



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**MODELO DE LA GEOMETRÍA SOL-SENSOR EN LA
REFLECTANCIA DE LA VEGETACIÓN: VALIDACIÓN A
NIVEL SATELITAL**

EDGARDO RAFAEL MEDRANO RUEDAFLORES

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2013

La presente tesis, titulada: "**Modelo de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación: validación a nivel satelital**", realizada por el alumno: **Edgardo Rafael Medrano Ruedaflores**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



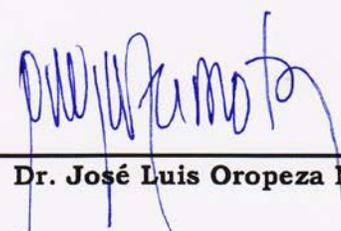
Dr. Abel Quevedo Nolasco

ASESOR:



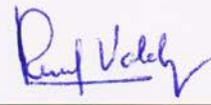
Dr. Martín Alejandro Bolaños González

ASESOR:



Dr. José Luis Oropeza Mota

ASESOR:



Dr. José René Valdez Lazalde

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 02 de abril de 2013

MODELO DE LA GEOMETRÍA SOL-SENSOR EN LA REFLECTANCIA DE LA VEGETACIÓN: VALIDACIÓN A NIVEL SATELITAL

Edgardo Rafael Medrano Ruedaflores, Mc.

Colegio de Postgraduados, 2013

Las observaciones de la superficie terrestre realizadas por sensores remotos a bordo de plataformas satelitales, pueden ser utilizadas para caracterizar los procesos que ocurren en el sistema suelo-vegetación-atmósfera. Los datos adquiridos desde distintos ángulos de observación son una fuente de información adicional a la ofrecida por las variaciones espectrales, espaciales y temporales detectadas por estos instrumentos. Una de las aplicaciones donde ha cobrado relevancia el uso de esta cuarta fuente de información es la clasificación de la cobertura terrestre; para explorar su utilidad se han propuesto numerosos enfoques basados en modelos semi-empíricos lineales, sin que hasta la fecha existan reportes de que los parámetros asociados a estos modelos contribuyan de forma significativa a la solución del problema. En este trabajo se investigan dos aspectos: (1) el ajuste del modelo Uni-Paramétrico de la BRDF a datos obtenidos mediante el sensor POLDER-1 y (2) la contribución de la información multi-angular para obtener una solución al problema de clasificación de la cobertura terrestre a través del modelo antes referido. A pesar de que la concordancia entre las mediciones del sensor POLDER-1 y lo estimado a través del modelo en consideración es superior al 97%, no se encontró evidencia en torno a la mejora que supone el uso de información multi-angular para la clasificación de la cobertura terrestre. Estos resultados son congruentes con otras investigaciones en relación a la necesidad de definir nuevos sistemas de clasificación basados en las variables que pueden ser inferidas mediante las observaciones realizadas por un sensor remoto espacial.

Palabras clave: Imágenes satelitales, kernels, modelo Uni-Parámétrico de la BRDF, interacciones espectrales suelo-vegetación-atmósfera.

**MODEL OF THE SUN-SENSOR GEOMETRY ON THE VEGETATION
REFLECTANCE: ASSESSMENT THROUGH SATELLITE MEASUREMENTS**

Edgardo Rafael Medrano Ruedaflores, Mc.

Colegio de Postgraduados, 2013

The observations of the terrestrial surface by means of satellite remote sensing, have the potential of being used to characterize processes occurring on the soil-vegetation-atmosphere system. Data acquired from different view angles are an additional source of information with respect to those offered for spectral, spatial and temporal variations detected with this kind of instruments. One of the applications where the use of this fourth source of information has become relevant is land cover classification. To explore its usefulness, a number of approaches have been proposed based on linear kernel-driven models, unfortunately no significant contribution on the associated parameters of the models to classify land cover has been reported. On this work two issues are investigated: (1) the fitness of the Uni-Parametric BRDF model to data acquired by the POLDER-1 sensor and (2) the contribution of multiple view angle observations to the land cover classification problem using the aforementioned model. Although correlation levels between the measurements of the POLDER-1 sensor and those by the model under consideration are greater than 97%, no evidence was found related to the improvement of land cover classification by using multiple view angle data. These results are in agreement with the need to define new classification systems based on variables that may be inferred through the observations acquired by a satellite remote sensors reported by other researchers.

Key words: kernels, satellite imagery, soil-vegetation-atmosphere spectral interactions, Uni-Parametric BRDF model.

RECONOCIMIENTO

Se agradece ampliamente la beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a través del Postgrado en Hidrociencias del Colegio de Postgraduados.

Entre drama y comedia
he llegado trovando
a la edad media;
torpe, pero sincero,
aún no soy caballero
(y que el cielo
me libre de cordura).
No me embriaga la altura
ni me aburren los sueños;
no es por moda que estallo
y que me empeño.
El amor sigue en brete
y el camino a machete,
más no lloro por tal
ni me amilano,
si conservo mis manos,
mi sudor y el humano corazón.

Compañera - Silvio Rodríguez.

DEDICATORIA

A mis padres: Silvia Ruedaflores y Ramón Medrano, por ponerme alas y nunca quitármelas, a pesar de sus pesares; por enseñarme las cosas más bellas de la vida - amor, honor, lealtad, honradez, generosidad y el valor del esfuerzo -, por darme un hogar al cual volver después de la jornada; por abrigar mi alma.

A Ramiro Ávila: por enseñarme tanto de la vida con el pretexto de enseñarme matemáticas; por la impronta que su calidad como ser humano y científico dejara en mi; por ser mi amigo, mi segundo padre y mi mentor.

A Ivo Jiménez: por esas charlas tan interminables como esporádicas y estimulantes; por ser mi hermano; por ese amor a la ciencia, la música y la razón; por ser ejemplo de disciplina y empeño.

A Fernando Paz: por el espacio concedido durante estos años; por poner a prueba cada aspecto de mi vida: mis más nobles ideales y mi voluntad como aprendiz de científico; por ser el "black-sky albedo" y el "white-sky albedo" de mis días en Texcoco; por la controversia no siempre fraternal pero siempre productiva; por obligarme a crecer.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida y la dicha de compartirla con las personas a quienes dirijo mis agradecimientos:

- mis hermanos Ramón y Alejandro: por mis sobrinos y por cuidar de nuestros padres en todo este tiempo. A sus mujeres Diana y Mayra por cuidarlos a ellos;
- a Josué Ortiz y Raúl Gámez: por esa amistad desde la infancia, ya perpetua; por recibirme con los brazos abiertos cada que vuelvo al barrio;
- a Rosalinda Ramírez, Juan Ramírez y Rodolfo Ramírez: por brindarme su cálido abrazo y la palabra de apoyo cuando más oscura fue la noche en aquellos años de universitario. Por tantas enseñanzas compartidas y tantas risas arrancadas, por esa amistad tan valiosa;
- a Patricia Ibarra y Martín Bolaños: por ofrecerme su casa la primera noche que dormí en Texcoco; porque aquel gesto fue el primero de un río de demostraciones de afecto y de apoyo que aún hoy sigue fluyendo;
- a Ernesto Chávez: por esta amistad labrada durante casi cinco años y sus múltiples frutos. Por contar contigo siempre, incluso sin pedirlo, incluso sin saber que lo necesito;
- a Fabiola Rojas: por el inestimable apoyo prestado con diligencia a la consolidación de este trabajo;
- a Fernando Ibarra y Pawel Bajeca: al primero por compartir el inicio de la aventura que ha implicado mi estancia aquí, al segundo, por compartir casi el final;
- a José Luis Oropeza, René Valdez, Martín Bolaños, Abel Quevedo y Carlos Trejo: porque más allá de la figura que representan en esta tesis como asesores, consejero y sinodal, me regalaron su tiempo, escucharon mis problemas, compartieron sus experiencias y fortalecieron mi convicción en transitar por tan escarpado derrotero.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Sensores remotos y plataformas satelitales.....	1
1.2 Sensores remotos multi-angulares	8
1.3 Efectos atmosféricos y angulares en imágenes satelitales	11
1.4 Datos multi-angulares como fuente adicional de información: la clasificación de la cobertura terrestre.....	13
2. REVISIÓN DE LITERATURA	16
2.1 Función de Distribución de la Reflectancia Bidireccional (BRDF)	16
2.1 Aproximaciones a la BRDF	18
2.2 Modelos semi-empíricos lineales (SEL).....	21
2.2.1 Kernel Ross-Thick.....	22
2.2.2 Kernel Ross-Thin	22
2.2.3 Kernel Li-Sparse	23
2.2.4 Kernel Li-Dense	24
2.3 Esquemas de clasificación de la cobertura terrestre basados en modelos SEL	26
2.4 Modelo Uni-Paramétrico de la BRDF (UPB).....	28
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	31
3.1 Objetivo	31
3.2 Hipótesis.....	31
4. MATERIALES Y MÉTODOS	32
4.1 Materiales	32
4.1.1 Comportamiento dispersor de la cobertura terrestre a través de simulaciones.....	32

4.1.2 Base de datos BRDF POLDER-1	34
4.2 Metodología.....	38
4.2.1 Evaluación del modelo UPB a partir de escenarios de dispersión simulados.....	38
4.2.2 Patrones espectrales, angulares y temporales de la vegetación.....	39
4.2.3 Caracterización de biomas utilizando la información contenida en la base de datos BRDF POLDER-1	40
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
5.1 Desempeño del modelo UPB en relación a escenarios de cobertura terrestre simulados	44
5.2 El modelo UPB en la caracterización de ecosistemas continentales	49
6. CONCLUSIONES.....	60
7. LITERATURA CITADA.....	62

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características del sensor MSS.	2
Cuadro 2. Características de los sensores TM y ETM Plus.	3
Cuadro 3. Resolución espectral del sensor AVHRR 1 en μm	4
Cuadro 4. Resolución espectral del sensor AVHRR 2 en μm	4
Cuadro 5. Resolución espectral del sensor AVHRR 3 en μm	5
Cuadro 6. Características del sensor MODIS de las bandas 1 a 19.	7
Cuadro 7. Características del sensor MODIS de las bandas 20 a 36.	8
Cuadro 8. Características de las bandas del sensor POLDER.....	10
Cuadro 9. Características de las bandas del sensor MISR.....	11
Cuadro 10. Expresiones matemáticas de los factores para cada modelo utilizado en las simulaciones.	32
Cuadro 11. Valores utilizados en la simulación de escenarios.....	33
Cuadro 12. Valores utilizados para simular la dispersión en las bandas R e IRC considerando distintos niveles de cobertura.....	34
Cuadro 13. Etiquetas asociadas a los tipos de vegetación identificados por el GLC2000.....	36
Cuadro 14. Contenido de los archivos en la base de datos BRDF POLDER-1.	37
Cuadro 15. Niveles concordancia exigidos en los ajustes.	43
Cuadro 16. Mediciones contenidas en la base de datos BRDF POLDER-1 para cada bioma en el GLC200.....	50
Cuadro 17. Niveles de inclusión (%) logrados en la aplicación de los cuatro criterios para cada banda en las 22 clases.....	52
Cuadro 18. Estadísticos de errores asociados al ajuste del modelo UPB en las bandas 765 y 865.....	53

Cuadro 19. Estadísticos de errores asociados al ajuste del modelo UPB en las bandas 565 y 670.....	54
Cuadro 20. Estadísticos de errores asociados al ajuste del modelo UPB en la banda 443.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Geometría de un haz elemental incidente y de uno reflejado	17
Figura 2. Geometría sol-sensor.....	29
Figura 3. Variación de la reflectancia con el ángulo de observación en el plano principal.....	29
Figura 4. Malla de referencia terrestre POLDER.....	35
Figura 5. Crecimiento de la vegetación en los espacios R-IRC y A-R.....	39
Figura 6. Mediciones del sensor POLDER en el píxel 1756-1832 correspondientes a noviembre de 1996.	41
Figura 7. Geometría de observación POLDER	41
Figura 8. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thin y Li-Sparse y ajuste correspondiente del modelo UPB.....	45
Figura 9. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thin y Li-Dense y ajuste correspondiente del modelo UPB.....	46
Figura 10. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thick y Li-Sparse y ajuste correspondiente del modelo UPB.....	47
Figura 11. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thick y Li-Dense y ajuste correspondiente del modelo UPB.....	48
Figura 12. Relación entre las reflectancias simuladas a partir de modelos SEL y su correspondiente normalización mediante el UPB.	49
Figura 13. Variación del parámetro G del modelo UPB en las bandas 765 y 865 para los biomas contenidos en el GLC200.....	57
Figura 14. Variación del parámetro G del modelo UPB en las bandas 565 y 670 para los biomas contenidos en el GLC200.....	58

Figura 15. Variación del parámetro G del modelo UPB en la banda 443 para los biomas contenidos en el GLC200..... 59

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Sensores remotos y plataformas satelitales

La percepción remota se define como la medición indirecta de los objetos sobre la superficie terrestre a través de sensores montados en plataformas aéreas o espaciales (Schowengerdt, 2007). Entre las aplicaciones más importantes de esta tecnología se encuentran:

- el estudio de la dinámica atmosférica y la predicción del clima (Kidder *et al.*, 2000; Gutman e Ignatov, 2010);
- la obtención de información como la altura y cobertura del dosel, necesaria en investigaciones sobre el ciclo del carbono en ecosistemas terrestres (Hill *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2011);
- el desarrollo de metodologías que permitan evaluar el riesgo climático asociado a las actividades agropecuarias (AGROASEMEX, 2006) y,
- la investigación de nuevos esquemas para mejorar la clasificación de la cobertura terrestre (Cano 2008; Jiao *et al.*, 2011).

El programa Landsat fue uno de los primeros programas espaciales dedicados a la observación continua y sistemática de la superficie terrestre, desde sus inicios ha sido manejado en conjunto por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y el United States Geological Survey (USGS). El programa comenzó con el lanzamiento del satélite Landsat 1, el 23 de julio de 1972, y ha continuado con seis misiones más durante las últimas cuatro décadas. Actualmente está programado el lanzamiento de un octavo satélite en los primeros meses del 2013 (NASA, 2012).

Los satélites Landsat 1, 2 y 3 llevaron consigo un instrumento conocido como Multispectral Scanner (MSS); un radiómetro que colectaba datos en cuatro bandas espectrales, dos en la porción visible del espectro electromagnético y dos más en la porción del infrarrojo. A partir de la cuarta misión se agrega un

sensor con mayor resolución espectral y espacial llamado Thematic Mapper (TM), este instrumento y el MSS también estuvieron a bordo del satélite Landsat 5. El lanzamiento del sexto satélite Landsat falló debido a que no se logró la velocidad necesaria para alcanzar la órbita. Finalmente, el Landsat 7 fue puesto en órbita el 15 de abril de 1999; este satélite lleva consigo una versión mejorada del sensor TM: el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) (NASA, 2012). Las características principales de estos instrumentos, así como el uso primario de sus bandas espectrales se muestran en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Características del sensor MSS.

Multispectral Scanner (MSS)				
Landsat 1 - 3	Landsat 4 - 5	Ancho de banda (μm)	Resolución (m)	Uso primario
B4	B1	0.5-0.6 (verde)	80	Permite distinguir agua cargada de sedimentos y delinear áreas de aguas superficiales.
B5	B2	0.6-0.7 (rojo)	80	Realza características culturales.
B6	B3	0.7-0.8 (infrarrojo cercano)	80	Enfatiza límites de la vegetación entre la tierra y el agua así como relieves geográficos
B7	B4	0.8-1.1 (infrarrojo cercano)	80	Penetra la neblina atmosférica mejor; ofrece las mismas prestaciones que la banda anterior

Fuente: USGS, 2013.

Los datos obtenidos por los satélites Landsat representan el registro histórico más largo de información útil en la caracterización de los procesos que ocurren en el sistema Suelo-Vegetación-Atmósfera (SVA), han sido utilizados en áreas como la agricultura, las ciencias forestales y la exploración de recursos naturales (USGS, 2013).

Cuadro 2. Características de los sensores TM y ETM Plus.

Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)			
Landsat 4 - 5 y	Ancho de banda	Resolución	Uso primario
7	(μm)	(m)	
B1 (Azul-Verde)	0.45-0.52	30	Permite distinguir suelo de vegetación; vegetación caducifolia de coníferas.
B2 (Verde)	0.52-0.61	30	Enfatiza el pico de la vegetación, lo cual es útil para evaluar el vigor de las plantas.
B3 (Rojo)	0.63-0.69	30	Realza laderas con vegetación.
B4 (Infrarrojo reflejado)	0.76-0.90	30	Enfatiza el contenido de biomasa y costas.
B5(Infrarrojo reflejado)	1.55-1.75	30	Permite evaluar el contenido de humedad del suelo y de la vegetación; penetra nubes delgadas.
B6 (Térmico)	10.40-12.50	120*	Útil para el mapeo térmico y la estimación de la humedad.
B7 (Infrarrojo reflejado)	2.08-2.35	30	Útil para el mapeo de rocas alteradas hidrotermalmente asociadas con depósitos minerales.

* La banda 6 fue adquirida a una resolución de 120 m, sin embargo, el producto entregado al usuario es re-muestreado a 60 m.

Fuente: USGS, 2013.

La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) opera un conjunto de satélites medio ambientales de órbita polar y geo-estacionarios, los que resultan de interés en el ámbito de este trabajo son los primeros. La constelación de satélites NOAA de órbita polar está compuesta por dos series: la TIROS-N y la KLM. La primera inició con el lanzamiento del satélite TIROS-N en octubre de 1978, está compuesta por diez satélites y el último de la serie, el NOAA-J, fue puesto en órbita en diciembre de 1994; la serie KLM comenzó con el lanzamiento del satélite NOAA-K en mayo de 1998, el último de esta serie inició operaciones en mayo de 2005 (NCDC, 2008).

El Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) fue uno de los instrumentos a bordo de los satélites de órbita polar de la NOAA, las bandas espectrales de este sensor fueron diseñadas con los siguientes propósitos: bandas 1 y 2 para discernir nubes, límites tierra-agua, extensión de nieve y hielo, inicio de la fusión de la nieve con el hielo y para monitorear la vegetación terrestre; bandas 3, 4 y 5 para medir la temperatura de las nubes y la superficie del mar así como para el mapeo nocturno de nubes (Hastings *et al.*, 1992).

Los satélites TIROS-N, NOAA-A, NOAA-E y NOAA-G llevaron consigo la primera versión del sensor AVHRR, un radiómetro de cuatro bandas, mientras que los satélites NOAA-C, -F, -H, -D y -J la segunda; esta última poseía cinco bandas. En el Cuadro 3 se muestra la resolución espectral de la primera versión del sensor, mientras que en el Cuadro 4 se muestra lo correspondiente respecto a la segunda (NCDC, 2008).

Cuadro 3. Resolución espectral del sensor AVHRR 1 en μm .

Banda	TIROS-N	NOAA-A, -E, -G
1	0.55-0.90	0.58-0.68
2	0.725-1.10	0.725-1.10
3	3.55-3.93	3.55-3.93
4	10.5-11.5	10.5-11.5

Cuadro 4. Resolución espectral del sensor AVHRR 2 en μm .

