

## Variables obtenidas a partir de sensores remotos para el estudio y monitoreo del cambio climático global

*Variables obtained through remote sensing for the study and monitoring of the global climate change*

Paola Johanna Isaacs Cubides <sup>1</sup> y Mauricio Ramírez Daza <sup>2</sup>

Molano B., J. 1990. *Villa de Leyva: Ensayo de interpretación social de una catástrofe ecológica*. Fondo FEN. Bogotá. Colombia.

Municipio de Sáchica. 2004. *Esquema de Ordenamiento Territorial*. Administración municipal de Sáchica.

Municipio de Villa de Leyva. 2004. *Plan Básico de Ordenamiento Territorial*. Administración municipal de Villa de Leyva.

Municipio de Villa de Leyva. 2004. *Plan Básico de Ordenamiento Territorial*. Administración municipal de Villa de Leyva.

Nagler, P. L., Inoue, Y., Glenn, E. P., Russ, A. L., & Daughtry, C. S. T. 2003. Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil-plant litter scenes. *Remote Sensing of Environment*, 87, 310–325.

Qiu, G.Y., Shimizu, H., Tobe, K., Gao, Y., 2000. Use of vegetation as an indicator of desertification and its applicability in remote sensing. In: *TPN 1 (Asian Reg. Thematic Programme Network Desertification Monit. & Assess.) Workshop, Tokyo 12. 6.*

Rasmus F, Rasmussen K, Theis T & C Mbow. 2009. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra Modis and Spot VGT data. *Remote Sensing of Environment* 113: 1886–1898.

Rincón, M. 2000. *Fomento del cultivo de frutales andinos con sistemas agroecológicos en Villa de Leyva*. Boyacá. Escuela de Ingeniería Agronómica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. Págs. 56–76.

Rodríguez N., Armenteras D., Morales M. & Romero M. 2004. *Ecosistemas de los Andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C., Colombia.

Sarmiento, G. 1975. *Evolution of arid Vegetation in Tropical America*. En: Goodall, D. W. (Ed.). *Evolution of Desert Biota*. Texas University Press. Texas.

Ustin, S. L., Roberts, D. A., Gamon, J. A., Asner, G. P., & Green, R. O. 2004. Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties. *Bioscience*, 54, 523–534.

Zha, Y., Gao, J. 1997. Characteristics of desertification and its rehabilitation in China. *Journal of Arid Environments* 37 (3), 419–432.

Zhu, Z., 1985. Status and trend of desertification in northern China. *Journal of Desert Research* 5 (3), 3–11.

Zhu, Z., Wu, H., 1998. *Study on Combating Desertification/Land Degradation in China*. China Environmental Science Press, Beijing, 164 pp.

### Resumen

El presente documento corresponde a la revisión de variables que son obtenidas a partir de sensores remotos y que son determinantes en el estudio y monitoreo del cambio climático. Dentro de los grupos líderes de cambio climático, existen unos subgrupos como el Sistema Global de Observación Terrestre (Global Terrestrial Observing System, GTOS), que en su plan de implementación ha identificado trece Variables Climáticas Esenciales (Essential Climate Variables, ECV) para ser abordadas a través de los grupos de observación de la Tierra existentes en el mundo. En el presente documento se muestra la revisión de las variables obtenidas a partir de sensores remotos como parte de la estrategia de implementación de datos para el estudio y monitoreo del cambio climático global.

### Palabras clave

Sensores remotos, cambio climático, variables climáticas esenciales.

### Abstract

This document corresponds to the review of the variables that are obtained from remote sensing sensors that are important in the study and monitoring of climate change. Among the leading groups of climate change, there are some groups such as the Global Terrestrial Observing System (GTOS) which in its implementation plan has identified thirteen Essential Climate Variables (ECV) to be addressed through the groups of earth observation in the world. This paper presents a review of these variables obtained from remote sensing as part of the implementation strategy of remote sensing data for studying and monitoring global climate change.

### Key words

Remote sensing, climate changing, essential climate variables.

