3.48
Avifauna	2.60	4.52	6.39	5.71

Las diferencias en los resultados la podemos asociar a las diferencias ecológicas en las parcelas de estudio, tal como se pudo demostrar en la sección de características ecológicas. También, se debe tomar en cuenta la diferencia en resolución espacial de las imágenes usadas. Igualmente, el análisis con imágenes del mismo sensor, es otra manera de unificar resultados.

A pesar de que el coeficiente de correlación $R^2=0.53$ de (6) representa una correlación positiva moderada, con un nivel de significancia $\alpha=5\%$, el cual se puede considerar un poco bajo en comparación con los coeficientes de correlación de

los modelos existentes [21]–[23], podemos concluir que de acuerdo a los valores del ECM, este trabajo presenta una ecuación que puede correlacionar mejor las variables LAI-NDVI en bosque húmedo, en comparación con los otros modelos existentes.

5. Agradecimiento

Agradecemos a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por haber financiado este trabajo. También al Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH), a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Panamá y a la Autoridad del Canal de Panamá por el apoyo recibido.

Referencias Bibliográficas

- [1] N. Gobron and M. M. Verstraete, "Index, Leaf Area," in *Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables*, 2009, vol. 10.
- [2] E. Chuvieco, *Teledetección Ambiental: La observación de la tierra desde el espacio*. España: Editorial Planeta, S.A., 2010.
- [3] G. Zheng and L. M. Moskal, "Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors," *Sensors*, vol. 9, no. 4, pp. 2719–2745, Apr. 2009.
- [4] D. J. Watson, "Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years," *Ann. Bot.*, vol. 11, pp. 41–76, 1947.
- [5] D. Alcaraz-Segura, J. Cabello, C. Bagnato, A. Altesor, C. Oyonarte, M. Oyarzabal, and J. M. Paruelo, "La medida de la respuesta Ecosistémica," *Segur. y Medio Ambient.*, vol. 122, pp. 60–73, 2011.
- [6] D. Metcalfe, O. Phillips, T. Baker, R. Brienen, K.-J. Chao, J. Silva, and valued contributions from the entire R. Consortium, "Measuring tropical forest carbon allocation and cycling: RAINFOR field manual," 2009.
- [7] L. H. Emmons, P. Chatelet, L. Cournac, N. C. A. Pitman, V. V. V. L. Fernando, and M. A. Dubois, "Seasonal change in leaf area index at three sites along a south American latitudinal gradient," *ECOTROPICA*, vol. 12, no. 87, pp. 87–102, 2006.
- [8] J. M. Chen, P. M. Rich, S. T. Gower, J. M. Norman, and S. Plummer, "Leaf area index of boreal forests : theory , techniques , and measurements," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, pp. 29,449–29,443, 1997.
- [9] J.-Y. Pontauiller, G. J. Hymus, and B. G. Drake, "Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques," *Can. J. Remote Sens.*, vol. 29, no. 3, pp. 381–387, Jun. 2003.
- [10] M. Weiss, F. Baret, G. J. Smith, I. Jonckheere, and P. Coopin, "Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 121, no. 1–2, pp. 37–53, Jan. 2004.
- [11] N. J. J. Bréda, "Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies," *J. Exp. Bot.*, vol. 54, no. 392, pp. 2403–17, Nov. 2003.
- [12] I. Decagon Devices, *Operator's Manual AccuPAR Model LP-80 PAR/LAI Ceptometer*. 2010, p. 89.
- [13] P. J. Zarco-tejada, J. R. Miller, T. L. Noland, G. H. Mohammed, and P. H. Sampson, "Scaling-Up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 7, pp. 1491–1507, 2001.
- [14] F. Yuan and S. Sen Roy, "Analysis of the relationship between NDVI and climate variables in Minnesota using geographically weighted regression and spatial interpolation," in *ASPRS 2007 Annual conference*, 2007.
- [15] M. Kalácska, G. A. Sánchez-Azofeita, B. Rivard, J. C. Calvo-Alvarado, A. R. P. Journet, J. P. Arroyo-Mora, and D. Ortiz-Ortiz, "Leaf area index measurements in a tropical moist forest: A case study from Costa Rica," *Remote Sens. Environ.*, vol. 91, no. 2, pp. 134–152, May 2004.
- [16] J. W. Rouse, R. H. Hass, J. A. Shell, and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS-1," in *Third Earth Resources Technology Satellite Symposium*, 1974, pp. 309–317.
- [17] L. C. Bart and M. S. Martinez, "Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005," *Tecnol. la Inf. Geográfica al Serv. los Ciudad.*, pp. 728–737, 2010.
- [18] J. M. Kovacs, J. M. L. King, F. F. de Santiago, and F. Flores-Verdugo, "Evaluating the condition of a mangrove forest of the Mexican Pacific based on an estimated leaf area index mapping approach," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 157, no. 1–4, pp. 137–49, Oct. 2009.
- [19] L. Lu, X. Li, C. L. Huang, M. G. Ma, T. Che, J. Bogaert, F. Veroustraete, Q. H. Dong, and R. Ceulemans, "Investigating the relationship between ground-measured LAI and vegetation indices in an alpine meadow, north-west China," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 26, no. 20, pp. 4471–4484, Oct. 2005.
- [20] L. E. O. C. Aragão, Y. E. Shimabukuro, F. D. B. Espírito-santo, and M. Williams, "Spatial Validation of the Collection 4 MODIS LAI Product in Eastern Amazonia," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 43, no. 11, pp. 2526–2534, 2005.
- [21] G. E. Ureña Matos, "Estimación del Índice de Área Folicular