Banda	NOAA-C, -F, -H, -D, -J	NOAA-I
1	0.58-0.68	0.58-0.68
2	0.725-1.10	0.725-1.0
3	3.55-3.93	3.55-3.93
4	10.3-11.3	10.3-11.3
5	11.5-12.5	11.4-12.4

La tercera versión del sensor AVHRR voló a bordo de los satélites de la serie KLM. A diferencia de sus predecesores, este instrumento incluye una banda adicional (3A) en la porción del infrarrojo cercano la cual es utilizada para

mejorar la detección de nieve y hielo (NESDIS, 2012). En el Cuadro 5 se muestran las características espectrales de cada banda para esta versión.

Cuadro 5. Resolución espectral del sensor AVHRR 3 en μm .

Banda	NOAA-K, -L, -M
1	0.58-0.68
2	0.725-1.00
3A	1.58-1.64
3B	3.55-3.93
4	10.30-11.30
5	11.50-12.50

Otros instrumentos a bordo de los satélites de órbita polar de la NOAA son:

- el High Resolution Infrared Radiation Sounder/2 (HIRS/2), dedicado a medir la radiación en la porción infrarroja del espectro electromagnético utilizando bandas alrededor de los 4.3 μm y los 15 μm ;
- el Stratospheric Sounding Unit (SSU), un espectrómetro diseñado para medir la radiación emitida por las partículas de dióxido de carbono en la parte superior de la atmósfera terrestre;
- la Microwave Sounding Unit (MSU), cuyos datos, colectados alrededor de los 5.5 mm, son utilizados para generar una temperatura de brillantez aparente, y
- el Solar Backscattered Ultraviolet System/2 (SBUV/2), diseñado para monitorear la concentración total de ozono en la atmósfera así como su distribución vertical (NCDC, 2008).

Los datos colectados por estos instrumentos son utilizados en una gran variedad de investigaciones sobre los procesos que ocurren en la superficie terrestre, los océanos y la atmósfera. Entre sus aplicaciones se encuentran el análisis y predicción del clima, estudios sobre la dinámica del océano y la detección de incendios en bosques (NESDIS, 2013). El sensor AVHRR, a través del producto Global Vegetation Index (GVI) ha sido utilizado para monitorear la densidad y vigor de la vegetación desde la década de los 80's (Kidwell, 1997).

Uno de los esfuerzos más recientes en cuanto a la adquisición de datos para caracterizar los procesos que ocurren en el sistema SVA, lo constituye el programa Earth Observing System (EOS) de la NASA. El programa EOS fue diseñado para monitorear los intercambios de energía, humedad y carbono; el uso de la tierra, así como la circulación oceánica y atmosférica, para un período de al menos dieciocho años. La era EOS comenzó con el lanzamiento de la plataforma EOS-AM 1 (Terra) en diciembre de 1999 y continuó con la puesta en órbita del EOS-PM 1 (Aqua) en 2002. Este último satélite tiene como misión monitorear los procesos en la hidrósfera y criósfera (Disney, 2001).

La plataforma Terra cuenta con instrumentos como el Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) y el Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR). MODIS permite realizar un monitoreo exhaustivo de la superficie terrestre, los océanos y la atmósfera a una resolución espacial comprendida entre los 250 y los 1,000 m con una alta cobertura temporal, en tanto que MISR ofrece la capacidad de observar las variaciones angulares de la energía dispersada por la superficie terrestre, los aerosoles atmosféricos y las nubes (Disney, 2001). MODIS adquiere datos en 36 bandas espectrales, en los Cuadros 6 y 7 se enlistan las características espectrales de éstas, así como su uso primario. Las bandas 1 y 2 de este sensor cuentan con una resolución espacial de 250 m; las bandas 3 a la 7 de 500 m y el resto una resolución de 1 km.

Cuadro 6. Características del sensor MODIS de las bandas 1 a 19.

Uso primario	Banda #	Ancho de banda (μm)	Radiancia espectral	Relación señal / ruido requerida (SR)
Límites de tierra / nubes / aerosoles	1	0.620 - 0.670	21.8	128
	2	0.841 - 0.876	24.7	201
	3	0.459 - 0.479	35.3	243
Propiedades de tierra / nubes / aerosoles	4	0.545 - 0.565	29.0	228
	5	1.230 - 1.250	5.4	74
	6	1.628 - 1.652	7.3	275
	7	2.105 - 2.155	1.0	110
	8	0.405 - 0.420	44.9	880
Color del océano / Fitoplancton / Biogeoquímica	9	0.438 - 0.448	41.9	838
	10	0.483 - 0.493	32.1	802
	11	0.526 - 0.536	27.9	754
	12	0.546 - 0.556	21.0	750
	13	0.662 - 0.672	9.5	910
	14	0.673 - 0.683	8.7	1087
	15	0.743 - 0.753	10.2	586
	16	0.862 - 0.877	6.2	516
	17	0.890 - 0.920	10.0	167
Vapor de agua atmosférico	18	0.931 - 0.941	3.6	57
	19	0.915 - 0.965	15.0	250

Fuente: NASA, 2011.

Cuadro 7. Características del sensor MODIS de las bandas 20 a 36.

Uso primario	Banda #	Ancho de banda (micrómetros)	Radiancia espectral	Relación diferencia de temperatura equivalente / ruido requerida (Delta T)
	20	3.660 - 3.840	0.45 (300 K)	0.05
Temperatura de la superficie / Nubes	21	3.929 - 3.989	2.38 (335 K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67 (300 K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79 (300 K)	0.07
Temperatura atmosférica	24	4.433 - 4.498	0.17 (250 K)	0.25
	25	4.482 - 4.549	0.59 (275 K)	0.25
Vapor de agua en nubes cirrus	26	1.360 - 1.390	6.00	150 (SR)
	27	6.535 - 6.895	1.16 (240 K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18 (250 K)	0.25
Propiedades de las nubes	29	8.400 - 8.700	9.58 (300 K)	0.05
Ozono	30	9.580 - 9.880	3.69 (250 K)	0.25
Temperatura de la superficie / Nubes	31	10.780 - 11.280	9.55 (300 K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94 (300 K)	0.05
	33	13.185 - 13.485	4.52 (260 K)	0.25
Altura superior de las nubes	34	13.485 - 13.785	3.76 (250 K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11 (240 K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08 (220 K)	0.35

Fuente: NASA, 2011

1.2 Sensores remotos multi-angulares

Los objetos sobre la superficie terrestre no reflejan la radiación solar incidente de igual forma en todas las direcciones (*i.e.*, no son difusores Lambertianos), por el contrario, la señal registrada varía en función de la geometría sol-sensor (Li *et al.*, 1997). El análisis de cómo y por qué la radiación incidente es dispersada en diferentes direcciones de manera distinta, permite evaluar ciertas propiedades de los objetos observados, por ejemplo, en el caso de las nubes es posible determinar su altura y su tipo (Diner *et al.*, 1998).

En los últimos años se ha reconocido el potencial de las observaciones multi-angulares como una fuente adicional de información capaz de generar nuevo

conocimiento sobre los procesos que ocurren en el sistema SVA (Wanner *et al.*, 1995). No obstante, la mayoría de los sensores remotos del pasado y actuales cuentan con un rango angular limitado que varía de manera perpendicular a la trayectoria de vuelo del satélite, o bien sobre la trayectoria de vuelo, lo cual restringe la explotación de esta fuente de información (Deschamps *et al.*, 1994). Lo anterior motivó el desarrollo de instrumentos capaces de observar el mismo punto sobre la superficie terrestre desde distintos ángulos. El sensor Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances 1 (POLDER-1), el cual voló a bordo de la plataforma japonesa Advanced Earth Observing Satellite 1 (ADEOS-1), fue diseñado para medir la energía reflejada por el sistema SVA desde doce (hasta catorce) direcciones distintas en una misma trayectoria del satélite. Este instrumento cuenta con ocho bandas de las cuales seis fueron optimizadas para la observación de los aerosoles atmosféricos, las nubes, el color del océano y las superficies terrestres; las otras dos están centradas en las bandas de absorción de agua y oxígeno. Estas últimas se usan principalmente en la estimación de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera y la altitud superior de las nubes (Deschamps *et al.*, 1994). En el Cuadro 8 se enlistan algunas características de este sensor.

La plataforma Terra cuenta con un instrumento de características similares a POLDER: el sensor MISR. Este dispositivo está compuesto por nueve cámaras colocadas en un arreglo geométrico tal que una de ellas apunta a nadir, cuatro hacia adelante en la dirección de vuelo y cuatro más hacia atrás en la misma dirección. Los ángulos de orientación de cada cámara en el arreglo simétrico son 0° , $\pm 26.1^\circ$, $\pm 45.6^\circ$, $\pm 60.0^\circ$ y $\pm 70.5^\circ$. La información captada por MISR permite realizar estudios sobre el intercambio de energía entre la superficie terrestre y su atmósfera; algunas de las aplicaciones que son posibles gracias a los datos adquiridos por este instrumento son la evaluación de la productividad biológica, el diseño de sistemas de clasificación de la cobertura terrestre y el seguimiento a la distribución de los aerosoles atmosféricos (Diner *et al.*, 1998).

Cuadro 8. Características de las bandas del sensor POLDER. El rango dinámico está expresado en reflectancias considerando al sol en el cenit.

Centro de banda (nanómetros)	Ancho de banda (nm)	Polarización	Rango dinámico	Uso primario
443	20	No	0.05-0.22	Color del océano.
443	20	Sí	0.05-1.1	Vegetación, aerosoles, balance de radiación terrestre.
490	20	No	0.034-0.17	Color del océano.
565	20	No	0.019-0.11	Color del océano.
670	20	Sí	0.013-1.1	Vegetación, aerosoles, balance de radiación terrestre.
763	10	No	0.007-1.1	Presión superior de las nubes.
765	40	No	0.007-1.1	Vegetación, aerosoles, presión superior de las nubes.
865	40	Sí	0.007-1.1	Vegetación, aerosoles, balance de radiación terrestre.
910	20	No	0.007-1.1	Cantidad de vapor de agua.

Fuente: Leroy *et al.*, 1997.

El Cuadro 9 resume las principales características del sensor MISR.

Cuadro 9. Características de las bandas del sensor MISR. Cada una de las 9 cámaras que componen al sensor captura información en 4 bandas espectrales.

Centro de banda (nm)	Ancho de banda (nm)	Uso primario
446 (Azul)	21	Estimación del tamaño y distribución de las partículas de aerosoles.
558 (Verde)	15	Estimación de las propiedades reflejantes de banda ancha (albedos).
672 (Rojo)	11	Identificación de superficies con vegetación y estudios sobre aerosoles marinos.
866 (Infrarrojo cercano)	20	Identificación de superficies con vegetación y estudios sobre aerosoles marinos.

Fuente: JPL, 2013

1.3 Efectos atmosféricos y angulares en imágenes satelitales

La información registrada por instrumentos como los discutidos hasta el momento es resultado de varios factores los cuales pueden ser divididos en dos categorías: físicos e instrumentales. Entre los factores físicos se encuentran aquellos fenómenos que ocurren al interactuar la radiación emitida por el sol con la superficie terrestre y su atmósfera; la absorción y dispersión atmosférica, así como la absorción, transmisión y reflexión causadas por las características de la superficie terrestre figuran en este grupo. Por otro lado, la geometría de observación del sensor, sus características espectrales y la degradación que éste sufre en el tiempo, son factores representativos de la segunda categoría.

La atmósfera introduce distorsiones a causa de su composición química y los aerosoles suspendidos en ella; está compuesta por gases como vapor de agua (H₂O), oxígeno (O₂), ozono (O₃), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), entre otros, los cuales absorben la radiación mediante cambios rotacionales, vibratorios o en el nivel de energía de los electrones (Palacios, 2007). Por otra parte, las partículas de aerosoles suspendidos (sulfatos, polvo mineral, hollín y sal marina) dispersan la radiación en todas direcciones en función de su tamaño, lo cual provoca una atenuación en la señal medida (Disney, 2001).

Los satélites Landsat, NOAA y EOS, recorren la Tierra en órbita polar sincronizada con el sol, lo cual implica que un mismo punto sobre la superficie será observado aproximadamente con el mismo ángulo de iluminación cada vez que el satélite pase sobre él. Sin embargo, en sensores como AVHRR y MODIS, cuyo barrido es perpendicular a la trayectoria de vuelo, el ángulo de visión oscila alrededor de $\pm 55^\circ$, introduciendo así variaciones en la señal medida que no representan el fenómeno observado (*e.g.* evolución fenológica de la vegetación). En instrumentos con ángulo de visión fijo, como los utilizados por los satélites Landsat, el movimiento de traslación de la Tierra provoca variaciones en la iluminación de una misma superficie observada a lo largo del año. En general, los dos tipos de efectos angulares (observación e iluminación) suelen estar presentes cuando se analizan series de datos multi-temporales. De lo anterior resulta evidente la necesidad de considerar las perturbaciones atmosféricas y angulares al utilizar imágenes satelitales en el estudio de los procesos que ocurren en el sistema SVA, varios autores resaltan este aspecto (Wanner *et al.*, 1995; Li *et al.*, 1997; Pokrovsky y Roujean 2002).

En el caso de los efectos atmosféricos, se han desarrollado esquemas de corrección basados en modelos del comportamiento dispersor de la atmósfera y de la superficie terrestre. Palacios (2007) desarrolló un algoritmo de corrección atmosférica basado en la estimación de la reflectancia de trayectoria para la porción visible del espectro electromagnético (0.485 μm - 0.66 μm) a través de una regresión lineal entre las bandas centradas en 2.2 μm y 0.485 μm (7 y 1,

respectivamente) de los sensores TM y ETM+. Una aproximación similar para sensores que no cuentan con bandas en la región del infrarrojo de onda corta (0.40-2.50 μm) es discutida por Richter *et al.* (2006).

Los efectos angulares presentan una naturaleza dual; introducen un componente de ruido en los datos cuando se analizan observaciones multi-temporales provenientes de sensores como AVHRR y MODIS, en tales casos, es necesario estandarizar a una geometría sol-sensor determinada (Roujean *et al.*, 1992). Por otro lado, el muestreo angular alcanzado por estos instrumentos se puede utilizar para inferir las propiedades anisotrópicas y estructurales de los objetos sobre la superficie (Pokrovsky y Roujean, 2002). En ambos casos, el problema es abordado mediante el desarrollo de modelos que intentan describir cómo varía la señal registrada por un sensor remoto espacial en función de la geometría sol-sensor y las características de la superficie.

1.4 Datos multi-angulares como fuente adicional de información: la clasificación de la cobertura terrestre

Wanner *et al.* (1995) señalan que: *"Además del contenido espacial, temporal y espectral, la variación de la reflectancia de un píxel con relación a los ángulos de iluminación y visión es una potencial cuarta fuente de información en datos provenientes de sensores remotos adquiridos en múltiples ángulos"*. Por su parte, Disney (2001) reconoce seis dominios de información que caracterizan la radiación reflejada desde la superficie terrestre, estos son: espectral, espacial, temporal, angular, polarización y el tiempo de respuesta. Este autor refiere que los primeros tres constituyen la base de los desarrollos convencionales en percepción remota, mientras que, los efectos de la polarización sobre la radiación reflejada por el sistema SVA y el tiempo de respuesta de la señal enviada por sensores activos, en la determinación de parámetros estructurales de la vegetación, han comenzado a ser estudiados con el advenimiento de sensores como POLDER y la tecnología Light Detection and Ranging (LiDAR), respectivamente.

En cuanto al dominio angular, Barnsley *et al.* (1997) estudiaron el grado hasta el cual es posible diferenciar distintos tipos de cobertura vegetal utilizando información multi-angular en una sola banda captada por un sensor remoto aéreo. De manera análoga al uso de información multi-espectral en la clasificación de coberturas que difieren principalmente en términos de sus propiedades bioquímicas, estos autores introducen el concepto de espacio multi-angular y analizan la separabilidad de diferentes especies en él; las implicaciones de sus hallazgos son discutidas en torno a la construcción de índices angulares. Los resultados obtenidos por estos investigadores señalan que la componente direccional en datos multi-angulares provee un importante medio de discriminación para ciertos tipos de coberturas.

Jiao *et al.* (2011) investigaron la capacidad de los efectos angulares para mejorar los sistemas de clasificación terrestre utilizando firmas espectrales y angulares a partir de datos colectados por el sensor MODIS, mientras que Román *et al.* (2011) propusieron una nueva técnica para determinar la estructura y las propiedades ópticas de paisajes heterogéneos utilizando información multi-angular.

Por otra parte, Cano (2008) reportó la existencia de importantes zonas de traslape en la clasificación de sistemas arbolados a partir de datos obtenidos en un experimento realizado utilizando maquetas arbóreas en condiciones de laboratorio. Este autor analizó la respuesta espectral de especies vegetales contrastantes bajo diferentes configuraciones geométricas, niveles de cobertura y características del suelo. La estrategia de modelación seguida para caracterizar los efectos direccionales, parte de la propuesta introducida por Bolaños (2006) y la extiende para considerar la modelación de los ángulos acimutales. Ambos enfoques de modelación mostraron niveles de concordancia satisfactorios entre los valores de reflectancia medida y estimada.

En este trabajo se investigan dos aspectos en torno a la propuesta de modelación utilizada por Cano (2008); primero, se verifica el ajuste de este

modelo a datos multi-angulares captados por el sensor POLDER-1, después, a partir de él, se evalúa el aporte de la información multi-angular en la clasificación de coberturas terrestres.

El marco teórico a partir del cual se desarrollan modelos que describen el efecto de la geometría sol-sensor en la señal registrada por un sensor remoto espacial, se presenta como punto de partida en la revisión de literatura. Posteriormente, se describen los principales enfoques de modelación que han sido utilizados para abordar el problema; tres son las categorías que engloban los esfuerzos en la materia, a saber: modelos empíricos, modelos basados en principios físicos sobre la dispersión de la radiación solar incidente y modelos semi-empíricos. Un subconjunto de estos últimos, conocido como modelos semi-empíricos lineales, es presentado a detalle por constituir la principal herramienta de modelación utilizada en combinación con datos obtenidos a través de sensores remotos espaciales. La clasificación de la cobertura terrestre y su relación con modelos semi-empíricos lineales se discute a continuación. La revisión de literatura termina con la descripción del modelo que será evaluado en este trabajo.

La validación del modelo considerado en este estudio fue realizada mediante un ejercicio compuesto por dos etapas. En la primera se desarrolló un experimento de corte empírico al establecer una comparación entre el modelo analizado y algunos modelos semi-empíricos lineales, mientras que en la segunda, se utilizó información multi-angular obtenida por el sensor POLDER-1 para evaluar el comportamiento del modelo. La metodología aplicada es descrita en la sección 4.2 y los resultados obtenidos son analizados en la sección 5.

Finalmente, se presentan las conclusiones de la investigación en torno a dos ejes: la capacidad del modelo para caracterizar información multi-angular obtenida a través de un sensor remoto a bordo de una plataforma satelital y, el aporte que ésta ofrece al problema de clasificación de la cobertura terrestre.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Función de Distribución de la Reflectancia Bidireccional (BRDF)

El tratamiento de los efectos angulares en imágenes satelitales se realiza mediante el desarrollo de modelos que intentan describir las interacciones de la energía emitida por el sol con la superficie terrestre y su atmósfera, estos modelos representan aproximaciones a la Función de Distribución de la Reflectancia Bidireccional (BRDF, por sus siglas en inglés) introducida por Nicodemus *et al.* (1977). Los autores propusieron un marco teórico basado en el cálculo infinitesimal para caracterizar las propiedades geométricas de una superficie que refleja un haz de energía que incide sobre ella. Sus principales postulados son los siguientes:

- I. la cantidad de energía reflejada por una superficie es función de la cantidad de energía que incide, de la dirección de incidencia y de la dirección en que la energía es reflejada;
- II. la cantidad de energía que incide, a su vez, es función de la dirección de incidencia y,
- III. que el cociente de la función descrita en I respecto a la descrita en II, es la cantidad básica que caracteriza geoméricamente las propiedades reflectantes de la superficie. Dicho de otra manera:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \equiv \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (1)$$

donde θ y ϕ juntos indican una dirección; el subíndice r indica una cantidad asociada al flujo de energía reflejada, en tanto que el subíndice i representa lo propio en relación al flujo de energía incidente; E_i es energía incidente, L_r , es energía reflejada y d indica una cantidad diferencial.