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá (Colombia), paola.isaacs@igac.gov.co

<sup>2</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá (Colombia), hmramirez@igac.gov.co

## Introducción

El cambio climático y el calentamiento global son eventos de gran importancia en la actualidad, porque acarrearán consecuencias para el bienestar de la sociedad, el equilibrio de los ecosistemas y los sistemas productivos. Esta es una problemática prioritaria de desarrollo a nivel mundial, ya que es un evento en el que están centradas gran cantidad de estrategias y proyectos, por ser considerado como una de las grandes amenazas para el futuro de la humanidad (MAVDT-IDEAM-PNUD, 2008). Para el desarrollo de esta iniciativa, existen grupos como el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la Conferencia de las Partes (Conference of the Parties, COP) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que son los entes de mayor jerarquía para el trabajo con cambio climático. Dentro de estos grupos, se han creado una serie de subgrupos especializados en diversos componentes específicos, de igual forma se han desarrollado diferentes temáticas para ser abordadas.

Existen una serie de subgrupos encargados de trabajar con el componente de observación de la Tierra como son, el Sistema de Observación Climático Global (Global Climate Observing System, GCOS) y más específicamente el Sistema Global de Observación Terrestre (Global Terrestrial Observing System, GTOS). Dichos grupos en su plan de implementación han identificado trece Variables Climáticas Esenciales (Essential Climate Variables, ECV) para ser abordadas a través de los grupos de observación de la Tierra existentes en el mundo (FAO-GTOS, 2008). Estas variables identificadas son factibles de implementar a nivel mundial con el uso de sensores remotos, tienen alto impacto con respecto a los requerimientos de la CMNUCC y el IPCC (GCOS, 2004) y son aprobadas por las diferentes agencias espaciales y grupos de observación de la Tierra,

(European Spatial Agency – ESA, Group on Earth Observations – GEO, Global Earth Observation System of Systems GEOSS).

De acuerdo con estas entidades, se ha propuesto una serie de protocolos, estándares y material guía, para desarrollar un marco para la medición de las diferentes variables que se abordan para evaluar y monitorear el cambio climático a nivel mundial. En el presente documento se entrega una revisión de las variables obtenidas a partir de sensores remotos para el estudio y monitoreo del cambio climático global.

## Variables para el estudio y monitoreo del cambio climático

### Descarga de ríos

El seguimiento de la descarga de los ríos es adecuado para determinar y monitorear los cambios resultantes del cambio climático, expresado como volumen por unidad de área, y es la tasa a la cual fluye el agua por una zona o sección (Looser, 2009). Al mismo tiempo, la descarga de agua fresca proveniente de los ríos en los océanos juega un papel importante en la conducción del sistema climático, ya que el flujo de agua a los océanos puede influir en los patrones de circulación (FAO-GTOS, 2008). Para esta variable se ha desarrollado el proyecto “Global Terrestrial Network for River Discharge (GTN-R), con el objetivo de facilitar el acceso a los datos de las descargas de los ríos en tiempo real y así capturar de la mayoría el flujo de agua dulce en los océanos (FAO-GTOS, 2008).

Los datos de satélite pueden proveer cobertura global de datos hidrológicos críticos, que son logística y económicamente imposibles de obtener a través de redes de observación de campo (Looser 2009), sin embargo métodos más promisorios procedentes de los sensores remotos, se están desarrollando en la actualidad como en el caso de la interferometría SAR, la cual se basa en métodos interferométricos y altimetría para el seguimiento de las descargas de los ríos (FAO-GTOS, 2008).

### Uso del agua

La necesidad de abordar esta variable surge del uso del agua para actividades agrícolas, industriales y urbanas, así como para mantener las dinámicas ecosistémicas, especialmente por su aprovechamiento actual a escalas insostenibles. Considerando la estrecha relación entre el clima y el ciclo hidrológico, así como la descarga de agua proveniente de los glaciares, es importante evaluar los efectos del cambio climático y la variabilidad del clima en los recursos acuáticos alrededor del mundo, especialmente en los países subdesarrollados.

En el año 2005, la FAO en colaboración con otros socios produjo una nueva versión del mapa digital mundial de áreas de riego, basado en 10.825 unidades estadísticas subnacionales y la información geoespacial en la localización y extensión de las zonas de regadío agrícola. El sistema de información mundial de la FAO sobre el agua y la agricultura (AQUASTAT) recopila y difunde datos e información por país y por región, para proporcionar a los usuarios información sobre el estado de la gestión del agua agrícola en todo el mundo (GCOS, 2004; FAO-GTOS, 2008).