- (Leaf Area Index) en el bosque Tropical Húmedo en Gamboa a través de teledetección y métodos experimentales," Universidad Tecnológica de Panamá, 2011.
- [22] Ibrahim, "Environment and development in coastal region and in small island. Assessing mangrove leaf area index and canopy closure," 2001.
- [23] L. L. Pierce, J. Walker, T. I. Dowling, T. R. McVicar, T. J. Hatton, S. W. Running, and J. C. Coughlan, "Ecohydrological changes in the Murray-Darling Basin III. A simulation of regional hydrological changes," *J. Appl. Ecol.*, vol. 30, no. 2, pp. 283–294, 1993.
- [24] L. R. Holdridge, *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1987.
- [25] S. P. Hubbell, R. Condit, and R. B. Foster, "Barro Colorado Forest Census Plot Data," 2005. [Online]. Available: <https://ctfs.arnarb.harvard.edu/webatlas/datasets/bci>.
- [26] S. P. Hubbell, R. B. Foster, S. T. O'Brien, K. E. Harms, R. Condit, B. Wechsler, S. J. Wright, and S. L. de Lao, "Light-Gap disturbances, Recruitment Limitation, and Tree Diversity in a Neotropical Forest," *Science*, vol. 283, pp. 554–557, 1999.
- [27] R. Condit, *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and a Comparison with other Plots*. Springer-Verlag and R. G. Landes Company, Berlin, Germany, and Georgetown, Texas., 1998.
- [28] E. G. Leigh, *Tropical forest ecology: A view from Barro Colorado Island*. Oxford University Press, 1999.
- [29] A. De Seda M., L. Martínez, M. N. S. de Stapf, and M. D. C. A., *Un recorrido por el sendero El Charco, Parque Nacional Soberanía, Panamá*. Costa Rica: Editorial INBio, 2010, p. 79.
- [30] S. D. Matteucci and A. Colma, "Metodología para el estudio de la vegetación. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa regional de desarrollo Científico y Tecnológico." Washington, D.C., p. 166, 1982.
- [31] J. T. Morisette, F. Baret, J. L. Privette, R. B. Myneni, J. E. Nickeson, S. Garrigues, N. V. Shabanov, M. Weiss, R. a. Fernandes, S. G. Leblanc, M. Kalacska, G. a. Sanchez-Azofeifa, M. Chubey, B. Rivard, P. Stenberg, M. Rautiainen, P. Voipio, T. Manninen, a. N. Pilant, T. E. Lewis, J. S. Iames, R. Colombo, M. Meroni, L. Busetto, W. B. Cohen, D. P. Turner, E. D. Warner, G. W. Petersen, G. Seufert, and R. Cook, "Validation of global moderate-resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS land product validation subgroup," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 7, pp. 1804–1817, Jul. 2006.
- [32] D. Globe, "WorldView-2," 2009. [Online]. Available: <http://worldview2.digitalglobe.com/about/>. [Accessed: 25-May-2012].
- [33] Z. A. Latif, I. Zamri, and H. Omar, "Determination of Tree Species using Worldview-2 data," 2012 IEEE 8th Int. Colloq. Signal Process. its Appl., pp. 383–387, Mar. 2012.
- [34] W. B. Cohen and S. N. Goward, "Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing," *Bioscience*, vol. 54, no. 6, pp. 535–545, 2004.
- [35] R. Richter, "Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR-2 / 3 User Guide , Version 8 . 0 . 1 , June 2011)," no. June, 2011.
- [36] S. Garrigues, N. V. Shabanov, K. Swanson, J. T. Morisette, F. Baret, and R. B. Myneni, "Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 148, no. 8–9, pp. 1193–1209, Jul. 2008.