La Función de Distribución de la Reflectancia Bidireccional o f_r puede ser representada esquemáticamente mediante un diagrama polar como el de la Figura 1, ya que solo depende de las direcciones de incidencia y de reflejo.

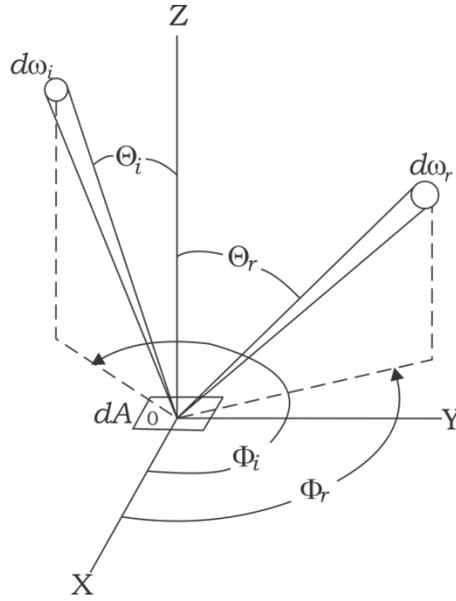


Figura 1. Geometría de un haz elemental incidente y de uno reflejado (Fuente: Nicodemus et al., 1977).

En la ecuación (2) se muestra una expresión general para caracterizar el cociente de la energía que es reflejada por una superficie en relación a la energía incidente (reflectancia) dada una configuración geométrica arbitraria. A diferencia de (1), en esta expresión, los flujos de energía reflejada e incidente son considerados a través de un intervalo angular susceptible de ser medido por un instrumento real, es decir, se consideran ángulos sólidos y no el diferencial de éstos. Los detalles sobre la obtención de esta expresión pueden ser encontrados en Nicodemus *et al.* (1977).

$$\rho(\omega_i; \omega_r; L_i) = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} = \frac{\int_{\omega_r} \int_{\omega_i} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) * L_i(\theta_i, \phi_i) * d\Omega_i * d\Omega_r}{\int_{\omega_i} L_i(\theta_i, \phi_i) * d\Omega_i} \quad (2)$$

donde $d\Omega \equiv \cos \theta * d\omega$ se conoce como un elemento de ángulo sólido proyectado.

Las integrales en el numerador indican que la cantidad de energía reflejada por un elemento diferencial de superficie dA se debe a:

- las contribuciones de cada dirección (θ_i, ϕ_i) contenidas en el ángulo sólido ω_i en el total de energía incidente, esto es:

$$d\Phi_i = dA * \int_{\omega_i} L_i(\theta_i, \phi_i) * d\Omega_i \quad (3)$$

- las contribuciones de cada dirección (θ_r, ϕ_r) contenidas en el ángulo sólido ω_r en el total de energía reflejada, es decir:

$$d\Phi_r = dA * \int_{\omega_r} L_r(\theta_r, \phi_r) * d\Omega_r \quad (4)$$

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = \int_{\omega_i} dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i) \quad (5)$$

$$dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i) = f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) * L_i(\theta_i, \phi_i) * d\Omega_i \quad (6)$$

De manera análoga, la integral en el denominador indica que la cantidad de energía incidente es la suma de las contribuciones de cada dirección dentro del ángulo sólido de incidencia.

2.1 Aproximaciones a la BRDF

Un problema fundamental en torno a la percepción remota, en particular considerando sensores montados en plataformas satelitales, es determinar a qué factores obedecen las variaciones en la señal registrada por estos instrumentos. De acuerdo con la planteado por Nicodemus *et al.* (1977), el proceso de dispersión de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre está gobernado por los ángulos con los cuales esta energía llega a la tierra, interactúa con los objetos en la superficie y posteriormente es reflejada y captada por el sensor. Por otro lado, ha sido ampliamente establecido que la gran mayoría de las coberturas terrestres presentan un comportamiento anisotrópico, por lo que el desarrollo de modelos que pretenden caracterizar este proceso ha sido guiado por el interés de capturar los factores responsables de la anisotropía. Li *et al.* (1996) clasifican estos modelos en empíricos, físicos y semi-empíricos.

Los modelos empíricos son funciones matemáticas que muestran un buen ajuste a los datos observados, son relativamente sencillos de desarrollar, pero sus parámetros carecen de significado en términos de los procesos físicos que caracterizan; los modelos físicos se formulan en función de la perspectiva que se adopte para describir la dispersión de la radiación solar que interactúa con el sistema SVA. El concepto de medio turbio, en teoría de transferencia radiativa (Ross, 1981), y la geometría de rayos paralelos para describir la propagación de la radiación, en óptica geométrica (Li y Strahler, 1986), constituyen las principales aproximaciones. Si se considera la primera, entonces la superficie observada es modelada como una o más capas paralelas de extensión infinita en donde los elementos dispersores son de un tamaño infinitesimal y están orientados aleatoriamente a lo largo de cada capa. La señal captada por el sensor es producto de las interacciones, simples o múltiples, de cada fotón con los elementos dispersores, por lo tanto depende de parámetros estructurales como el Índice de Área Foliar (IAF) y de parámetros radiométricos como la reflectancia del suelo y la reflectancia y transmitancia de las hojas. Por otro lado, si se opta por el segundo paradigma, se considera un conjunto de objetos geométricos (*e.g.* conos) colocados de forma aleatoria sobre la superficie observada, de manera tal que pueden traslaparse o pueden existir huecos de diversos tamaños entre ellos, dejando al descubierto porciones de suelo. En este caso, la señal captada por el sensor depende de los parámetros que caracterizan a cada objeto de manera individual (*e.g.* altura y ángulo del ápice para el caso de conos), de la densidad de objetos sobre la superficie, del ángulo de iluminación y de la reflectancia relativa de los objetos geométricos y de la superficie sobre la cual están colocados, tanto en condiciones de sombreado como de iluminación directa (Li y Strahler, 1985). La principal ventaja de utilizar modelos físicos es que describen el proceso de dispersión de la radiación incidente en forma explícita, por lo que es posible determinar información sobre las propiedades ópticas y la estructura geométrica de los objetos sobre la superficie; sin embargo, a menudo no son invertibles analíticamente y requieren información externa sobre el tipo de cobertura

observada, con lo cual su uso en aplicaciones operacionales se dificulta (Hu *et al.*, 1997). Finalmente, los modelos semi-empíricos, o modelos basados en kernels, pueden ser considerados como aproximaciones a los físicos; son matemáticamente más simples que éstos pero conservan sus características más importantes. En el contexto de aplicaciones que requieren el procesamiento de grandes volúmenes de imágenes satelitales, esta clase de modelos supera a las otras dos por al menos tres razones: (1) demandan una pequeña fracción de las capacidades de cómputo requeridas para el cálculo de modelos completamente físicos; (2) necesitan menos observaciones que los modelos empíricos para ser invertibles y (3) en caso de ser lineales pueden ser invertidos analíticamente. Los coeficientes obtenidos al invertir esta clase de modelos utilizando datos satelitales, no tienen un significado directo en términos de parámetros estructurales o biofísicos, sin embargo, ofrecen un indicador general de las propiedades estructurales de la superficie observada (Wanner *et al.*, 1995).

Bolaños (2006) propuso un enfoque diferente para caracterizar los efectos angulares sobre la cobertura vegetal terrestre. Este autor argumenta que el uso de modelos basados en kernels implica suponer condiciones de homogeneidad en el sistema SVA, lo cual no representa una situación común en la realidad, particularmente durante el periodo de crecimiento de la vegetación. Su propuesta se basa en la introducción de una variable de posición relativa que hace simétricos los patrones de variación de las reflectancias en el plano principal (*i.e.* diferencia de ángulos acimutales igual a cero) con respecto al punto donde el ángulo de visión y de iluminación coinciden (*hot spot*). Esta estrategia de modelación fue validada utilizando datos de experimentos en campo realizados en diferentes países del mundo (incluido México) con la finalidad de evaluar la influencia de la geometría sol-sensor en el proceso de dispersión de la energía solar incidente.

2.2 Modelos semi-empíricos lineales (SEL)

Los modelos SEL postulan que la señal registrada por un sensor a bordo de una plataforma satelital está constituida por tres elementos: un componente isotrópico, uno geométrico y uno volumétrico. Su construcción se basa en kernels, los cuales son expresiones matemáticas que dependen exclusivamente de la geometría sol-sensor, y en factores que incluyen información sobre las propiedades ópticas y estructurales de la superficie bajo consideración. Estos modelos fueron desarrollados con la intención de producir estimaciones de albedo y otros parámetros biofísicos en tiempo cuasi-real a partir de imágenes satelitales con resolución espacial entre los 250 y los 1,000 m, su estructura genérica es la siguiente:

$$R = f_{iso}k_{iso} + f_{geo}k_{geo} + f_{vol}k_{vol} \quad (7)$$

donde R representa la reflectancia medida por el sensor, la cual es producto de las contribuciones isotrópica (f_{iso}), geométrica (f_{geo}) y volumétrica (f_{vol}) en el proceso de dispersión de la radiación solar incidente. k_{iso} , k_{geo} y k_{vol} representan, respectivamente, un kernel isotrópico (por definición unitario), uno derivado a través de óptica geométrica y uno obtenido a través de teoría de transferencia radiativa. Los factores f permiten diferenciar la contribución de cada componente en el proceso de dispersión.

La generación del producto BRDF/Albedo a partir de datos colectados por los sensores MODIS y MISR, en el contexto de los esfuerzos realizados por el programa EOS, está basado en el uso de modelos semi-empíricos lineales. En particular, el modelo Ambrals BRDF (Algorithm for MODIS bidirectional reflectance anisotropy of the land surface), el cual está compuesto por cuatro kernels primarios, es utilizado para este propósito.

Los kernels contenidos en el modelo Ambrals BRDF ofrecen dos opciones para caracterizar la componente volumétrica en el proceso de dispersión (kernel Ross-Thin y Ross-Thick) y dos para caracterizar la componente geométrica (Li-

Sparse y Li-Dense). A continuación se describen las principales características de cada uno.

2.2.1 Kernel Ross-Thick

Bajo el enfoque de teoría de transferencia radiativa, en una aproximación de dispersión simple, este kernel describe las interacciones de la energía solar que incide sobre un dosel horizontal, homogéneo y denso ($IAF \gg 1$). Su expresión matemática es la siguiente:

$$R_{thick} = c_1 k_{thick} + c_2 \quad (8)$$

$$k_{thick} = \frac{(\pi/2 - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} - \frac{\pi}{4} \quad (9)$$

$$c_1 = \frac{4s}{3\pi} (1 - \exp\{-IAF * B\}) \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{s}{3} + \exp\{-IAF * B\} \left(\rho_0 - \frac{s}{3} \right) \quad (11)$$

donde R_{thick} representa el valor de la reflectancia bidireccional de acuerdo con la aproximación planteada; θ_s es el ángulo cenital de iluminación y θ_v el ángulo cenital de visión; ξ representa el ángulo de fase entre las direcciones de iluminación y de visión; IAF es el Índice de Área Foliar, s la reflectancia de las hojas, ρ_0 la reflectancia Lambertiana de la superficie y $B = 1/2 (\sec \theta_i + \sec \theta_v)$, es sustituido por un valor promedio, alrededor de 1.5, debido a que el valor del Índice de Área Foliar domina el argumento de la función exponencial en c_1 (Wanner *et al.*, 1995).

2.2.2 Kernel Ross-Thin

Este kernel fue desarrollado por Wanner *et al.* (1995). Describe las interacciones de la radiación incidente sobre un dosel con aperturas entre sus componentes de tal manera que los fotones viajan hasta la capa inferior para ser absorbidos por este medio o sufrir interacciones múltiples y ser irradiados hacia el sensor de manera isotrópica.

$$R_{thin} = c_1 k_{thin} + c_2 \quad (12)$$

$$k_{thin} = \frac{(\pi/2 - \xi) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta_s \cos \theta_v} - \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

$$c_1 = \frac{2sIAF}{3\pi} \quad (14)$$

$$c_2 = \frac{sIAF}{3} + \rho_l \quad (15)$$

donde ρ_l representa la reflectancia Lambertiana promedio de la capa debajo del dosel.

2.2.3 Kernel Li-Sparse

Este kernel describe el campo de radiación medido por un sensor en función de las características geométricas de los objetos sobre la superficie (*e.g.* esferoides) y de las distintas configuraciones bajo las cuales estos objetos son iluminados y observados. En su construcción se asume que no existe sombreado mutuo entre doseles, su formulación es la siguiente:

$$R_{sparse} = c_1 k_{sparse} + c_2 \quad (16)$$

$$k_{sparse} = O(\theta_s, \theta_v, \phi) - \sec \theta'_s - \sec \theta'_v + \frac{1}{2}(1 + \cos \xi') \sec \theta'_v \quad (17)$$

$$O = \frac{1}{\pi}(t - \sin t \cos t)(\sec \theta'_s + \sec \theta'_v) \quad (18)$$

$$\cos t = \frac{h}{b} \frac{(D^2 + (\tan \theta'_s \tan \theta'_v \sin \phi)^2)^{1/2}}{\sec \theta'_s + \sec \theta'_v} \quad (19)$$

$$D = (\tan^2 \theta'_s + \tan^2 \theta'_v - 2 \tan \theta'_s \tan \theta'_v \cos \phi)^{1/2} \quad (20)$$

$$\cos \xi' = \cos \theta'_s \cos \theta'_v + \sin \theta'_s \sin \theta'_v \cos \phi \quad (21)$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{b}{r} \tan \theta \right) \quad (22)$$

$$c_1 = C\lambda\pi r^2 \quad (23)$$

$$c_2 = C \quad (24)$$

donde t es un parámetro que permite expresar la ecuación de la elipse (proyección del dosel sobre la superficie) en forma paramétrica; b es el semi-eje mayor y h es la distancia desde el centro del esferoide hasta el suelo. θ' es una transformación que permite tratar los esferoides (dosel de los árboles) como esferas, r es el radio de dichas esferas, C es la reflectancia de la porción

iluminada del dosel, λ es la densidad de individuos presentes en la escena por unidad de área y ϕ es el acimut relativo entre las direcciones de iluminación y visión.

2.2.4 Kernel Li-Dense

Al igual que los dos anteriores, este kernel fue desarrollado por Wanner *et al.* (1995), quienes propusieron una serie de modelos SEL basados en estos kernels para ser utilizados en la generación de estimaciones de albedo a partir de los datos colectados con el sensor MODIS. Los principios de su derivación consideran la posibilidad de sombreado mutuo. Su estructura matemática es la siguiente:

$$R_{dense} = c_1 k_{dense} + c_2 \quad (25)$$

$$k_{dense} = \frac{(1 + \cos \xi) \sec \theta'_v}{\sec \theta'_v + \sec \theta'_s - O(\theta'_s, \theta'_v)} - 2 \quad (26)$$

$$O = \frac{1}{\pi} (t - \sin t \cos t) (\sec \theta'_s + \sec \theta'_v) \quad (27)$$

$$\cos t = \frac{h}{b} \frac{(D^2 + (\tan \theta'_s \tan \theta'_v \sin \phi)^2)^{1/2}}{\sec \theta'_s + \sec \theta'_v} \quad (28)$$

$$D = (\tan^2 \theta'_s + \tan^2 \theta'_v - 2 \tan \theta'_s \tan \theta'_v \cos \phi)^{1/2} \quad (29)$$

$$\cos \xi' = \cos \theta'_s \cos \theta'_v + \sin \theta'_s \sin \theta'_v \cos \phi \quad (30)$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{b}{r} \tan \theta \right) \quad (31)$$

$$c_1 = \frac{C}{2} \quad (32)$$

$$c_2 = C \quad (33)$$

Los kernels Li-Sparse y Li-Dense representan en realidad una familia de kernels; diferentes combinaciones de valores para los parámetros b/r y h/b originan una respuesta distinta para los valores de reflectancia. Cuatro combinaciones son las más comunes: (1) $b/r = 2.5$ y $h/b = 2.5$ para designar individuos altos cuyo dosel puede ser aproximado como un elipsoide con semi-eje mayor orientado verticalmente (prolato); (2) $b/r = 0.75$ y $h/b = 2.5$ individuos

altos con un dosel que puede ser modelado como un elipsoide cuyo semi-eje mayor está orientado horizontalmente (oblato); (3) $b/r = 2.5$ y $h/b = 1.5$ para designar individuos prolatos de baja estatura y, (4) $b/r = 0.75$ y $h/b = 1.5$ lo cual representa individuos oblatos de baja estatura (Wanner *et al.*, 1995).

Previo a la utilización operacional del modelo Ambrals BRDF se llevaron a cabo una serie de experimentos orientados a validar los supuestos implicados en su desarrollo. Wanner (1998) evaluó la precisión que podría ser alcanzada en las estimaciones de albedo a partir del muestreo angular ofrecido por los sensores MODIS y MISR considerando condiciones ideales de observación (ausencia de nubes, atmósfera y ruido). Para realizar este ejercicio, primero simuló la geometría de iluminación y visión de ambos instrumentos en distintas latitudes y diferentes días del año; después, utilizando una aproximación numérica a la solución de la ecuación de transferencia radiativa mediante el método de Ordenadas Discretas, generó valores de reflectancia para seis tipos de cobertura terrestre con distintas características: (1) pastos y cultivos de cereales; (2) matorrales semi-áridos; (3) cultivos de hoja ancha; (4) sabana; (5) bosque de hoja ancha y (6) bosque de hoja acicular (Myneni *et al.*, 1997). Los datos generados mediante este esquema de modelación fueron utilizados para invertir el modelo Ambrals BRDF.

Puesto que las estimaciones de albedo son obtenidas mediante la integración de la BRDF, tanto en el hemisferio de observación como en el de iluminación, un factor importante evaluado fue la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento de la reflectancia en geometrías donde no se realizaron mediciones, principalmente en el hemisferio de iluminación. Los resultados obtenidos a través de esta comparación, modelo a modelo, señalan que el porcentaje de error en las estimaciones de albedo es de alrededor del 10% (Lucht, 1998).

Por otro lado, Hu *et al.* (1997) realizaron una validación de las expresiones matemáticas (kernels) contenidas en el modelo Ambrals BRDF a partir de datos

obtenidos con sensores remotos aéreos multi-angulares. La información fue colectada con diferentes instrumentos bajo distintas configuraciones de la geometría sol-sensor; los porcentajes de cobertura variaron desde suelo desnudo, con distintos niveles de rugosidad, hasta niveles cercanos al 100% de cobertura; las especies vegetales muestreadas incluyen cultivos, pastizales y bosques boreales. Los resultados obtenidos muestran niveles de concordancia entre los valores de reflectancia medidos y estimados superiores al 90%.