### Agua subterránea

Las aguas subterráneas tienen un papel importante en la naturaleza, ya que son los abastecimientos de los arroyos, ríos y humedales y contribuyen al mantenimiento del hábitat de vida silvestre y están bajo creciente presión causada por la intensificación de las actividades humanas y otros factores como el cambio climático (Famiglietti, 2009).

A nivel mundial fue creada la red global terrestre de agua subterránea Global Terrestrial Network on Ground Water (GTN-GW), aunque existen otros esfuerzos internacionales de la ESA, la NASA y la Agencia Espacial Francesa (CNES), para el monitoreo del agua subterránea con el uso de tecnologías geoespaciales. Las observaciones

satelitales de la misión Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), han permitido realizar observaciones de las variaciones en el almacenamiento total de agua (es decir, la suma de nieve, agua de vegetación, aguas superficiales, la humedad del suelo, aguas subterráneas) desde la escala local a escala continental, ya que el campo gravitatorio de la Tierra se ve afectado por los cambios en el almacenamiento vertical del agua terrestre (Famiglietti, 2009).

Estos análisis se han complementado con ayuda del Global Land Data Assimilation System (GLDAS), que produce campos globales, continuos de los estados superficiales y flujos y la misión de la ESA, GOCE que mide diferentes longitudes de onda en el campo de gravedad y contribuye a la detección de cambios en las aguas subterráneas. El terreno más promisorio es en el uso de tecnologías de RADAR combinado con GPS, ya que se correlacionan con las señales de los sistemas de almacenamiento de agua subterránea (Famiglietti, 2009).

### Nivel de los lagos

El nivel de los lagos es un índice que involucra el intercambio de agua natural dentro de las cuencas hidrográficas, por lo tanto, los niveles de fluctuación a largo plazo reflejan los cambios climáticos que ocurren en la región (Vuglinskiy, 2009).

Para realizar mediciones de esta variable, el terreno más promisorio está en utilizar la altimetría de radar para medir la altura de la superficie del agua de los grandes lagos, que tiene una precisión de dos centímetros y está disponible en tiempo casi real (Vuglinskiy, 2009). Estos datos están basados en los programas TOPEX/POSEIDON, Jason-1 y -2, ERS 2, ENVISAT y GFO y su precisión dependerá del tamaño del lago y del terreno que lo rodea. Los sensores remotos para el cálculo de altimetría y el monitoreo del área de los lagos y reservorios, tienen el potencial de proveer un número de atributos como el área, elevación, ubicación e identificación (Vuglinskiy, 2009).

En la actualidad está en creación el Centro Internacional de Datos sobre la Hidrología de los lagos y embalses para proveer datos de forma similar al Centro de Datos de Escorrentía Mundial (GRDC), y el Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas (CIEAS) (Vuglinskiy, 2009).

### Cobertura de la nieve

La cobertura estacional de la nieve puede cubrir más del 50 por ciento de la superficie terrestre del hemisferio norte durante el invierno, siendo su característica la responsable de las mayores diferencias anuales e interanuales en el albedo, afecta la distribución del permafrost y la recarga de la humedad. A su vez, a causa de la dependencia evidente de la cobertura de nieve en la temperatura, la tendencia a largo plazo de esta es que puede servir como indicador del cambio climático. Los sistemas de simulación de la cobertura de la nieve en los modelos climáticos e hidrológicos y los escenarios del estado del tiempo, son esenciales para la correcta representación del balance energético de la superficie, así como para el entendimiento del almacenamiento del agua proveniente del invierno y la predicción de la escorrentía durante todo el año (Armstrong, 2009).

Las cuatro unidades importantes para evaluar la cobertura de la nieve son, cobertura, extensión, profundidad y el equivalente de agua. Un número de mediciones *in situ* y con base en los sensores remotos que están disponibles para el monitoreo de la cobertura de la nieve, permiten hacer seguimiento y evaluar varios parámetros y procesos a escala regional y global (Armstrong, 2009).