El algoritmo implementado en el modelo Ambrals BRDF combina datos de reflectancia de la superficie terrestre captados por los sensores MODIS y MISR para ajustar los cuatro modelos que pueden ser formados mediante la combinación de los kernels antes descritos; la calibración se realiza en siete bandas espectrales a una resolución espacial de 1 km cada 16 días y se eligen los kernels que presenten la estimación más baja del error cuadrático medio (ECM) durante el proceso de inversión. Posteriormente, las integrales direccional-hemisférica (*black-sky albedo*) y bi-hemisférica (*white-sky albedo*) del modelo construido son calculadas (Strahler *et al.*, 1996).

2.3 Esquemas de clasificación de la cobertura terrestre basados en modelos SEL

Los parámetros obtenidos tras la inversión de modelos semi-empíricos lineales han sido utilizados para analizar las contribuciones de la información multi-angular al problema de clasificación de coberturas terrestres. Este enfoque está soportado en los argumentos de Zhang *et al.* (2002) en torno a la existencia de tres métricas (ubicación, pendiente e intercepción) que caracterizan ciertos tipos de cobertura de manera unívoca en espacios espectrales como el formado con las bandas rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC). Otro argumento a favor del uso de esta fuente de información es presentado por Chopping *et al.* (2011), quienes demostraron la utilidad de la información multi-angular en la estimación de parámetros estructurales como la fracción de cobertura y altura

promedio del dosel, así como en la estimación de biomasa aérea, a partir de datos captados por los sensores MODIS y MISR.

Bacour y Bréon (2005) estudiaron la variabilidad de la información multi-angular colectada por el sensor POLDER-1 en función de las clases de cobertura terrestre propuestas por Myneni *et al.* (1997) buscando identificar patrones angulares distintivos de cada clase. Con este propósito, analizaron espacios espectrales formados con los parámetros (f_{iso} , f_{geo} y f_{vol}) obtenidos al invertir varios modelos SEL. Los modelos semi-empíricos lineales fueron construidos mediante la combinación de los kernels contenidos en el modelo Ambrals BRDF; aunque la inversión se realizó para todas las bandas disponibles en el sensor, el análisis se centró en las bandas del R e IRC, por ser éstas las que contienen mayor información sobre las propiedades ópticas de la vegetación y la cantidad presente en la escena. Los resultados reportados por los autores señalan que la información contenida en estos parámetros no contribuye de manera significativa a mejorar la capacidad de discernimiento de diferentes coberturas terrestres. En línea con estas conclusiones, Jiao *et al.* (2011) reportaron que el mayor contenido de información, en torno al tipo de cobertura observada, lo posee el dominio espectral, aunque identificaron un incremento en la precisión de la clasificación cercano al 6% al incluir información sobre la anisotropía de la superficie descrita mediante una variante del modelo Ross-Thin y Li-Sparse (modelo Ross-Thin y Li-Sparse Recíproco). La región estudiada está localizada en Alberta, Canadá; cuenta con una topografía relativamente plana y contiene tipos de cobertura que van desde superficies herbáceas hasta bosques con diferentes características del suelo.

Finalmente, existen propuestas para abordar el problema que descansan sobre la base de modelos semi-empíricos no lineales. Un modelo de esta naturaleza que ha sido utilizado para estudiar los patrones exhibidos por la vegetación, considerando información satelital multi-angular, es el modelo Rahman-Pinty-Verstraete (RPV) (Rahman *et al.*, 1993). Wanner *et al.* (1995) discuten algunas

bondades de este modelo, pero señalan que para ser invertido requiere de aproximaciones numéricas, a diferencia de los modelos lineales que pueden ser invertidos analíticamente. Hill *et al.* (2008) muestran la aplicación de una versión modificada del modelo RPV en el estudio de un ecosistema con individuos de dosel escaso y un sotobosque herbáceo (*i.e.* sabana) en el norte de Australia. Los parámetros de los cuales depende - amplitud (ρ_0), forma (k) y asimetría (θ) - mostraron patrones espaciales detallados. En particular, el parámetro de asimetría, exhibió variaciones consistentes entre pastizales, porciones dominadas por individuos de dosel cerrado y mezclas de estos dos tipos de vegetación a lo largo de la zona de estudio. Los autores señalan que existe el potencial de obtener una descripción cuantitativa de los tipos de vegetación presentes en un ecosistema con estas características a partir de información captada con sensores remotos multi-angulares; sin embargo, recomiendan contrastar los productos generados con datos obtenidos a través de mediciones en campo o datos generados con LiDAR.

2.4 Modelo Uni-Paramétrico de la BRDF (UPB)

El modelo UPB fue desarrollado siguiendo una perspectiva diferente a la de los modelos que han sido discutidos en las secciones anteriores. No es un modelo físico en tanto que no atiende a las propiedades ópticas y estructurales de los objetos responsables del proceso de dispersión; tampoco se trata de un modelo semi-empírico, pues su derivación no proviene de simplificaciones hechas a uno de los dos paradigmas antes descritos: teoría de transferencia radiativa u óptica geométrica. Finalmente, no es un modelo empírico ya que no comparte las características y limitaciones de éstos; solo depende de un parámetro, el cual puede ser estimado con la información implicada en la adquisición de una medición (valor de reflectancia y geometría sol-sensor).

Los principios subyacentes en la derivación del modelo Uni-Paramétrico de la BRDF son discutidos en Bolaños (2006). El autor parte de la geometría sol-sensor (Figura 2) y de la simetría sugerida por el *hot spot* cuando se analiza el

comportamiento de las reflectancias en el plano principal como función del ángulo de visión (Figura 3). Su propuesta se basa en la introducción de una variable de posición relativa que depende de θ_v y θ_s la cual permite estimar el valor de reflectancia, para las bandas R e IRC a nadir ($\theta_v = 0^\circ$), independientemente de la geometría con la que fue realizada la medición.

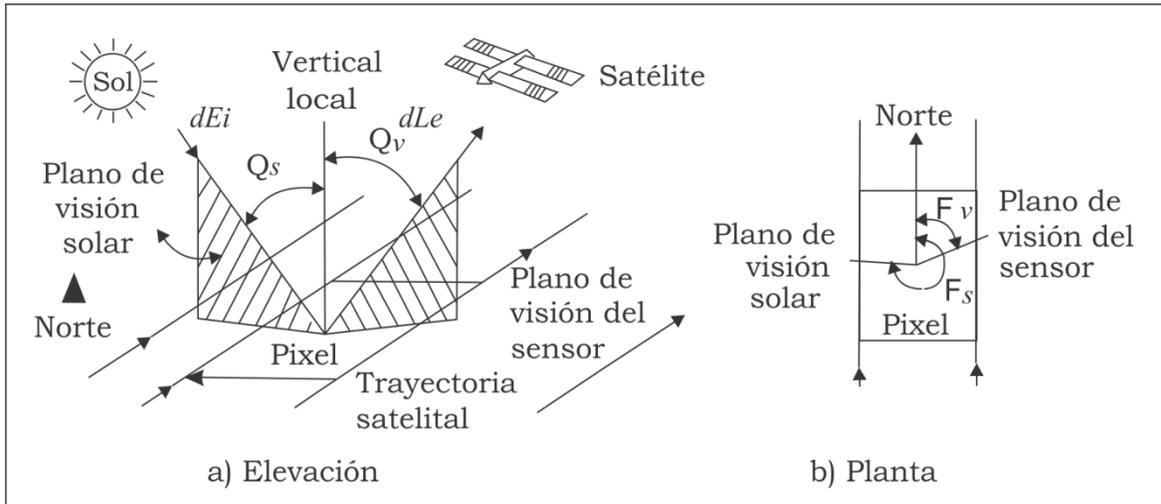


Figura 2. Geometría sol-sensor.

La propuesta de Bolaños (2006) no contempla la modelación de los ángulos acimutales, sin embargo, esta consideración no representa una limitante ya que, para un ángulo de visión a nadir, la reflectancia es independiente del acimut relativo (Paz y Bolaños, 2004).

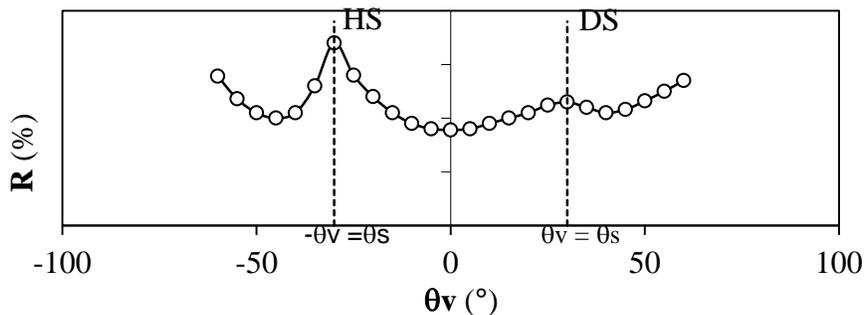


Figura 3. Variación de la reflectancia con el ángulo de observación en el plano principal.

Cano (2008) generalizó el modelo de los ángulos cenitales propuesto por Bolaños (2006) para ser aplicado en todas las bandas del espectro

electromagnético contenidas entre las porciones del visible y del infrarrojo. Además, siguiendo un enfoque análogo al de los ángulos cenitales, propuso un esquema de modelación para los acimutales. Las dos componentes del modelo se muestran a continuación:

Modelación de los ángulos cenitales

$$\chi = 90 - \theta_v + \theta_s \quad (34)$$

$$R_n = \ln(R) * \cos(\chi) \quad (35)$$

$$\chi = a - gR_n \quad (36)$$

Modelación de los ángulos acimutales

$$d\phi = \phi_v - \phi_s \quad (37)$$

$$\text{Si } d\phi \leq 180 \rightarrow d\phi_p = d\phi \quad (38)$$

$$\text{Si } d\phi > 180 \rightarrow d\phi_p = 360 - d\phi \quad (39)$$

$$\text{Si } d\phi_p \leq 90 \rightarrow \zeta = d\phi_p + \theta_s \quad (40)$$

$$\text{Si } d\phi_p > 90 \rightarrow \zeta = d\phi_p - \theta_s \quad (41)$$

$$g_n = g * \cos(\zeta) \quad (42)$$

$$\zeta = A - Gg_n \quad (43)$$

Donde θ y ϕ representan los ángulos cenitales y acimutales, respectivamente, con v indicando el correspondiente al sensor (visión) y s el correspondiente al sol (iluminación), $d\phi$ es el ángulo acimutal relativo; a y A son constantes propuestas por el modelo con valor igual a 90° ; R_n y g_n indican el valor de la reflectancia normalizada por efecto de ángulos cenitales y por efectos de ambos tipos de ángulo (cenitales y acimutales), respectivamente; χ y ζ , en conjunto con la reflectancia normalizada, determinan el espacio de análisis propuesto por este esquema de modelación. Por último, g y G representan el parámetro a estimar en cada componente del modelo: g captura la variaciones angulares de la señal registrada por el sensor debidas a los ángulos cenitales, mientras que G contiene la misma información pero asociada a la geometría completa del problema (ángulos cenitales y acimutales).

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1 Objetivo

Evaluar la factibilidad de clasificar tipos de cobertura terrestre utilizando datos multi-angulares obtenidos con el sensor POLDER-1 y el parámetro G del modelo Uni-Paramétrico de la BRDF.

3.2 Hipótesis

El modelo Uni-Paramétrico de la BRDF puede ser ajustado a partir de información obtenida por un sensor remoto espacial y el parámetro G es sensible a la anisotropía de la superficie terrestre.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales

4.1.1 Comportamiento dispersor de la cobertura terrestre a través de simulaciones

Los kernels contenidos en el modelo Ambrals BRDF son utilizados para formar cuatro modelos semi-empíricos lineales: Ross-Thin y Li-Sparse; Ross-Thin y Li-Dense; Ross-Thick y Li-Sparse, y Ross-Thick y Li-Dense. Cada uno de éstos permite caracterizar el comportamiento dispersor de la cobertura terrestre considerando diferentes propiedades ópticas de los elementos dispersores y distintos arreglos geométricos de los individuos presentes en la escena.

Un primer conjunto de escenarios fue simulado al proponer valores para los factores isotrópico, geométrico y volumétrico de cada modelo; se utilizaron tres geometrías de iluminación (0° , 30° y 60°) y el intervalo de observación osciló entre los 0° y los 60° , con incrementos de 5° . Las expresiones matemáticas de los factores para cada modelo se muestran en el Cuadro 10, mientras que los valores asignados a sus parámetros se enlistan en el Cuadro 11.

Cuadro 10. Expresiones matemáticas de los factores para cada modelo utilizado en las simulaciones.

Factores	Modelos			
	Ross-Thin y Li-Sparse	Ross-Thin y Li-Dense	Ross-Thick y Li-Sparse	Ross-Thick y Li-Dense
Isotrópicos	$\alpha C + (1 - \alpha) \left(\frac{sIAF}{3} + \rho_l \right)$		$\alpha C + (1 - \alpha) \left(\frac{s}{3} + \exp\{-IAF * B\} \left(\rho_0 - \frac{s}{3} \right) \right)$	
Volumétricos	$(1 - \alpha) \frac{2sIAF}{3\pi}$		$(1 - \alpha) \frac{4s}{3\pi} (1 - \exp\{-IAF * B\})$	
Geométricos	$\alpha C \lambda \pi r^2$	$\alpha \frac{C}{2}$	$\alpha C \lambda \pi r^2$	$\alpha \frac{C}{2}$

Cuadro 11. Valores utilizados en la simulación de escenarios.

Modelos	Parámetros										
	IAF	s	ρ_t	ρ_0	C	λ	r	α	$(1-\alpha)$	b/r	h/b
Ross-Thin y Li-Sparse	0.1	0.4	0.6	--	0.4	0.2	1.0	0.5	0.5	0.75	1.5
Ross-Thin y Li-Dense	0.1	0.7	0.3	--	0.7	--	--	0.5	0.5	0.75	1.5
Ross-Thick y Li-Sparse	6.0	0.7	--	0.3	0.7	0.2	1.0	0.5	0.5	0.75	1.5
Ross-Thick y Li-Dense	6.0	0.7	--	0.3	0.7	--	--	0.5	0.5	0.75	1.5

Posteriormente se generó un mayor número de escenarios considerando variaciones en los parámetros ópticos y estructurales de cada modelo; el objetivo de éstos fue estudiar el comportamiento dispersor en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano. En este caso, la geometría de iluminación varió entre los 0° y los 45° con incrementos de 15° , mientras que el intervalo de observación entre los 0° y los 50° con pasos de 5° . El Cuadro 12 muestra los valores asignados a los parámetros para este propósito.

El sensor POLDER fue diseñado para recolectar mediciones de la energía solar dispersada por la superficie terrestre y su atmósfera en ocho bandas del espectro electromagnético, tres de las cuales poseen filtros para medir la polarización de ésta (ver Cuadro 8); su geometría de medición muestrea un intervalo angular cenital cercano a los $\pm 70^\circ$ y el rango acimutal completo. La primera versión, el POLDER-1, estuvo operacional por un periodo de ocho meses comprendido entre noviembre de 1996 y junio de 1997 (Lacaze, 2006). En la siguiente sección se describe una base de datos compilada a partir de estas mediciones la cual permite estudiar el comportamiento dispersor de ecosistemas continentales.

Cuadro 12. Valores utilizados para simular la dispersión en las bandas R e IRC considerando distintos niveles de cobertura.

Parámetros	Modelos			
	Ross-Thin y Li-Sparse	Ross-Thin y Li-Dense	Ross-Thick y Li-Sparse	Ross-Thick y Li-Dense
s_r	0.05, 0.07, 0.09	0.06, 0.08, 0.1	0.04, 0.06, 0.08	0.05, 0.07, 0.09
C_r	0.03, 0.06, 0.09	0.03, 0.06, 0.09	0.025, 0.045, 0.065	0.02, 0.04, 0.06
ρ_{0r}	--	--	0.05, 0.07, 0.09	0.03, 0.05, 0.07
ρ_{tr}	0.04, 0.06, 0.08	0.05, 0.07, 0.09	--	--
λ	0.5, 0.7, 0.9	--	0.5, 0.7, 0.9	--
IAF	0.4, 0.6, 0.8	0.3, 0.6, 0.9	4.0, 6.0, 8.0	4.0, 6.0, 8.0
r	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7
b/r	0.3, 0.5, 0.7	0.75, 1.0, 1.25	0.75, 1.0, 1.25	0.75, 1.0, 1.25
h/b	0.5, 0.7, 0.9	1.0, 1.25, 1.5	1.0, 1.25, 1.5	1.0, 1.25, 1.5
α	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7
$(1 - \alpha)$	0.7, 0.5, 0.3	0.7, 0.5, 0.3	0.7, 0.5, 0.3	0.7, 0.5, 0.3
s_{irc}	0.4, 0.55, 0.7	0.35, 0.55, 0.75	0.45, 0.7, 0.95	0.45, 0.7, 0.95
C_{irc}	0.15, 0.30, 0.45	0.20, 0.35, 0.50	0.35, 0.50, 0.65	0.23, 0.53, 0.83
ρ_{0irc}	--	--	0.1, 0.2, 0.3	0.1, 0.2, 0.3
ρ_{lirc}	0.1, 0.2, 0.3	0.1, 0.2, 0.3	--	--

4.1.2 Base de datos BRDF POLDER-1

Los datos obtenidos por el sensor POLDER-1 fueron manipulados para generar productos con distinto nivel de procesamiento. El producto más básico (nivel 1) consiste en la calibración, geo-referenciación y proyección de los datos sobre una malla geográfica la cual es utilizada como sistema de referencia en las etapas sucesivas del procesamiento (Hagolle *et al.*, 2006).

El producto nivel 2 toma como insumo los datos del nivel anterior e información auxiliar para generar reflectancias bidireccionales de la superficie terrestre; el algoritmo aplicado incluye detección de nubes y correcciones por absorción gaseosa, aerosoles troposféricos y moléculas de vapor de agua (Leroy *et al.*, 1997).

Los principios de diseño de este instrumento permiten que la señal registrada incida de manera casi perpendicular sobre los detectores, lo cual conduce a una resolución espacial aproximadamente constante a lo largo de todo el espacio de muestreo. Ésta y otras características (área constante, forma de píxel cercana a un cuadrado y paso de muestreo cercano a la resolución de POLDER) fueron consideradas en la elección del sistema de proyección Samson Flamsteed para construir la malla de referencia terrestre POLDER, la cual se muestra en la Figura 4 (Hagolle *et al.*, 2006).