Desde el año 1966 la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ha producido tablas semanales de la extensión de la nieve para las superficies de la Tierra de los hemisferios del norte usando imágenes satelitales. Dada la habilidad de penetrar la cobertura de nubes, los sensores remotos de microondas proveen datos durante la noche, calculan medidas de la profundidad de la nieve y su equivalente en agua, y permiten evaluar

las mediciones de la nieve basadas en datos ópticos. Especialmente para la estimación de la extensión de la cobertura de la nieve, los datos RADAR han probado ser muy exitosos (Armstrong, 2009). Asimismo, existen productos con el NESDIS (National Environmental Satellite Data and Information Service) para cuantificar la extensión de la nieve; el Northern Hemisphere EASE-Grid, para la extensión semanal de la nieve; el NSIDC SSM/I EASE-Grid, para estimar la concentración de hielo global diario; los datos MODIS poseen un algoritmo de mapeo de nieve que emplea un índice normalizado de nieve (NDSI); por su parte la NASA posee el radiómetro Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System (AMSR-E), que es un instrumento del satélite Aqua, para proveer mediciones de variables oceánicas, atmosféricas y terrestres de microondas (FAO-GTOS, 2008; Armstrong, 2009).

### Glaciares y casquetes polares

Los cambios en los glaciares y los casquetes polares proporcionan algunas de las pruebas más claras del cambio climático; constituyen las variables claves de las estrategias de detección temprana mundial de las observaciones relacionadas con el clima y causa graves impactos sobre el ciclo del agua terrestre ya que las sociedades dependen de agua de deshielo glaciario (Zemp, 2009).

La recolección de datos internacionales a través de redes de colaboración científicas es coordinada por la GTN-G (Global Terrestrial Network for Glaciers), se dirige y es mantenida por el Servicio Mundial de Monitoreo de Glaciares (WGMS) de la Comisión Internacional sobre Nieve y Hielo, la Federación de Datos Astronómicos y Geofísicos de Analysis Services (FAGS), la UNESCO y el PNUMA (GCOS, 2004; FAO-GTOS, 2008).

El World Glacier Inventory (WGI) es el sistema que contiene los datos de la dinámica de los glaciares. En 1995, el Global Land Ice Measurements del espacio fue un proyecto realizado entre el NSIDC (US National Snow and Ice Data Center) y el WGMS (World Glacier Monitoring Service), que

busca continuar la tarea del WGI con base en el análisis de imágenes multiespectrales Landsat TM/ETM+ y ASTER. De igual manera, existe un proyecto de la ESA llamado Glob Glacier cuyo objetivo es contribuir a la actual base de datos GLIMS y WGMS (Zemp, 2009).

Por otro lado, se ha empleado programas como ERS-1 y Geosat para generar Modelos Digitales de Elevación de Groenlandia y la Antártica, para este último existen mapas de resolución 200m, 400m y 1km de imágenes Radarsat. El futuro ICESat y el futuro CryoSat proveerán datos iniciales de casquetes polares (Zemp, 2009).

### Permafrost y suelo congelado

El permafrost se refiere a los materiales terrestres que permanecen iguales o inferiores a 0 °C durante al menos dos años consecutivos. En el hemisferio norte, las regiones de permafrost ocupan aproximadamente 23 millones de km<sup>2</sup>, o 24 por ciento de la superficie de la Tierra libre de hielo. A medida que el calentamiento se produce, el permafrost en los paisajes es susceptible al deshielo y al asentamiento del terreno, la erosión y la pendiente. A diferencia de la nieve, el hielo que cubre el permafrost y la zona que recubre el deshielo estacional (capa activa) no es fácil de observar de forma remota y requiere de las observaciones *in situ* para definir su magnitud y sus propiedades. La temperatura del permafrost se utiliza para detectar cambios en el clima terrestre, ya que proporciona una integración de los cambios en la superficie del suelo, que a su vez, puede reflejar los cambios en el clima (Smith & Brown, 2009).

La Red Terrestre Mundial para Permafrost (GTN-P), coordinado por la Asociación Internacional del Permafrost (IPA) constituye una red de referencia del GCOS para estas variables. Cada cinco años, el NSIDC (National Snow and Ice Data Center) prepara y distribuye el Circumpolar Active Layer Permafrost System que contiene la información del sistema y los datos obtenidos en los últimos 5 años (GCOS, 2004; Smith & Brown, 2009).

En cuanto a los sensores remotos, las revisiones recientes y recomendaciones corresponden al IGOS (Integrated Global Observing Strategy) del Cryosphere Theme Report. Sin embargo, este abordaje no está bien desarrollado y validado, ya que es difícil que los sensores logren penetrar el hielo, aunque sí las formas periglaciares. El programa más promisorio para mapear este tipo de elementos es el RADAR, en combinación con los productos procedentes de otros sensores, incluyendo la temperatura de superficie y profundidad de la nieve (Smith & Brown, 2009).

El radar de penetración terrestre (GPR) se ha utilizado con cierto éxito para mapa de espesores de capa activa a lo largo de transectos. Dado que el agua absorbe con eficacia los pulsos electromagnéticos, el perfil es más eficaz en invierno, cuando la Tierra está helada y cubierta de nieve. El método se basa en el principio de que la capa activa contiene menos hielo que el permafrost inmediatamente inferior, resultando en un horizonte que refleja en la interfase. Con una cuidadosa calibración local lograda a través de perforaciones, es posible realizar las estimaciones del perfil en profundidad (Smith & Brown, 2009).

### Albedo

El albedo de la superficie terrestre, es la relación de la radiación que cualquier superficie refleja sobre la radiación que incide sobre la misma, y es un parámetro clave que controla el presupuesto de energía radiativa planetaria y la división de energía radiativa entre la atmósfera y la superficie. La energía absorbida en la superficie se utiliza para conducir procesos de vegetación como la evapotranspiración, la fotosíntesis y la asimilación de carbono, y rigen los procesos relacionados con la temperatura como la evaporación y la nieve derretida (Barker, 2009).

Las mediciones *in situ* por medio de torres apoyan la determinación local y regional del albedo de la superficie, mientras que la detección por sensores remotos ofrece el único método viable de medición y seguimiento de la heterogeneidad global del albedo.

y la anisotropía de reflectancia (FAO-GTOS, 2008; Barker, 2009). Las observaciones direccionales de satélites están siendo actualmente utilizadas por un número de instrumentos como el MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR), Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances (POLDER), Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), Meteosat, y Meteosat Segunda Generación (MSG), para proveer productos regionales y globales del albedo a una variedad de resoluciones espaciales y temporales (FAO-GTOS, 2008).

Para estimar el albedo de la superficie sobre la base de los sensores remotos, las mediciones de reflectancia se deben interpretar con la ayuda de modelos de transferencia de radiación que pueden ayudar a recuperar las variables deseadas de las observaciones reales (GCOS, 2006). La mayoría de algoritmos de satélite se basan en múltiples observaciones direccionales libres de nubes y corregidas atmosféricamente para determinar una apropiada función de distribución bidireccional de la reflectancia de la superficie (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF; FAO-GTOS, 2008; Barker, 2009).

### Fración de radiación absorbida fotosintéticamente activa (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, FAPAR)

La Radiación Activa Fotosintética (Photosynthetically Active Radiation, PAR), corresponde a la radiación solar que alcanza la superficie en la región del espectro del 0.4 al 0.7 μm. Según esta definición el FAPAR se refiere a la fracción de PAR que es absorbida por el dosel de la vegetación. FAPAR es una variable primaria que controla la actividad fotosintética de las plantas y constituye un indicador de la presencia y productividad de la vegetación viva, así como la intensidad de los sumideros de carbono terrestre (Gobron y Verstraete, 2009). Asimismo, los cambios ocurridos en el FAPAR se

han usado como indicadores de desertificación y para monitorear la productividad de los bosques y la agricultura (Gobron y Verstraete, 2009).

El FAPAR es difícil de medir directamente, pero es inferido a través de modelos que describen la transferencia de la radiación solar en doseles usando observaciones de sensores remotos (Gobron y Verstraete, 2009). La generación del FAPAR global usando datos de mediciones satelitales de la NASA y la ESA tiene recientemente una base regular, en la que se requiere varias series de tiempo, de sensores que posean la banda del azul en su cobertura espectral (GCOS, 2004; Gobron y Verstraete, 2009).