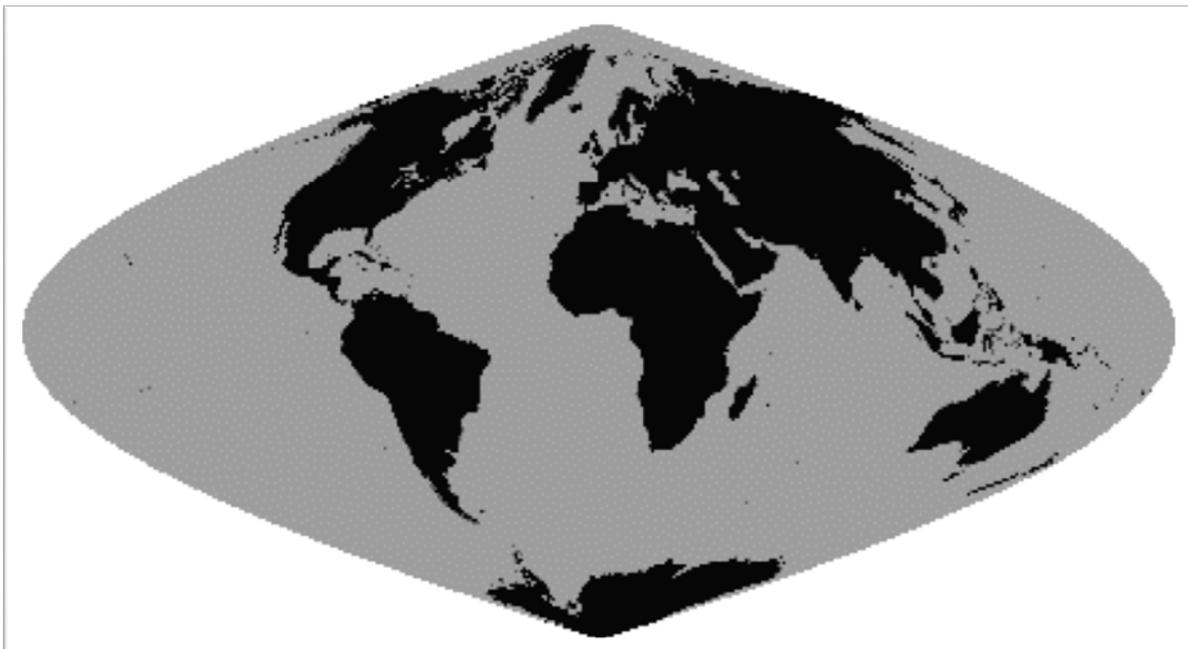


Figura 4. Malla de referencia terrestre POLDER.

La base de datos BRDF POLDER-1 fue construida a partir de las reflectancias bidireccionales de la superficie terrestre (datos nivel 2) en las bandas 443, 565, 670, 765 y 865 nm, considerando los 22 biomas identificados en el contexto del proyecto Global Land Cover 2000 (GLC2000) (JRC, 2003). Esta iniciativa promovió un esquema de clasificación regional privilegiando el conocimiento de los expertos locales; se utilizaron imágenes captadas por el sensor VEGETATION a bordo del satélite SPOT-4 y etiquetamiento basado en el Land Cover Classification System (LCCS), el cual posee una estructura jerárquica que permite la agregación de las clases hacia la escala global (Lacaze, 2006). Los biomas identificados por el GLC2000 se enlistan en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Etiquetas asociadas a los tipos de vegetación identificados por el GLC2000.

Etiqueta	Descripción
1	Cobertura arbórea, hoja ancha, perenne.
2	Cobertura arbórea, hoja ancha, caducifolio, cerrado.
3	Cobertura arbórea, hoja ancha, caducifolio, abierto.
4	Cobertura arbórea, hoja pinácea, perenne.
5	Cobertura arbórea, hoja pinácea, caducifolio.
6	Cobertura arbórea, tipo de hoja mixta.
7	Cobertura arbórea, regularmente inundado, agua dulce.
8	Cobertura arbórea, regularmente inundado, agua salada (variación diaria).
9	Mosaico: cobertura arbórea/otra vegetación natural.
10	Cobertura arbórea, quemado.
11	Cobertura de arbustos, cerrada-abierta, perenne, con o sin estrato arbóreo escaso.
12	Cobertura de arbustos, cerrada-abierta, caducifolio, con o sin estrato arbóreo escaso.
13	Cobertura herbácea, cerrada-abierta.
14	Arbustos dispersos o escasa cubierta herbácea.
15	Arbustos regularmente inundados y/o cobertura herbácea.
16	Áreas cultivadas y manejadas.
17	Mosaico: tierras de cultivo/cobertura arbórea/otra vegetación natural.
18	Mosaico: tierras de cultivo/ arbusto y/o cobertura herbácea.
19	Áreas descubiertas.
20	Cuerpos de agua (naturales y artificiales).
21	Nieve y hielo (natural y artificial)
22	Superficies artificiales y áreas asociadas.

Fuente: Lacaze, 2006.

Los píxeles seleccionados para la construcción de la base de datos fueron clasificados de acuerdo con los siguientes criterios:

- los 22 biomas propuestos por el GLC2000;
- el periodo de medición (YYYYMM), donde YYYY corresponde al año y MM al mes de adquisición;
- El valor de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), el cual fue agrupado en clases desde -0.2 hasta 1.0 con incrementos de 0.1, y
- la ubicación del píxel en 5 bandas de latitud (90°N-50°N; 50°N-30°N; 30°N-30°S; 30°S-50°S; 50°S-90°S).

La base de datos es ofrecida al público en archivos almacenados en una estructura de directorios que refleja los criterios de clasificación antes expuestos: los directorios son nombrados GLC_XX, donde XX corresponde al bioma en la clasificación del GLC2000 y a los subdirectorios se le asigna el nombre YYYYMM, indicando el año y mes de adquisición. Los archivos representan píxeles individuales en la malla de referencia terrestre POLDER y son nombrados brdf_ndviXX.LLLL_CCCC.dat; la clase de NDVI (XX) toma valores entre 01 y 12, representando los intervalos [-0.2, -0.1] y [0.9, 1.0], respectivamente, mientras que LLLL y CCCC indican la ubicación, en términos de coordenadas línea-columna, en la malla. Las columnas contenidas en estos archivos, así como su significado, se muestran en el Cuadro 14 (Lacaze, 2006).

Cuadro 14. Contenido de los archivos en la base de datos BRDF POLDER-1.

Columna	Significado
d	Día del mes (1-31)
θ_s	Ángulo cenital solar (grados)
ϕ_s	Ángulo acimutal solar (grados)
θ_v	Ángulo cenital de visión (grados)
ϕ	Ángulo acimutal relativo (grados)
R_{443}	Reflectancia de la superficie observada a 443 nm
R_{565}	Reflectancia de la superficie observada a 565 nm
R_{670}	Reflectancia de la superficie observada a 670 nm
R_{765}	Reflectancia de la superficie observada a 765 nm
R_{865}	Reflectancia de la superficie observada a 865 nm

4.2 Metodología

El modelo Uni-Paramétrico de la BRDF ha sido validado con información obtenida a través de experimentos en campo (Bolaños, 2006) y en laboratorio (Cano, 2008). Para evaluar la respuesta de este modelo con datos obtenidos por un sensor remoto a bordo de una plataforma satelital, se analizaron las bases de datos presentadas en la sección anterior. El procedimiento utilizado para el caso de las simulaciones se describe en la sección 4.2.1, mientras que el correspondiente a la base de datos BRDF POLDER-1 se muestra en las secciones 4.2.2 y 4.2.3.

4.2.1 Evaluación del modelo UPB a partir de escenarios de dispersión simulados

Los modelos semi-empíricos lineales describen la dispersión de la energía que interactúa con el sistema SVA mediante la suma de una contribución isotrópica con una suma ponderada de contribuciones atribuibles a factores geométricos y volumétricos (ecuación 7). Así, por ejemplo, el modelo Ross-Thin y Li-Sparse puede ser usado para representar ecosistemas con individuos de dosel escaso y un sotobosque herbáceo; en tanto que el Ross-Thick y Li-Dense, podría describir la dispersión de la energía solar incidente sobre una zona boscosa poblada por un gran número de individuos de dosel cerrado. La representación de un medio dominado por la componente geométrica o volumétrica se logra modificando el valor del parámetro α ; un valor de éste cercano a cero implica un medio donde la componente volumétrica domina el proceso de dispersión, como un pastizal, por ejemplo.

Los datos generados a través de las simulaciones descritas en la sección 4.1.1 fueron analizados mediante regresión lineal simple considerando las tres geometrías de iluminación propuestas (0° , 30° y 60°) por separado en cada uno de los modelos. Posteriormente, se comparó un sub-conjunto de valores de reflectancia producidos al aplicar las relaciones mostradas en las ecuaciones

(44) y (45) sobre los valores generados con la información mostrada en el Cuadro 3:

$$Rn_{SEL} = \ln(R) * \cos(\chi) \quad (44)$$

$$Rn_{UPB} = \frac{90 - \chi}{g} \quad (45)$$

donde Rn_{SEL} representa el valor de reflectancia normalizado que se asocia a uno de los modelos semi-empíricos lineales utilizados; R es la reflectancia producida por dicho modelo; χ es la variable de posición relativa asociada a la modelación de los ángulos cenitales propuesta en el modelo UPB; Rn_{UPB} la reflectancia normalizada por éste y g el parámetro a estimar cuando se considera la geometría cenital.

4.2.2 Patrones espectrales, angulares y temporales de la vegetación

Paz *et al.* (2005) mostraron que, para una geometría sol-sensor específica, la dinámica de crecimiento de la vegetación puede ser analizada en espacios espectrales construidos combinando bandas en la porción del visible y del infrarrojo cercano. En la Figura 5 se muestran simulaciones radiativas que representan el crecimiento de un cultivo agrícola en el espacio R e IRC y en el definido por las bandas azul (A) y rojo (R).

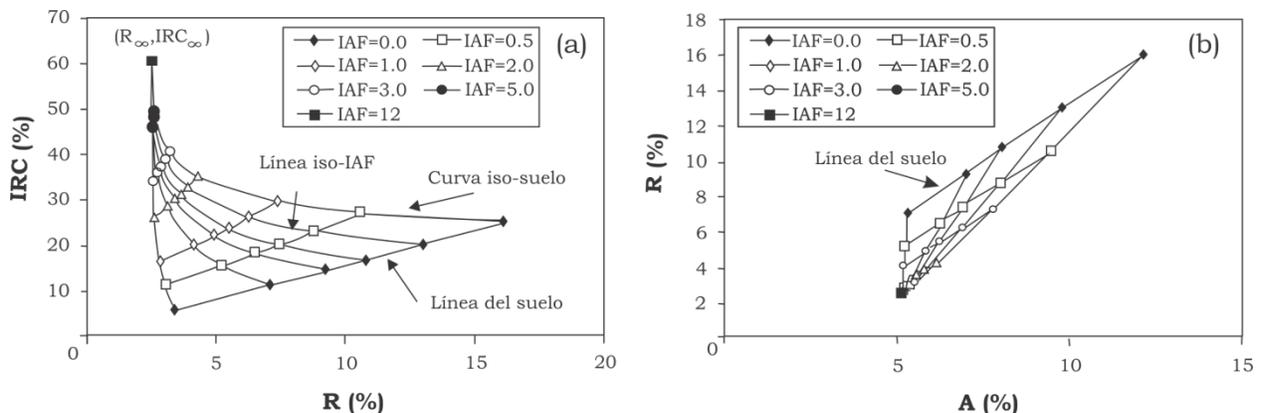


Figura 5. Crecimiento de la vegetación en los espacios R-IRC y A-R.

Si se consideran las dos condiciones extremas de la dinámica, suelo desnudo y suelo completamente cubierto, entonces es posible establecer que el crecimiento de la vegetación se expresa a través de líneas rectas (iso-IAF) cuya pendiente, intercepción y longitud varía en el tiempo.

Cano (2008) sugirió que las variaciones angulares en la reflectancia, asociadas a diferentes configuraciones de la geometría sol-sensor, son capturadas por el parámetro G del modelo UPB. Utilizando maquetas arbóreas demostró que las relaciones de este parámetro para las bandas R e IRC, pueden ser utilizadas en la discriminación de especies con diferentes tipos de hoja, siempre y cuando permanezcan constantes las propiedades del suelo y la cobertura área.

La información de los dominios espectral, angular y temporal, contenida en la base de datos BRDF POLDER-1, fue analizada bajo este enfoque al ajustar el modelo UPB a nivel diario para cada píxel. En la siguiente sección se describe este proceso.

4.2.3 Caracterización de biomas utilizando la información contenida en la base de datos BRDF POLDER-1

La geometría de observación para un mismo píxel contenido en la base de datos implica hasta catorce ángulos cenitales y acimutales diferentes del sensor, mientras que los correspondientes al sol permanecen fijos. En la Figura 6 se muestra el contenido de un archivo (píxel) y en la Figura 7 se ilustran un par de ejemplos sobre la variación angular de las observaciones en el espacio formado por el ángulo cenital de visión y el acimut relativo.

1	d	θ_s	ϕ_s	θ_v	ϕ	R443	R565	R670	R765	R865
2	4	16.9	119.28	47.7	119.9	0.066	0.11	0.129	0.151	0.157
3	4	16.9	119.28	41.7	122.8	0.074	0.121	0.144	0.159	0.16
4	4	16.9	119.28	34.9	127.2	0.077	0.122	0.146	0.161	0.161
5	4	16.9	119.28	27.4	134.4	0.078	0.133	0.156	0.168	0.167
6	4	16.9	119.28	19.8	148.1	0.083	0.133	0.16	0.169	0.169
7	4	16.9	119.28	14	177.1	0.083	0.132	0.159	0.17	0.172
8	4	16.9	119.28	14.2	220.1	0.084	0.136	0.161	0.174	0.176
9	4	16.9	119.28	20.2	248	0.085	0.136	0.16	0.177	0.178
10	4	16.9	119.28	27.8	261.2	0.083	0.13	0.155	0.172	0.174
11	4	16.9	119.28	35.2	268.2	0.082	0.127	0.147	0.167	0.171
12	4	16.9	119.28	41.9	272.5	0.075	0.118	0.141	0.156	0.161
13	4	16.9	119.28	47.8	275.4	0.073	0.114	0.138	0.152	0.157
14	8	19	120.7	44.7	104.7	0.081	0.135	0.154	0.158	0.161
15	8	19	120.7	38	104.2	0.084	0.122	0.155	0.176	0.181
16	8	19	120.7	30.3	103.2	0.084	0.138	0.162	0.176	0.182
17	8	19	120.7	21.5	101.2	0.101	0.146	0.172	0.187	0.19
18	8	19	120.7	11.9	95.4	0.099	0.154	0.178	0.192	0.191
19	8	19	120.7	2.9	42.7	0.103	0.152	0.181	0.198	0.198
20	8	19	120.7	9.6	303.8	0.106	0.155	0.184	0.2	0.203
21	8	19	120.7	19.4	295.8	0.098	0.151	0.18	0.198	0.2
22	8	19	120.7	28.4	293.3	0.094	0.144	0.171	0.188	0.189
23	8	19	120.7	36.3	292.2	0.093	0.133	0.157	0.174	0.179
24	8	19	120.7	43.2	291.6	0.092	0.13	0.147	0.167	0.174

Figura 6. Mediciones del sensor POLDER en el píxel 1756-1832 correspondientes a noviembre de 1996.

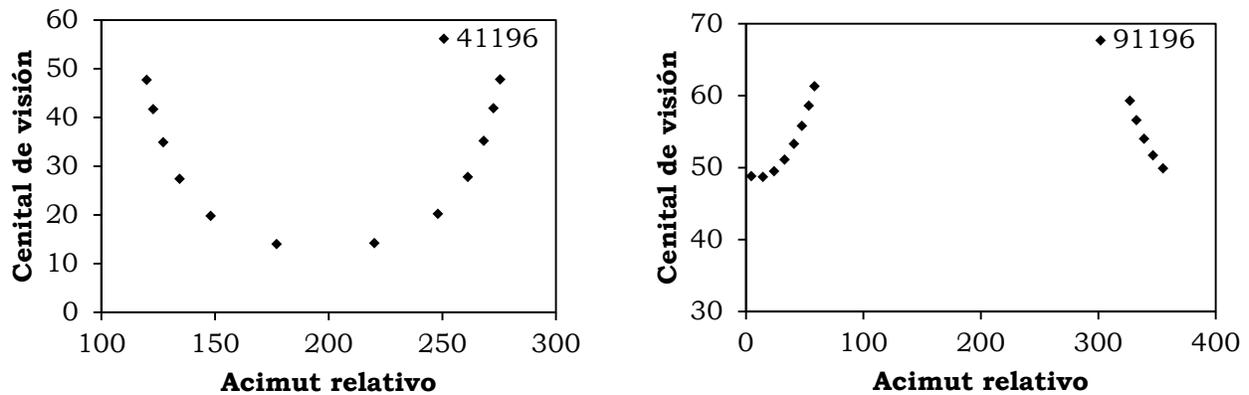


Figura 7. Geometría de observación POLDER

El algoritmo utilizado para ajustar el modelo UPB a la base de datos BRDF POLDER-1 se describe a continuación:

1. Calcular ζ de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$\text{Si } \phi \leq 180 \rightarrow \phi_p = \phi \quad (46)$$

$$\text{Si } \phi > 180 \rightarrow \phi_p = 360 - \phi \quad (47)$$

$$\text{Si } \phi_p \leq 90 \rightarrow \zeta = \phi_p + \theta_s \quad (48)$$

$$Si \phi p > 90 \rightarrow \zeta = \phi p - \theta_s \quad (49)$$

2. Estimar g_n en función de R como $g_n = \ln(R) * \cos(\zeta)$; la función logaritmo natural considera el efecto de distorsión espacial en el píxel.
3. La modelación de los ángulos acimutales propuesta por el modelo UPB sugiere una relación lineal entre las variables ζ y g_n (ecuación 43). A través de la información disponible en la base de datos, es posible determinar la pendiente de esta relación (G) de manera análoga a lo expuesto en la sección anterior.
4. Proponer una geometría de estandarización para las reflectancias de acuerdo con las ecuaciones (34) y (37):

$$\phi_{Est} = 0^\circ \therefore \zeta_{Est} = \theta_{S_{Est}} \quad (50)$$

$$\chi_{Est} = 90^\circ - \theta_{V_{Est}} + \theta_{S_{Est}} \quad (51)$$

$$\theta_{V_{Est}} = 0^\circ \text{ y } \theta_{S_{Est}} = 40^\circ \quad (52)$$

5. Conocidos G , ζ_{Est} y χ_{Est} , se estima el valor de la reflectancia normalizada para cada banda de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$gn = \frac{90^\circ - \zeta_{Est}}{G} \quad (53)$$

$$g = \frac{gn}{\cos(\zeta_{Est})} \quad (54)$$

$$R_n = \frac{90^\circ - \chi_{Est}}{g} \quad (55)$$

Los estadísticos utilizados para evaluar el ajuste son la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM) y el error relativo medio (ERM):

$$RECM = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Rn_{med} - Rn_{est})^2 \right\}^{0.5} \quad (56)$$

$$ERM = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Rn_{med} - Rn_{est}}{Rn_{med}} \right| \right\} * 100 \quad (57)$$

Adicionalmente se realizó una regresión lineal simple entre los valores de la reflectancia normalizada medida y la estimada al ajustar el modelo:

$$Rn_{est} = c + dRn_{med} \quad (58)$$

Los parámetros c y d , junto con el coeficiente de correlación (R^2), fueron calculados para todas las bandas y todas las clases de cobertura a nivel diario.

En el análisis realizado se excluyeron situaciones anómalas, a saber:

- Errores en los valores de reflectancia contenidos en la base de datos.
- Patrones inversos en los valores de reflectancia normalizada (diferente signo entre el medido y el estimado).
- Geometrías $\chi = 90^\circ$ y $\zeta = 90^\circ$.

Estos casos representan menos del 3% para la banda de transición entre la región visible e infrarroja (765) y para la banda del infrarrojo cercano (865); alrededor del 34% para la banda 443 (azul) y menos del 13% para las bandas 565 (verde) y 670 (rojo).

Adicionalmente, se consideraron cuatro criterios de ajuste en la aplicación del modelo, desde el más restrictivo (criterio a) hasta el más laxo (criterio d). Las consideraciones utilizadas se enlistan en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Niveles concordancia exigidos en los ajustes.

Criterio	$R^2 \geq$	Constante aditiva del modelo UPB (A)
a	0.99	[88,91]
b	0.97	[87,93]
c	0.95	[84,96]
d	0.90	[80,100]

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los modelos semi-empíricos lineales han sido utilizados con relativo éxito en la generación de productos a partir de imágenes satelitales (*e.g.* estimaciones de albedo a escala global). Sin embargo, aún quedan cuestiones fundamentales sin resolver en torno a la aplicación de este enfoque de modelación; entre otras cosas, no se ha establecido un marco teórico que justifique una aproximación a la caracterización de la BRDF en base a kernels (Pokrovsky y Roujean, 2002), además, se ha demostrado que existe cierto nivel de dependencia lineal entre los parámetros geométricos y volumétricos de estos modelos, lo que limita su capacidad para diferenciar tipos de cobertura terrestre distintos (Bacour y Bréon, 2005).

Una tercera crítica a este paradigma de modelación procede de los requerimientos para su calibración; es necesario contar con información capturada con diferente geometría sol-sensor, lo cual demanda utilizar periodos de composición entre 10 y 16 días (Huete *et al.* 1999) y suponer condiciones de homogeneidad en el sistema suelo-vegetación-atmósfera (Bolaños *et al.*, 2007).

En esta sección se describen los hallazgos en torno a la validación del modelo Uni-Paramétrico de la BRDF y su capacidad para caracterizar los biomas contenidos en la base de datos BRDF POLDER-1.

5.1 Desempeño del modelo UPB en relación a escenarios de cobertura terrestre simulados

El ejercicio de corte empírico planteado al evaluar el ajuste del modelo UPB a los datos generados mediante las simulaciones descritas en la sección 4.1.1, mostró resultados satisfactorios para todos los escenarios considerados. Las gráficas a, c y e, en cada Figura de la 8 a la 11, muestran el comportamiento dispersor de las coberturas simuladas por los parámetros presentados en el Cuadro 2 y las variaciones de la geometría sol-sensor; en el eje de las abscisas

se muestra la variación del ángulo cenital de visión (θ_v), mientras que en el de las ordenadas el valor de reflectancia (R). La gráfica a corresponde a un ángulo cenital de iluminación igual a 0° ; la c representa una iluminación a 30° y la gráfica e a 60° .

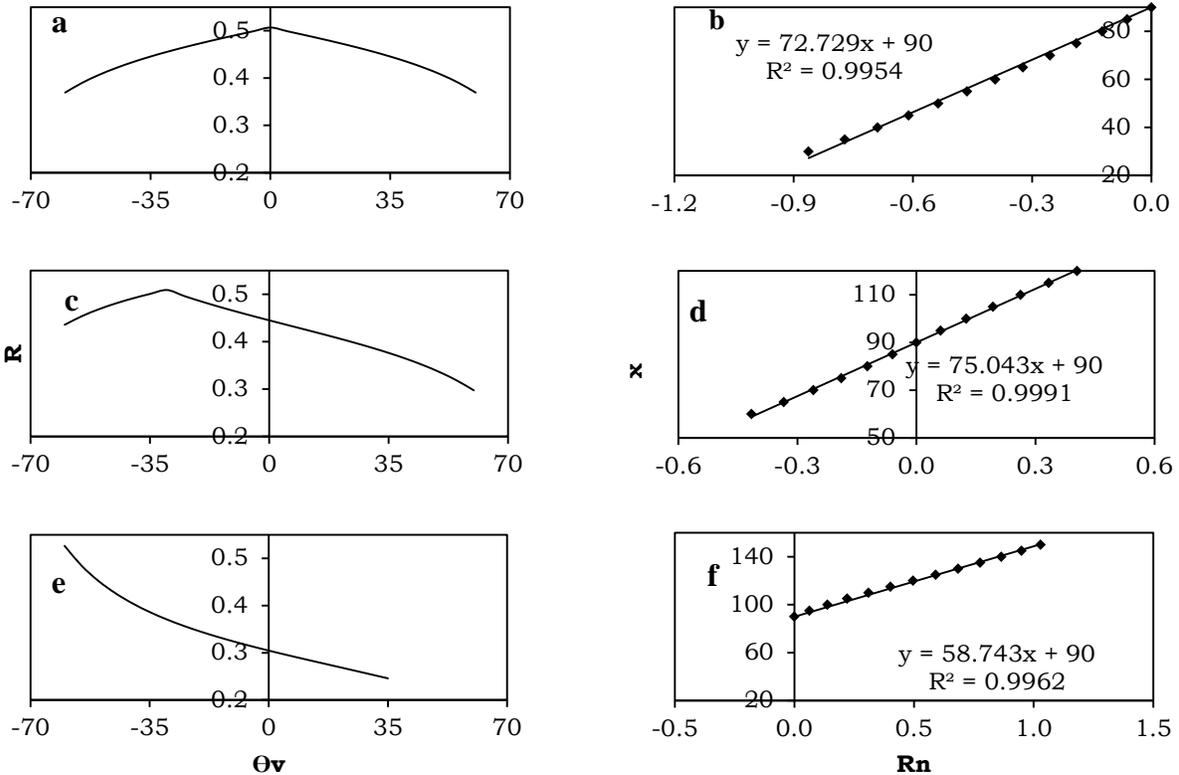


Figura 8. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thin y Li-Sparse y ajuste correspondiente del modelo UPB.

En cada figura se observa que el máximo valor de reflectancia ocurre cuando el ángulo cenital de iluminación coincide con el cenital de visión (efecto *hot spot*), después, este valor disminuye a medida que el ángulo de visión aumenta. Este comportamiento se debe a que el proceso de dispersión en óptica geométrica es regulado por la presencia de sombras en la escena, éstas aparecen a medida que el ángulo de visión se aleja del ángulo de iluminación. En transferencia radiativa ocurre lo contrario; el ángulo de fase entre las direcciones de iluminación y visión modula la cantidad de energía dispersada, la cual

disminuye de acuerdo con un coeficiente de extinción. El efecto combinado de los comportamientos descritos es el responsable de lo que se aprecia en las gráficas a, c y e de las Figuras de la 8 a la 11. Nótese que, en los modelos donde interviene el kernel Li-Dense, el descenso en el valor de la reflectancia es más abrupto que en aquellos donde aparece el kernel Li-Sparse, esto puede ser interpretado como un mayor efecto de sombreado en la escena, ya que el kernel Li-Dense fue derivado considerando un escenario poblado por un gran número de árboles.

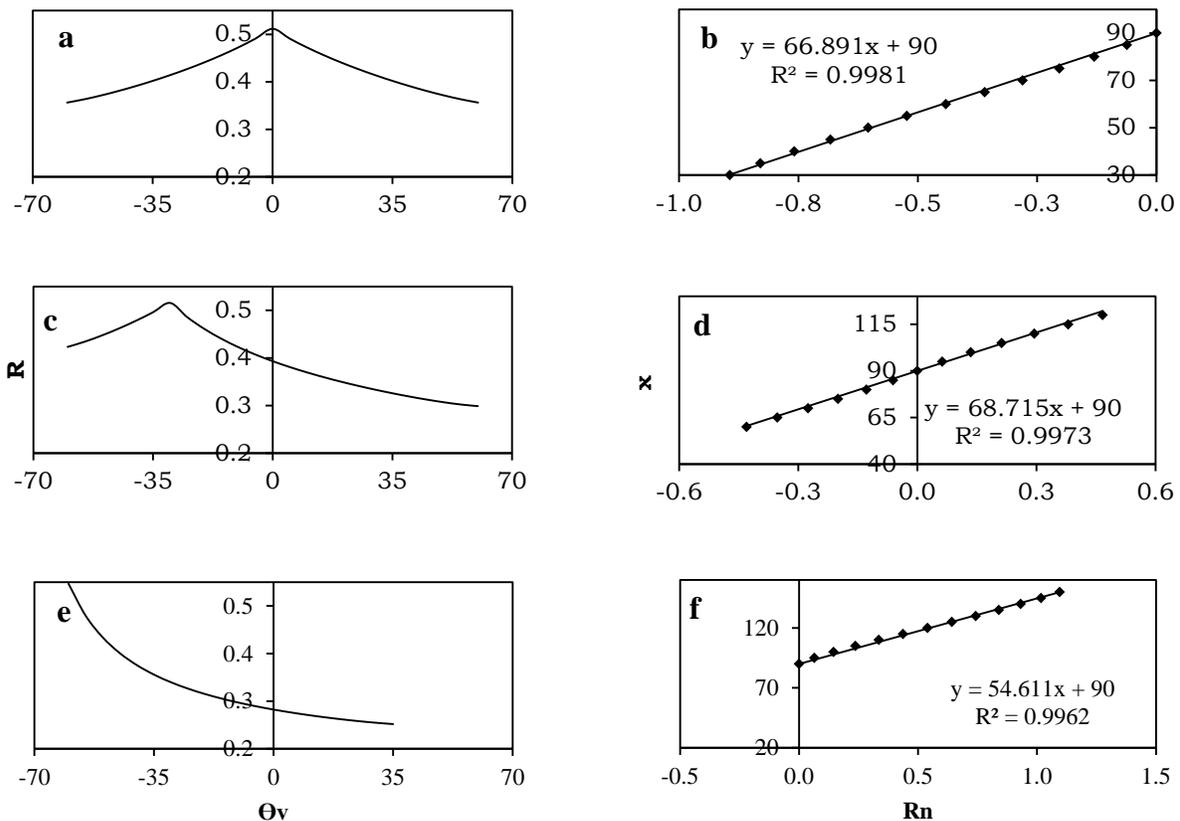


Figura 9. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thin y Li-Dense y ajuste correspondiente del modelo UPB.

Por otra parte, las gráficas b, d y f representan el ajuste obtenido mediante el modelo UPB para cada condición de iluminación. El eje de las abscisas muestra los valores de reflectancia normalizada por el modelo (R_n) y el de las ordenadas las variaciones de la geometría sol-sensor correspondiente (χ).

El comportamiento dispersor en las bandas R e IRC, bajo diferentes condiciones de cobertura y variaciones en las propiedades ópticas, fue estudiado a partir de los valores mostrados en el Cuadro 3. Los modelos donde interviene el kernel Li-Sparse contaron con 19,683 escenarios simulados, mientras que en los otros dos se consiguieron 6,561. Considerando la geometría sol-sensor para estas simulaciones (ver sección 4.1.1), se obtuvieron más de 800 mil valores para los modelos que involucran al kernel Li-Sparse y cerca de 300 mil para los demás, esto para cada una de las bandas analizadas.

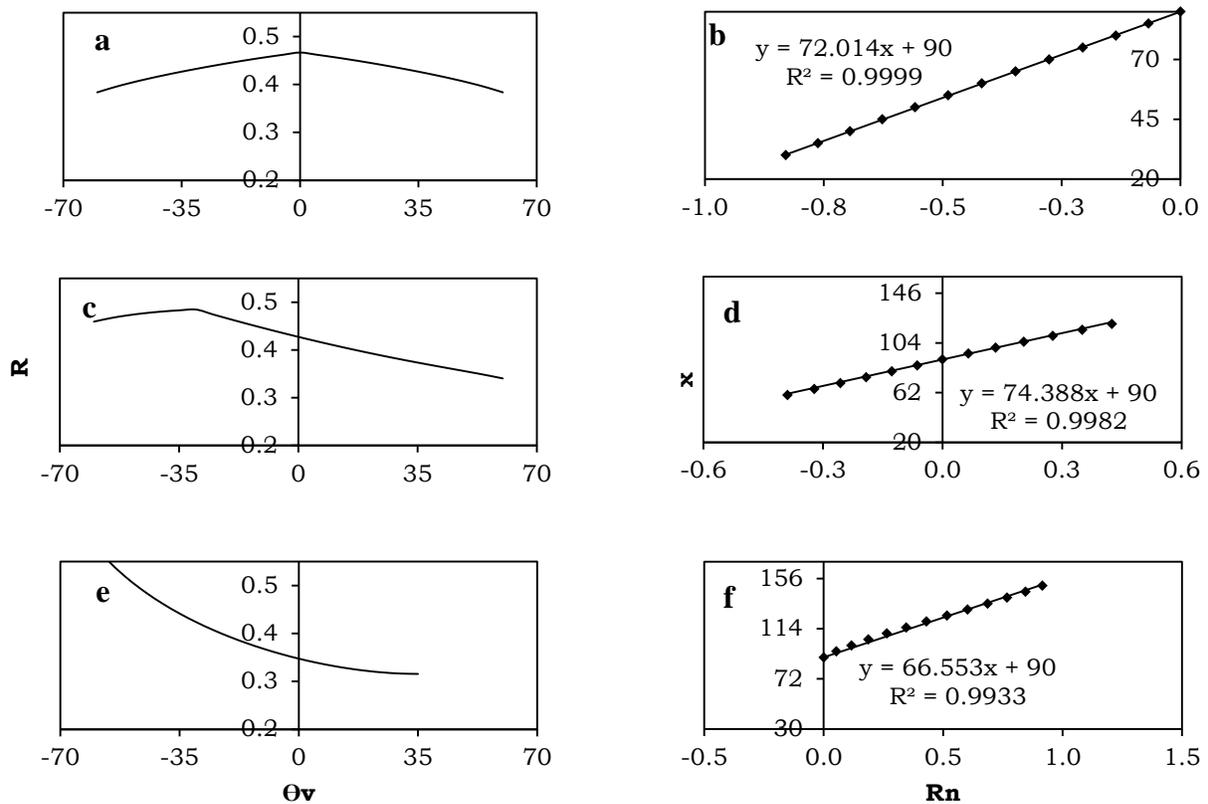


Figura 10. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thick y Li-Sparse y ajuste correspondiente del modelo UPB.

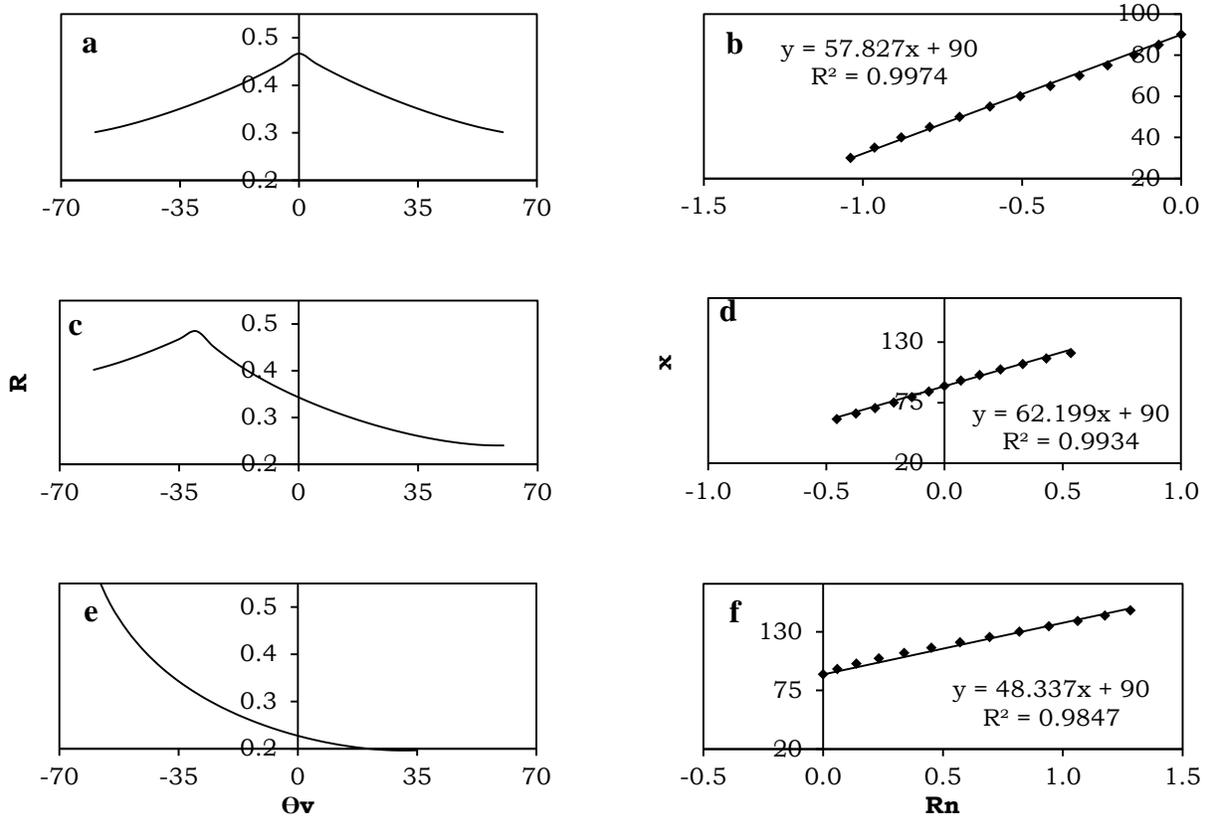


Figura 11. Comportamiento dispersor de una cobertura arbórea según el modelo Ross-Thick y Li-Dense y ajuste correspondiente del modelo UPB.

Del conjunto total de datos, se seleccionaron 27,154 en forma aleatoria para representar la correspondencia entre los valores de reflectancia descritos por cada modelo SEL y aquellos obtenidos una vez ajustado el modelo UPB.

La Figura 12 muestra los resultados de este ejercicio de comparación modelo a modelo; los ajustes experimentales son excelentes para todos los escenarios simulados y los coeficientes de determinación alcanzados son congruentes con los reportados por Bolaños (2006) y Cano (2008).

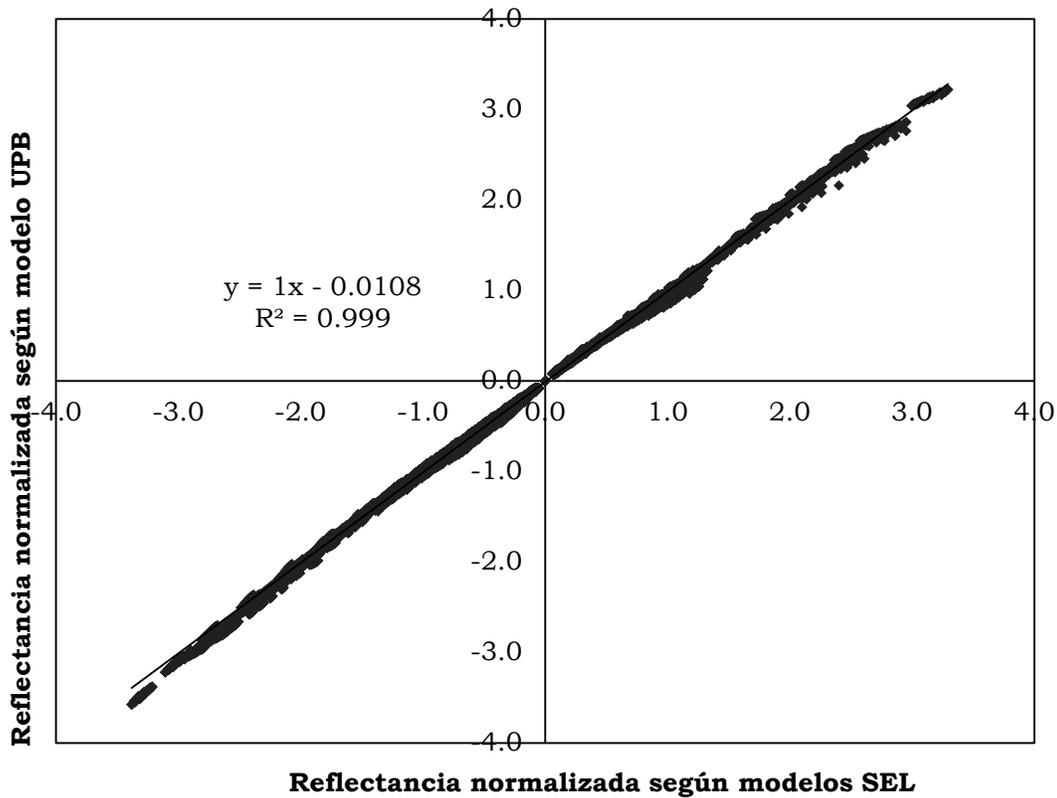


Figura 12. Relación entre las reflectancias simuladas a partir de modelos SEL y su correspondiente normalización mediante el UPB.