Para su cuantificación se han empleado observaciones satelitales de media resolución de instrumentos MODIS, MISR, SeaWiFS y MERIS (GTOS, 2008). Adicionalmente, varios proyectos nacionales e internacionales como JRC-FAPAR, GLOBCARBON y LANDSAT, entre otros (Tabla 1), proveen colecciones adicionales de productos usando datos de otros sensores como ATSR, VEGETATION o SEVIRI durante varios años y a escala global (FAO-GTOS, 2008).

### Índice de Área Foliar (Leaf Area Index, LAI)

El Índice de Área Foliar (IAF) del dosel de una planta es una medida cuantitativa de la cantidad de material verde vivo presente en las hojas, por unidad de superficie del suelo. En concreto, se define como la superficie total de un solo lado de todas las hojas en el dosel en una región definida (Gobron y Verstraete 2009b).

Sin embargo, la definición de LAI utilizada en las ciencias espaciales de sensores remotos está vinculada al estado de la variable que corresponde a la profundidad óptica del dosel, medida sobre la vertical. Cuando el LAI se estima de las mediciones obtenidas por sensores remotos, por inversión de un modelo de transferencia de radiación, su valor corresponde a un valor efectivo relacionado con la resolución espacial de las mediciones. La conversión de las medidas geométricas a valores

Tabla 1. Diferentes modelos realizados en proyectos e instituciones

Proyectos/Institución	Datos de Entrada	Método
JRC-FAPAR ESA MERIS-FAPAR	Superficie de la atmósfera	Algoritmo basado en modelos de transferencia radiativa
NASA, MODIS LAI/FAPAR	Reflectancia de la superficie y cobertura de la Tierra	Modelo basado en tipo de cobertura de la Tierra y NDVI
NASA, MIRS LAI/FAPAR	Productos de superficie BHR, DHR, BRP	Modelo basado en tipo de cobertura de la Tierra y NDVI
GLOBCARBON	Reflectancia de la superficie	Algoritmo de la relación LAI y tipo de cobertura
CYCLOPES	Reflectancia de la superficie	Redes neuronales
LANDSAT	Bandas del visible e infrarrojo cercano	Relación paramétrica
JRC-TIP	Albedo de la superficie en la banda ancha y las bandas del visible e infrarrojo cercano	Inversión de modelos de dos flujos

eficaces se convierte en un paso esencial que requiere información adicional sobre la estructura y la arquitectura del dosel (Gobron y Verstraete, 2009b).

Las agencias espaciales y otros proveedores institucionales (por ejemplo, MODIS, MISR y GLOBCARBON) generan mapas de LAI en diversas resoluciones espaciales para períodos diarios y mensuales, a lo largo del globo, utilizando principalmente sensores ópticos (Gobron y Verstraete, 2009b).

Se han establecido grupos como el LAInet programme patrocinado por la NASA y es complementada por el grupo BIGFOOT y la red Flux and Energy Exchange Network (FLUXNET). El grupo CEOS WGCV está planeando un rol coordinador en este trabajo y chequea las mediciones a través de una base de datos. La estimación del LAI desde el espacio es bastante difícil cuando la cobertura del dosel es dispersa, las medidas de la reflectancia están dominadas por las propiedades del suelo y la exactitud es baja. De igual manera, desde que las mediciones de LAI se vean afectadas por la reflectancia, esta cuantificación debe estar asociada a la del FAPAR (GCOS, 2004).

### Incendios

Las emisiones de GEI y aerosoles provenientes del fuego son factores climáticos, importantes al tener una gran influencia en el almacenamiento y flujo del carbono en la biosfera y en la atmósfera, y puede causar cambios a largo plazo en la cobertura de la Tierra (GCOS, 2003). La información de la actividad del fuego es usada para la investigación del cambio global, estimando emisiones atmosféricas y desarrollando evaluaciones periódicas globales y regionales (FAO-GTOS, 2008).

Dada la amplia variabilidad en la actividad del fuego, los datos satelitales proveen los medios más útiles para monitorearlo. Existen sistemas geoestacionarios y polares con estados operacionales completos y sistemas experimentales que proveen observaciones sistemáticas usadas para la creación de datos a largo plazo. Los mayores registros globales a largo plazo de los fuegos activos han sido generados por la ESA (ATSR World Fire Atlas) y la NASA (TRMM y MODIS). El monitoreo geoestacionario se ha realizado usando programas GOES (WF-ABBA) y MSG SEVIRI (EUMETSAT Active Fire Monitoring).