5.2 El modelo UPB en la caracterización de ecosistemas continentales

En el Cuadro 16 se presenta la densidad de datos alcanzada por el sensor POLDER-1 durante los ocho meses que estuvo en operación. La primera columna muestra la cantidad de píxeles disponible en la base de datos para cada bioma; la segunda, el número de días en que éste fue muestreado, y la tercera, el total de mediciones realizadas con diferente geometría sol-sensor.

Cuadro 16. Mediciones contenidas en la base de datos BRDF POLDER-1
para cada bioma en el GLC200.

Clase	Descripción	No. pixeles	No. Días	No. Datos
1	Cobertura arbórea, hoja ancha, perenne	956	15,446	196,752
2	Cobertura arbórea, hoja ancha, caducifolio, cerrado	1507	25,276	323,972
3	Cobertura arbórea, hoja ancha, caducifolio, abierto	1089	17,108	219,317
4	Cobertura arbórea, hoja acicular, perenne	1632	25,710	333,962
5	Cobertura arbórea, hoja acicular, caducifolia	493	5,888	91,996
6	Cobertura arbórea, tipo mixto de hoja	1359	17,938	243,124
7	Cobertura arbórea, regularmente inundado, agua dulce	200	2,241	27,349
8	Cobertura arbórea, regularmente inundado, agua salina (variación diaria)	563	7,896	96,332
9	Mosaico: cobertura arbórea / otra vegetación natural	876	11,780	158,131
10	Cobertura arbórea, quemado	369	4,272	65,604
11	Cobertura arbustiva, cerrado-abierto, perenne (con o sin un estrato arbóreo disperso)	1341	21,117	272,225
12	Cobertura arbustiva, cerrado-abierto, caducifolio (con o sin un estrato arbóreo disperso)	1585	28,486	362,219
13	Cobertura herbácea, cerrado-abierto	1574	27,567	359,340
14	Cobertura herbácea dispersa o arbustiva dispersa	1489	26,351	344,694
15	Cobertura arbustiva regularmente inundada y/o cobertura herbácea	1235	19,330	254,203
16	Áreas cultivadas y manejadas	1600	29,039	367,610
17	Mosaico: cultivo / cobertura arbórea / otra vegetación natural	1065	15,873	203,116
18	Mosaico: cultivo / cobertura arbustiva y/o herbácea	1354	22,119	283,877
19	Áreas desnudas	1170	20,090	257,579
20	Cuerpos de agua (natural y artificial)	1831	27,578	366,565
21	Nieve y hielo (natural y artificial)	528	7,579	118,558
22	Superficies artificiales y áreas asociadas	1041	16,136	205,074
Total		24857	394,820	5,151,599

El Cuadro 17 muestra los porcentajes de datos que cumplen los criterios de selección enlistados en el Cuadro 15. Para las bandas 765 y 865, cerca de dos terceras partes del total cumplen con el criterio más restrictivo (criterio a) y poco más del 90% con el criterio b; en las bandas 565 y 670 se obtuvo un porcentaje de inclusión en el criterio c alrededor de 90%, por último, en el caso de la banda 443, el criterio más liberal ($R^2 \geq 0.9$) produjo un porcentaje de inclusión cercano al 85%.

El análisis de los ajustes para las bandas 765 y 865, considerando el criterio b, se muestra en el Cuadro 18. Se observa que el error relativo medio para las dos bandas es cercano al 7% en las 22 clases.

Cuadro 17. Niveles de inclusión (%) logrados en la aplicación de los cuatro criterios para cada banda en las 22 clases.

Clase	R ² ≥ 0.99 y A: [89, 91]					R ² ≥ 0.97 y A: [87, 93]					R ² ≥ 0.95 y A: [84, 96]					R ² ≥ 0.90 y A: [80, 100]				
	443	565	670	765	865	443	565	670	765	865	443	565	670	765	865	443	565	670	765	865
1	10.0	38.3	33.8	64.7	67.8	36.8	78.1	71.2	95.8	96.2	55.0	91.2	85.4	98.1	98.1	72.5	97.4	93.4	98.8	98.8
2	20.9	46.5	42.3	67.0	69.8	57.5	85.2	79.9	94.3	94.4	74.3	93.2	89.7	95.8	95.9	86.3	96.4	95.4	96.9	96.9
3	16.6	43.3	40.3	62.5	64.7	43.3	81.1	75.6	93.2	93.3	59.1	92.6	87.9	95.5	95.5	74.4	97.5	95.3	96.9	96.9
4	23.6	43.6	40.5	62.3	65.2	58.3	84.5	79.5	95.6	96.1	74.6	94.3	90.4	97.9	98.0	86.2	98.0	96.9	98.6	98.6
5	36.2	54.7	52.2	74.2	75.9	64.1	91.2	85.6	99.3	99.3	76.7	96.9	93.6	99.8	99.9	88.3	97.7	98.6	99.9	99.9
6	19.4	42.7	38.5	64.7	68.0	49.8	83.7	76.6	96.7	96.9	67.8	93.9	89.1	98.4	98.4	81.4	97.5	95.4	98.8	98.9
7	10.6	41.4	28.0	60.0	61.9	40.9	74.7	65.5	89.1	89.2	59.7	87.3	79.9	92.8	93.1	78.2	96.0	91.6	96.8	96.8
8	19.7	53.3	50.5	70.6	73.0	56.1	86.3	82.5	93.8	93.9	73.9	93.7	91.5	95.9	95.9	86.6	97.1	96.6	97.6	97.7
9	29.9	50.9	46.2	69.5	71.8	59.7	87.1	82.4	95.9	96.0	75.0	94.7	92.2	97.8	97.8	87.0	97.1	97.3	98.6	98.6
10	39.2	52.8	51.6	70.1	72.3	65.1	88.9	84.8	99.2	99.4	77.4	95.8	93.0	100.0	100.0	89.2	96.7	98.8	100.0	100.0
11	32.6	52.4	49.5	69.1	71.4	68.3	88.9	84.9	96.1	96.2	81.4	95.1	93.2	97.7	97.7	90.7	97.3	97.4	98.6	98.6
12	29.4	51.3	49.2	67.9	69.9	64.1	88.8	86.7	96.1	96.2	80.6	95.3	93.9	97.6	97.7	91.3	97.5	97.4	98.4	98.5
13	27.8	51.4	50.1	69.8	72.0	63.1	89.0	86.0	96.8	96.9	78.7	95.9	94.2	98.5	98.4	90.1	98.0	97.9	99.2	99.2
14	28.4	51.2	51.1	65.7	67.3	63.6	90.6	89.7	96.6	96.6	81.2	96.1	96.2	98.3	98.3	92.1	97.9	98.9	99.3	99.3
15	34.1	61.3	61.4	80.3	82.4	67.2	91.5	90.0	97.5	97.6	81.1	95.7	95.5	98.4	98.4	91.3	97.3	98.5	99.1	99.1
16	28.3	51.6	48.9	70.1	72.5	67.8	90.1	86.3	95.2	95.3	83.7	95.7	94.0	97.1	97.1	92.0	97.6	97.4	97.9	97.8
17	18.7	48.1	42.7	71.0	73.8	54.2	87.7	82.2	96.4	96.4	72.3	95.8	92.7	98.2	98.2	86.2	98.2	97.6	99.1	99.1
18	27.7	51.2	49.5	68.8	71.2	63.7	89.2	86.5	96.4	96.4	79.7	95.9	94.5	98.1	98.1	90.6	98.1	98.3	99.1	99.0
19	43.7	62.9	63.2	76.5	77.9	82.6	94.1	94.1	97.1	97.2	92.6	96.8	97.6	98.5	98.5	97.4	98.0	99.3	99.4	99.4
20	28.3	46.6	44.4	61.7	63.6	60.5	82.5	76.5	87.3	87.5	74.6	91.0	85.8	89.7	89.9	85.6	95.6	91.6	91.7	91.8
21	73.5	63.8	80.8	82.3	82.7	95.4	82.4	98.4	99.1	99.1	98.5	83.4	99.3	99.5	99.5	99.6	83.9	99.8	99.9	100.0
22	30.2	51.0	49.2	66.2	68.3	70.0	88.5	86.4	93.1	93.2	85.0	94.2	93.8	95.4	95.4	93.3	96.5	97.0	97.1	97.1

Cuadro 18. Estadísticos de errores asociados al ajuste del modelo UPB en las bandas 765 y 865.

Clase	Banda 765					Banda 865				
	c	d	R ²	RECM	ERM	c	d	R ²	RECM	ERM
1	0.121	1.0092	0.9930	5.45	7.20	0.111	1.0108	0.9954	5.94	6.88
2	0.128	1.0080	0.9937	6.55	6.66	0.121	1.0091	0.9957	9.03	6.44
3	0.193	1.0116	0.9931	6.57	6.92	0.181	1.0129	0.9953	4.82	6.70
4	0.044	1.0148	0.9935	7.02	7.91	0.034	1.0161	0.9947	3.57	7.65
5	0.010	1.0203	0.9941	1.57	6.80	0.003	1.0206	0.9956	1.56	6.65
6	0.135	1.0107	0.9931	4.52	7.06	0.123	1.0121	0.9952	1.56	6.81
7	0.087	1.0096	0.9928	1.34	6.62	0.082	1.0113	0.9961	1.34	6.36
8	0.074	1.0093	0.9944	1.23	6.03	0.075	1.0102	0.9966	1.23	5.84
9	0.030	1.0161	0.9942	1.51	6.81	0.021	1.0170	0.9958	4.85	6.65
10	0.096	1.0174	0.9943	1.54	6.79	0.085	1.0182	0.9957	1.54	6.66
11	0.053	1.0178	0.9943	1.57	6.99	0.048	1.0184	0.9955	1.57	6.84
12	0.122	1.0141	0.9938	8.35	6.67	0.114	1.0149	0.9956	6.51	6.52
13	0.127	1.0158	0.9942	1.57	6.93	0.118	1.0167	0.9956	1.56	6.77
14	0.175	1.0192	0.9934	5.08	7.13	0.164	1.0202	0.9953	1.68	7.01
15	0.060	1.0113	0.9950	1.29	5.76	0.056	1.0117	0.9967	1.28	5.62
16	0.093	1.0131	0.9940	2.26	6.57	0.086	1.0139	0.9960	3.34	6.42
17	0.072	1.0138	0.9935	1.44	6.66	0.066	1.0147	0.9959	1.43	6.46
18	0.149	1.0184	0.9938	3.81	6.96	0.137	1.0197	0.9956	4.28	6.81
19	0.086	1.0166	0.9950	5.24	6.26	0.079	1.0170	0.9964	3.87	6.20
20	0.092	1.0143	0.9939	14.98	7.06	0.085	1.0152	0.9954	12.17	6.90
21	-0.003	1.0239	0.9958	1.61	6.26	-0.007	1.0240	0.9963	1.62	6.24
22	0.137	1.0146	0.9938	1.53	6.68	0.131	1.0157	0.9954	1.53	6.56

El Cuadro 19 muestra los estadísticos de errores utilizados para las bandas verde y roja considerando el criterio c.

Cuadro 19. Estadísticos de errores asociados al ajuste del modelo UPB en las bandas 565 y 670.

Clase	Banda 565					Banda 670				
	c	d	R2	RECM	ERM	c	d	R2	RECM	ERM
1	0.168	1.0032	0.9905	54.00	10.91	0.168	1.0060	0.9905	23.42	11.81
2	0.124	1.0040	0.9923	54.69	9.14	0.122	1.0049	0.9923	17.71	9.59
3	0.227	1.0060	0.9908	61.81	9.94	0.232	1.0072	0.9908	14.00	10.06
4	0.051	1.0071	0.9919	52.67	10.31	0.049	1.0081	0.9919	20.63	10.85
5	0.033	1.0185	0.9935	41.29	8.45	-0.008	1.0205	0.9935	40.43	8.87
6	0.127	1.0042	0.9913	44.68	9.85	0.121	1.0043	0.9913	16.95	10.70
7	0.040	1.0157	0.9903	48.07	10.16	0.005	1.0105	0.9903	9.67	11.16
8	0.047	1.0079	0.9928	52.46	8.64	0.040	1.0089	0.9928	16.49	8.76
9	0.013	1.0155	0.9932	53.32	9.01	0.007	1.0177	0.9932	26.40	9.52
10	0.124	1.0125	0.9936	46.47	8.49	0.084	1.0149	0.9936	29.84	8.62
11	0.043	1.0161	0.9934	66.20	9.09	0.048	1.0166	0.9934	20.11	9.26
12	0.137	1.0111	0.9927	58.67	8.78	0.143	1.0116	0.9927	20.46	8.85
13	0.151	1.0119	0.9931	65.73	9.12	0.154	1.0120	0.9931	21.87	9.08
14	0.241	1.0122	0.9925	68.58	9.05	0.243	1.0125	0.9925	20.08	8.67
15	0.078	1.0078	0.9944	53.99	7.62	0.080	1.0077	0.9944	24.71	7.61
16	0.104	1.0094	0.9929	52.49	8.65	0.112	1.0099	0.9929	15.29	9.00
17	0.063	1.0097	0.9923	55.99	9.31	0.065	1.0102	0.9923	21.64	9.92
18	0.158	1.0123	0.9926	49.93	8.86	0.160	1.0129	0.9926	19.70	8.98
19	0.095	1.0144	0.9945	54.61	7.61	0.101	1.0148	0.9945	21.14	7.49
20	0.087	1.0096	0.9923	86.78	9.81	0.081	1.0119	0.9923	22.66	9.97
21	-0.011	1.0229	0.9957	264.46	13.64	-0.002	1.0229	0.9957	20.51	6.48
22	0.139	1.0109	0.9925	60.17	8.59	0.143	1.0097	0.9925	14.77	8.57

Finalmente, el Cuadro 20 muestra los estadísticos de error en la banda 443. Nótese que esta banda presenta los peores ajustes encontrados.

Cuadro 20. Estadísticos de errores asociados al ajuste del modelo UPB en la banda 443.

Clase	Banda 443				
	c	d	R2	RECM	ERM
1	0.211	0.9899	0.9738	65.45	24.24
2	0.106	0.9995	0.9831	33.51	16.01
3	0.240	1.0023	0.9767	54.13	20.79
4	0.006	1.0016	0.9850	34.34	16.65
5	-0.012	1.0160	0.9908	35.72	12.69
6	0.113	0.9920	0.9812	55.43	17.71
7	-0.123	1.0184	0.9765	50.37	21.66
8	-0.021	1.0139	0.9793	34.09	17.33
9	-0.032	1.0155	0.9878	40.83	15.99
10	0.075	1.0099	0.9909	46.41	12.26
11	0.014	1.0099	0.9886	30.28	13.32
12	0.144	1.0047	0.9855	35.34	14.10
13	0.188	1.0014	0.9860	35.03	14.72
14	0.323	1.0028	0.9847	33.65	14.17
15	0.105	0.9995	0.9872	37.41	13.19
16	0.100	1.0020	0.9857	26.41	13.84
17	0.041	1.0045	0.9823	30.80	17.57
18	0.174	1.0057	0.9844	28.67	14.70
19	0.114	1.0076	0.9906	34.65	10.53
20	0.067	1.0068	0.9857	37.76	14.96
21	0.003	1.0217	0.9952	38.65	7.25
22	0.129	1.0081	0.9828	22.14	13.01

Las bandas en la porción visible del espectro electromagnético presentan porcentajes de concordancia entre la reflectancia normalizada medida y estimada menores a los que se encontraron en la banda de transición hacia el infrarrojo y en la correspondiente al infrarrojo cercano. Este comportamiento ha sido reportado en ejercicios similares (Bacour y Bréon, 2005) y es atribuido a deficiencias en el proceso de corrección atmosférica aplicado a los datos colectados por el sensor POLDER-1, ya que las bandas 443, 565 y 670, son más sensibles a la presencia de aerosoles troposféricos que aquellas contenidas en la porción del infrarrojo.

La contribución de la información multi-angular al problema de clasificación de coberturas terrestres, en función del parámetro G del modelo UPB, fue analizada calculando el promedio (m) y la desviación estándar (d.e.) de los valores encontrados al analizar cada una de las 22 clases contenidas en el GLC200. El valor de este parámetro fue multiplicado por -1 para presentar los resultados en el cuadrante positivo.

La Figura 13 muestra la caracterización de los 22 ecosistemas a través de las bandas 765 y 865 considerando el criterio b. En ella se aprecia que la discriminación en la banda correspondiente al infrarrojo cercano es prácticamente imposible y, aunque la banda 765 muestra mayor capacidad que la anterior, se distinguen importantes zonas de traslape entre la mayoría de las clases.

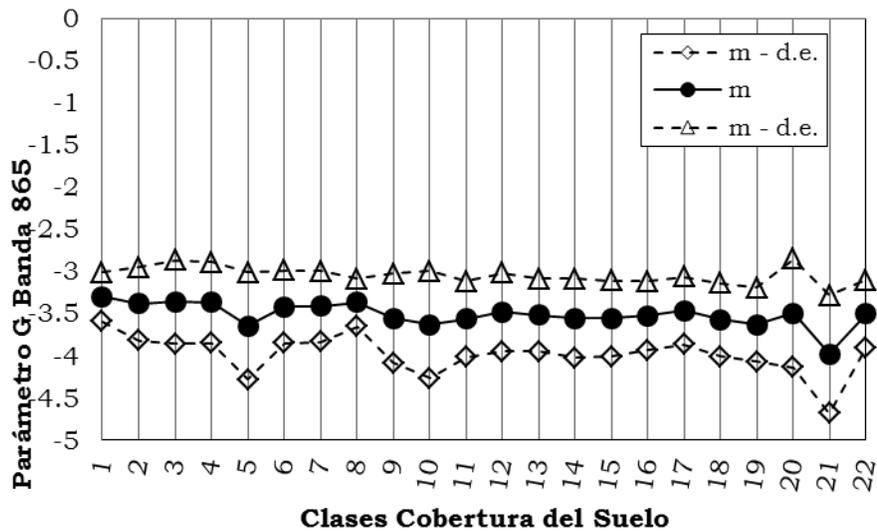
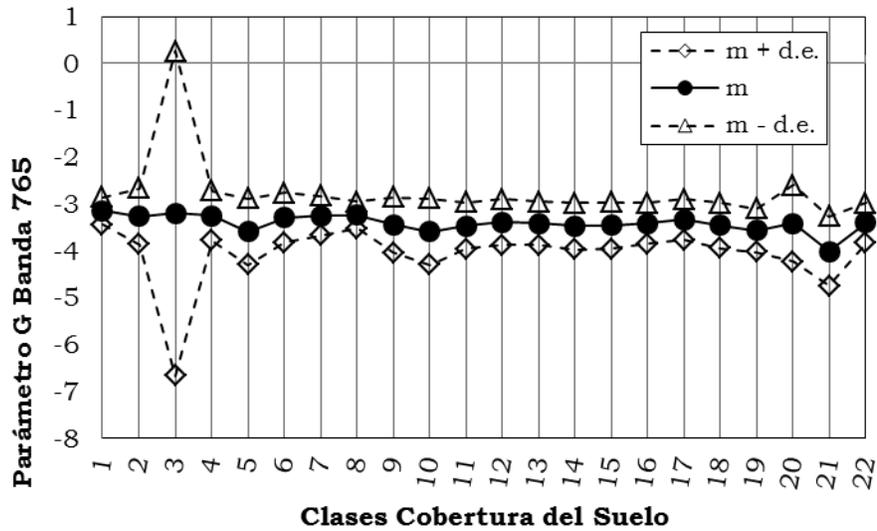


Figura 13. Variación del parámetro G del modelo UPB en las bandas 765 y 865 para los biomas contenidos en el GLC200.