Los sistemas como el NPP/NPOESS, el Visible Infrared Imagery Radiometer Suite (VIIRS) y los sensores en el Global Monitoring for Environment and Security (GMES), proveerán datos de base de alta resolución para la validación de productos que garanticen la continuidad de la mapeación del fuego y las capacidades de detección (GCOS, 2003; FAO-GTOS, 2008).

En el momento la única base de datos disponible del área quemada a largo plazo es en parte basada en la detección de fuego activo GFDE2, y algunas agencias espaciales han generado productos regionales y globales de disturbios ocasionados por el fuego, empleando sensores ópticos y térmicos, para detectar la ubicación de eventos de fuego activo, la extensión espacial del área quemada y el tamaño de las plumas de humo y ceniza (GCOS, 2003; FAO-GTOS, 2008).

### Cobertura de la Tierra

La cobertura de la Tierra está definida como el componente físico observable que incluye vegetación natural o plantada y los asentamientos humanos que ocupan superficie. Las observaciones confiables de la cobertura, el cambio ocurrido y su evaluación son esenciales para el manejo sostenible de los recursos naturales, entendimiento y mitigación del cambio climático, modelamiento de los ecosistemas y ciclos biogeoquímicos para abordar otros aspectos importantes como la seguridad alimentaria (Herold, 2009).

Las características de la cobertura vegetal revelan procesos en curso de deforestación, desertificación, urbanización, pérdida de la biodiversidad y funciones ecosistémicas, y manejo del agua y la energía. La cobertura de la Tierra ha sido mapeada y caracterizada varias veces y muchos países tienen cierto tipo de sistemas de monitoreo en curso para la cartografía de bosques, agricultura, sistemas de información cartográfico e inventarios (FAO-GTOS, 2008; Herold, 2009).

Los datos de satélite ofrecen gran utilidad en estudios de cobertura vegetal por el área que abarcan, lo que facilita muchas de las actividades de monitoreo y evaluación a escala mundial y regional (Defries et ál., 2006; Herold, 2009).

Los juegos de datos globales y regionales multispectrales y multitemporales de la cobertura de la Tierra son actualmente producidos por un rango de agencias espaciales e institutos de investigación a resoluciones espaciales medias (250 m a 1 km) para determinar el tipo de cobertura de la Tierra y a resoluciones espaciales finas (10–50 m) para determinar el tipo y detectar el cambio en la cobertura (FAO-GTOS, 2008; Herold, 2009).

La radiancia espectral es la variable primaria usada para determinar el tipo de cobertura de la Tierra proveniente de datos de sensores remotos; los procedimientos para detectar patrones espaciales de reconocimiento proveen análisis de pixel u orientado a objetos basado en las respuestas de los diferentes tipos de cobertura de la Tierra en observaciones de sensores satelitales multi o hiperespectrales con un número de bandas continuas. De igual manera, los datos adquiridos en diferentes periodos de tiempo permiten reconocer cambios a través del tiempo y asistir en la caracterización o detección de cambios (FAO-GTOS, 2008; Herold, 2009).

Los sensores de Radar de Apertura Sintética, la interferometría SAR y los sensores de LIDAR, permiten brindar mayor información sobre aspectos como la rugosidad, topografía y estructura de la vegetación, comparados con datos de las imágenes multispectrales (GCOS, 2004; Herold, 2009).

Por su parte, como elemento resultante de las actividades humanas se encuentra la deforestación, la cual como parte del uso y cobertura de la Tierra, contribuye significativamente sobre el cambio climático global. Las emisiones anuales por la deforestación tropical equivalen entre el 15 y el 25 % del total de emisiones antropogénicas de GEI (IPCC, 2007). Se estima que del total de emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por el hombre, un 25 % se deben a la deforestación tropical y que estas son responsables

del 20 al 60 % del aumento de las temperaturas. Asimismo, dan paso al cambio de cobertura original por cultivos o pastizales, que incrementan la producción de GEI y favorecen la aparición de incendios y la fragmentación del bosque (Defries et ál., 2006; Herold, 2009).