La Figura 14 muestra el análisis del parámetro G considerando las bandas 565 y 670 y el criterio c. La primera banda muestra una capacidad de discriminación similar a la del infrarrojo cercano, mientras que la segunda exhibe cierto potencial.

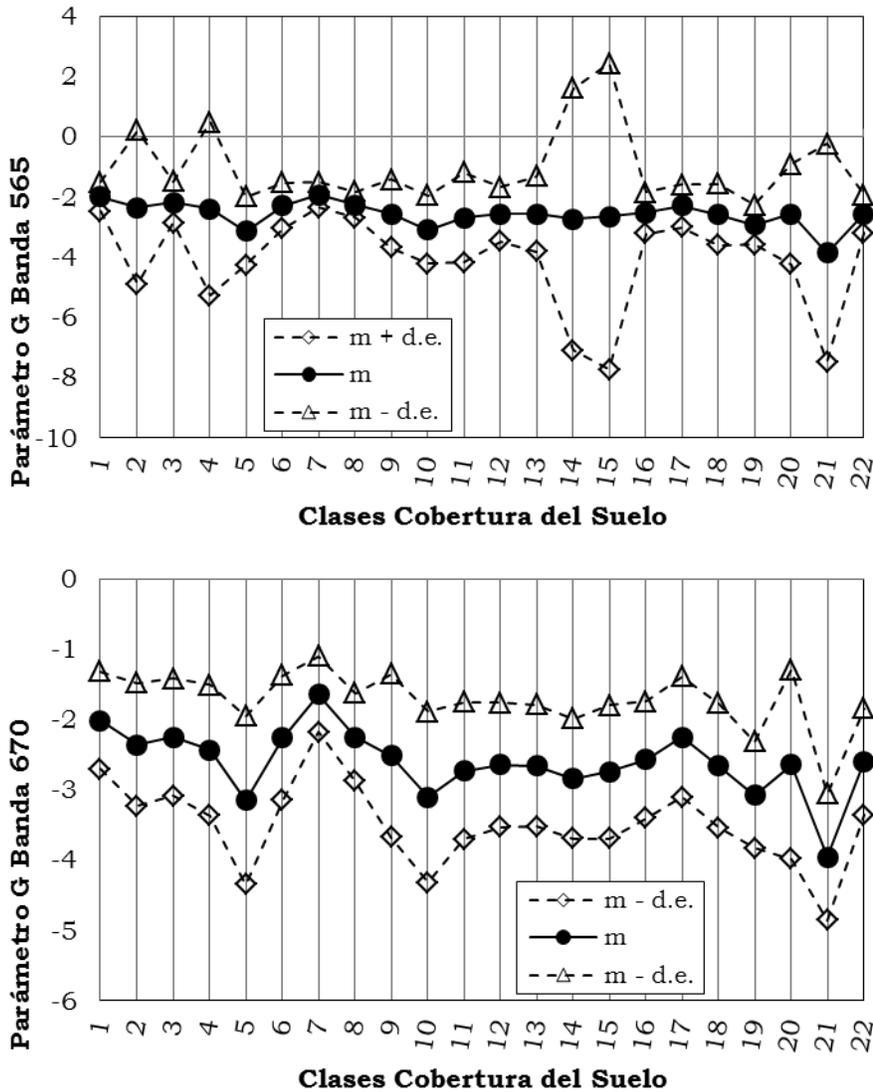


Figura 14. Variación del parámetro G del modelo UPB en las bandas 565 y 670 para los biomas contenidos en el GLC200

Finalmente, la Figura 15 muestra el caso de la banda 443 y el criterio d. En forma similar a las bandas 765 y 670, esta banda ofrece una oportunidad para

abordar el problema de clasificación de la cobertura terrestre, en especial si se combinan para formar espacios de análisis con una banda cuya variación sea mínima, independientemente de la cobertura que se analice. En este sentido, la banda del infrarrojo cercano podría ser la candidata ideal.

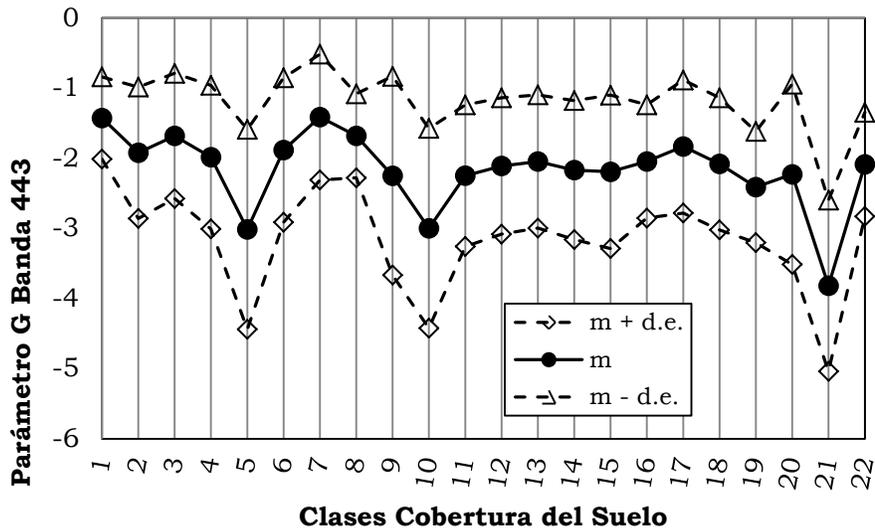


Figura 15. Variación del parámetro G del modelo UPB en la banda 443 para los biomas contenidos en el GLC200.

6. CONCLUSIONES

Existe una gran variedad de investigaciones en torno al problema de clasificar coberturas terrestres a partir de datos colectados por sensores remotos a bordo de plataformas satelitales. Desde hace aproximadamente dos décadas, se sugirió por primera vez que las observaciones realizadas con este tipo de instrumentos, desde diferentes ángulos, podrían contribuir a la solución del problema. Este enfoque se sustenta en la evidencia que existe sobre el comportamiento anisotrópico mostrado por ciertos tipos de cobertura terrestre, en particular, aquellas que poseen vegetación.

Para explotar la fuente de información que supone la adquisición de observaciones multi-angulares, se han propuesto una gran variedad de modelos que caracterizan el comportamiento dispersor de la superficie terrestre con diferentes niveles de precisión. Los semi-empíricos lineales han sido utilizados con este propósito por representar un compromiso aceptable entre complejidad y precisión de las estimaciones obtenidas a través de ellos. A pesar de esto, ninguna propuesta basada en este paradigma, hasta la fecha, ha sido capaz de ofrecer resultados consistentes en relación al problema de clasificación de la cobertura terrestre. Recientemente se propuso un modelo para caracterizar los efectos angulares cuya naturaleza es distinta a las propuestas previas: el modelo Uni-Paramétrico de la BRDF.

El modelo UPB fue evaluado en relación a su capacidad para ser ajustado a partir de mediciones realizadas por un sensor remoto espacial, con este propósito, se realizó un experimento de corte empírico, simulando diferentes escenarios de cobertura terrestre mediante el uso de modelos SEL, y otro de índole experimental, utilizando las mediciones del sensor POLDER-1. En ambos casos los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Los datos del sensor POLDER-1 fueron procesados y compilados en una base de datos que relaciona sus mediciones con biomas identificados en el contexto

del proyecto GLC2000. Esta base de datos ha sido analizada por otros autores utilizando modelos semi-empíricos lineales en busca de patrones consistentes y diferenciables entre cada clase de cobertura, sin que hasta ahora existan reportes de haber alcanzado este objetivo.

En esta investigación se demostró que el modelo UPB es capaz de responder a mediciones obtenidas a través del sensor POLDER-1 en forma adecuada; para todas las bandas se obtuvieron niveles de concordancia entre lo medido y lo estimado superiores al 97%, esto independientemente del bioma analizado. No obstante, mediante el análisis del parámetro G , no se encontraron diferencias significativas en relación al problema de clasificación de la cobertura terrestre respecto a resultados reportados previamente. Estos hallazgos contribuyen a corroborar los planteamientos de algunos autores en torno a la inconsistencia que existe entre los esquemas de clasificación utilizados tradicionalmente en relación a la información que puede ser obtenida a través de un sensor remoto espacial.

El sistema suelo-vegetación-atmósfera exhibe una dinámica complicada cuya caracterización demanda el análisis integral de las fuentes de información disponibles a través de sensores remotos espaciales. En particular, el problema de clasificación de la cobertura terrestre basado en datos colectados por estos instrumentos, debe ser abordado considerando un sistema de clasificación de la cobertura terrestre que responda a criterios de diferenciación establecidos con base en las variables que un sensor remoto a bordo de una plataforma satelital puede inferir (*i.e.* arquitectura individual de la planta o árbol, propiedades ópticas de los fitoelementos y propiedades reflectivas del fondo de la vegetación).

7. LITERATURA CITADA

- AGROASEMEX. 2006. La Experiencia Mexicana en el Desarrollo y Operación de Seguros Paramétricos Orientados a la Ganadería. AGROASEMEX S. A. Querétaro, México. 57 p.
- Bacour, C. and F.M. Bréon. 2005. Variability of biome reflectance directional signature as seen by POLDER. *Remote Sensing of Environment* 98: 80-95.
- Barnsley, M.J., D. Allison and P. Lewis P. 1997. On the information content of multiple view angle (MVA) images. *International Journal of Remote Sensing* 18:1937-1960.
- Bolaños, M. 2006. Modelación de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados-Postgrado de Hidrociencias. Montecillo, Estado de México. 128 p.
- Bolaños, M., F. Paz-Pellat, E. Palacios-Vélez, E. Mejía-Sáenz y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 41(3): 527-537.
- Cano, A. 2008. Alcances y limitaciones de la información espectral multiangular para la clasificación de la vegetación. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados-Postgrado de Hidrociencias. Montecillo, Estado de México. 224 p.
- Chopping, M., C. B. Schaaf, F. Zhao, Z. Wang, A. W. Nolin, G. G. Moisen, J. V. Martonchik and M. Bull. 2011. Forest structure and aboveground biomass in the southwestern United States from MODIS and MISR, *Remote Sensing of Environment* 115: 2943-2953.
- Deschamps, P.-Y., F.-M. Bréon, M. Leroy, A. Podaire, A. Bricaud, J.-C. Buriez, and G. Sèze. 1994. The POLDER Mission: Instrument Characteristics

- and Scientific Objectives. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32(3): 598-615.
- Diner, D. J., J. C. Beckert, T. H. Reilly, C. J. Bruegge, J. E. Conel, R. A. Kahn, J. V. Martonchik, T. P. Ackerman, R. Davies, S. A. Gerstl, H. R. Gordon, J. P. Muller, R. Myneni, P. J. Sellers, B. Pinty, and M. M. Verstraete. 1998. Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) Instrument Description and Experiment Overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4): 1072-1087.
- Disney, M.I. 2001. Improved estimation of surface biophysical parameters through inversion of linear BRDF models. Tesis Doctoral. Department of Geography, University College London. London. 280 p.
- Gutman G. and A. Ignatov. 2010. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing* 19(8): 1533-1543.
- Hagolle; O., A. Guerry, L. Cunin, B. Millet, J. Perbos, J.-M. Laherrere, T. Bret-Dibat and L. Poutier. 2006. POLDER level-1 processing algorithms. *Proceedings SPIE 2758, Algorithms for Multispectral and Hyperspectral Imagery II*: 308-319.
- Hastings, D. A. and Emery, W. J. 1992. The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR): A Brief Reference Guide. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58(8): 1183-1188.
- Hill, M.J., C. Averill, Z. Jiao, C. B. Schaaf and J. D. Armston. 2008. Relationship of MISR RPV parameters and MODIS BRDF shape indicators to surface vegetation patterns in an Australian tropical savanna. *Canadian Journal of Remote Sensing* 34 (Suppl.2): 247-267.
- Hu, B., W. Lucht, X. Li and A.H. Strahler. 1997. Validation of kernel-driven semiempirical models for the surface bidirectional reflectance

- distribution function of land surfaces. *Remote Sensing of Environment* 62: 201-214.
- Huete, A., C. Justice and W. van Leeuwen. 1999. MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document Version 3. Arizona, USA. 120 p.
- Jiao, Z., C. Woodcock, C. B. Schaff, B. Tan, J. Liu, F. Gao, A. Strahler, X. Li, and J. Wang. 2011. Improving MODIS land cover classification by combining MODIS spectral and angular signatures in a Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Remote Sensing* 37(2): 1-20.
- Jet Propulsion Laboratory (JPL). 2013. MISR Multi-angle Imaging SpectroRadiometer. NASA. [En línea]. Disponible en <http://misr.jpl.nasa.gov/Mission/misrInstrument/spectralCoverage/> (actualizado enero de 2013).
- Joint Research Centre (JRC). 2003. Global Land Cover 2000 database. Land Resource Management Unit. European Commission. [En línea]. Disponible en <http://bioval.jrc.ec.europa.eu> (actualizado 2010).
- Kidder, S. Q., M. D. Goldberg, R. M. Zehr, M. DeMaria, J. F. W. Purdom, C. S. Velden, N. C. Grody, y S. J. Kusselson. 2000. Satellite Analysis of Tropical Cyclones Using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). *Bulletin of the American Meteorological Society* 81(6): 1241-1259.
- Kidwell K.B. 1997. NOAA Global Vegetation Index User's Guide.[En línea]. Disponible en <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/gviug/cover.htm> (actualizado julio de 1997).
- Lacaze, R. 2006. POLDER-1 BRDF Database-User Document. POSTEL Service Centre, Issue 2, Revision 2. Medias France. 59 p.
- Leroy, M., J.L. Deuzé, F.M. Bréon, O. Hautecoeur, M. Herman, J.C. Buriez D. Tanré, S. Bouffiès, P. Chazette and J.L. Roujean. 1997. Retrieval of

- atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012) 102 (D14): 17023–17037.
- Li, X. and A.H. Strahler. 1985. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE-23*: 705-721.
- Li, X. and A.H. Strahler. 1986. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE-24*: 906-919.
- Li, Z., J. Cihlar, X. Zheng, L. Moreau, and H. Ly. 1996. The bidirectional effects of AVHRR measurements over boreal regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34: 1308-1322.
- Li, Z., L. Moreau, J. Cihlar y D. W. Deering. 1997. An Evaluation of Kernel-driven Bidirectional Models Using PARABOLA Measurements. *Canadian Journal of Remote Sensing* 23(2): 120-130.
- Lucht, W. 1998. Expected retrieval accuracies of bidirectional reflectance and albedo from EOS-MODIS and MISR angular sampling. *Journal of Geophysical Research* 103(D8): 8763–8778.
- Myneni, R.B., R.R.Nemani and S.W. Running. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35: 1380-1393.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2011. MODIS [En línea]. Disponible en <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php> (actualizado el 3 de marzo de 2011).
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2012. Landsat Science [En línea]. Disponible en <http://landsat.gsfc.nasa.gov> (actualizado el 5 de diciembre de 2012).

- National Climatic Data Center (NCDC). 2008. NOAA Polar Orbiter Data User's Guide. U. S. Department of Commerce [En línea]. Disponible en <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/podug/> (actualizado el 20 de agosto de 2008).
- National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS). 2012. Advanced Very High Resolution Radiometer - AVHRR [En línea]. Disponible en <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html> (actualizado el 12 de octubre de 2012).
- National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS). 2013. Office of Satellite Operations, Polar Operational Environmental Satellite [En línea]. Disponible en <http://www.oso.noaa.gov/poes/> (actualizado el 28 de enero de 2013).
- Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, E.J. and T. Limperis. 1977. Geometric considerations and nomenclature for reflectance. Natural Bureau of Standards Monograph 160. Institute for Basic Standards, Washington, D.C. 161 p.
- Palacios, L.A. 2007. Corrector atmosférico en imágenes Landsat. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados-Postgrado de Hidrociencias. Montecillo, Estado de México. 92 p.
- Paz, F. y M. Bolaños. 2004, Bases para el diseño de un índice de vegetación generalizado. Reporte Octubre-Noviembre para AGROASEMEX. Estado de México. 155 p.
- Pokrovsky, O. and J.-L. Roujean. 2002. Land surface albedo retrieval via kernel-based BRDF modeling: I. Statistical Inversion method and model comparison. Remote Sensing of Environment 84(2002): 100-119.
- Rahman, H., Pinty, B. and M.M. Verstraete. 1993. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model. 2. Semiempirical surface model usable with

- NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer data. *Journal of Geophysical Research* 98: 20791–20801.
- Richter, R., D. Schläpfer and A. Mueller. 2006. An automatic atmospheric correction algorithm for visible/NIR imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27:2077-2085.
- Román, M., C. Gatebe, C.B. Schaaf, R. Poudyal, Z. Wang and M. King. 2011. Variability in surface BRDF at different spatial scales (30 m-500 m) over a mixed agricultural landscape as retrieved from airborne and satellite spectral measurements. *Remote Sensing of Environment* 115: 2184-2203.
- Ross, J. K. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Dr. W. Junk Publishers, The Hague. 392 p.
- Roujean, J.-L., M. Leroy and P.-Y. Deschamps. 1992. A Bidirectional Reflectance Model of the Earth's Surface for the Correction of Remote Sensing Data. *Journal of Geophysical Research* 97(18): 20455-20468.
- Schowengerdt, R. A. 2007. *Remote Sensing, Third edition: Models and Methods for Image Processing*. Academic Press, Elsevier. California, USA. 560 p.
- Strahler, A.H., W. Wanner, C.B. Schaaf, X. Li, B. Hu, J.-P. Muller, P. Lewis and M.J. Barnsley. 4 1996. MODIS BRDF/Albedo Product: Algorithm Theoretical Basis Document Version 4.0. 5 NASA/GSFC, MODIS Product ID: MOD43. Boston, USA. 252 p.
- U.S. Geological Survey (USGS). 2013. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. [En línea]. Disponible en http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/band (actualizado el 29 de enero de 2013).
- Wang, Z., C.B. Schaaf, P. Lewis, Y. Knyazikhin, M.A. Schull, A.H. Strahler, T. Yao, R.B. Myneni, M.J. Chopping and B.J. Blair. 2011. Retrieval of

canopy height using moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing of Environment* 115: 1595-1601.

Wanner, W., X. Li and A. H. Strahler. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research* 100(10): 21077-21089.

Zhang, Y., N. Shabanov, Y. Knyazikhin and R.B. Myneni. 2002. Required Consistency between Biome Definitions and Signatures with the Physics of Remote Sensing. II: Theoretical Arguments. Working Paper. Boston, USA. 29 p.