### Biomasa

La biomasa está definida como la cantidad en volumen de materia orgánica viva dividida en biomasa aérea, biomasa subterránea, materia muerta y hojarasca, la cual puede ser empleada como una variable climática esencial, al ser una medida directa actual y futura relacionada con la captación o emisión de carbono entre los ecosistemas terrestres y la atmósfera. La biomasa permite conocer las reservas de CO<sub>2</sub> en las coberturas, permite calcular la Productividad Primaria Neta (PPN) de la fotosíntesis y el efecto de los incendios de la vegetación en la atmósfera (Anaya et ál., 2009).

De esta forma, según la cantidad de biomasa que contenga la cobertura de la vegetación, se puede presentar una gran variación en el clima local, regional e incluso global, particularmente en la temperatura del aire y la humedad (Bombelli et ál., 2009).

La biomasa puede ser cuantificada ya sea en campo y/o mediante el uso de sensores remotos, según la escala y las necesidades de la evaluación (Bombelli et ál., 2009). Existen estudios piloto realizados con datos de LIDAR aerotransportado y de muy alta resolución óptica que se han utilizado en un método de muestreo para estimar la biomasa de los diferentes tipos de bosques. Los datos de alta resolución óptica se pueden utilizar para obtener métricas claves de árboles individuales en el dosel del bosque y delinear las zonas de copas en el complejo de bosques tropicales. Además, los nuevos datos de campo para el desarrollo de modelos alométricos son útiles para la conversión de los datos de dichos productos a las estimaciones de las reservas de biomasa (Defries et ál., 2006).

### Sensores remotos empleados para evaluar las variables de cambio climático

A continuación se hace un listado de los programas disponibles para evaluar atmósfera (Tabla 2), océanos (Tabla 3), nieve y hielo (Tabla 4), cobertura vegetal (Tabla 5) y suelos (Tabla 6).

Tabla 2. Programas disponibles para evaluar atmósfera

Programa	Aplicación
TERRA Y AQUA	Aerosoles, composición, tipo y cantidad de nubes, temperatura, gases traza y radiaciones.
ENVISAT	Aerosoles, gases traza, ozono.
GLAS (ICESAT)	Aerosoles.
CALIPSO	Aerosoles, composición y nubes.
NOAA	Temperatura, ozono.
AURA	Aerosoles, ozono y gases traza.
METEOSAT	Vientos, radiaciones.
CLOUDSAT	Agua y precipitación. Composición y nubes.
METOP	Humedad y temperatura.

Tabla 3. Programas disponibles para evaluar océanos

Programa	Aplicación
OCEANSAT	Color y biología del océano.
TERRA Y AQUA	Temperatura, color y biología del océano.
ENVISAT	Color y biología del océano, topografía y corrientes, temperatura superficial, espectro y altura del oleaje, entre otros.
ERS	Vientos.
ALOS	Espectro y altura del oleaje.
NOAA	Temperatura superficial, corrientes, circulación entre otras.
METEOSAT	Temperatura.

Tabla 4. Programas disponibles para evaluar nieve y hielo

Programa	Aplicación
RADARSAT	Topografía, cobertura y forma de nieve y casquetes.
ICESAT	Topografía .
TERRA	Cobertura y forma de nieve y casquetes.
ENVISAT	Topografía, cobertura y forma de nieve y casquetes.
ERS	Topografía, cobertura y forma de casquetes.
ALOS	Topografía, cobertura y forma de nieve y casquetes.
NOAA	Cobertura y forma de nieve.
CRYOSAT	Topografía, cobertura y forma de casquetes.

Tabla 5. Programas disponibles para evaluar cobertura vegetal

Programa	Aplicación
LANDSAT	Diferenciación de coberturas, vigor y humedad de la vegetación, productividad primaria, biomasa.
SPOT	Diferenciación de coberturas, vigor y humedad de la vegetación, productividad primaria, biomasa.
TERRA	Diferenciación de coberturas, vigor y humedad de la vegetación, productividad primaria, biomasa.
ALOS	Diferenciación de coberturas, vigor y humedad de la vegetación, productividad primaria, biomasa.
ERS	Diferenciación de coberturas, vigor y humedad de la vegetación, productividad primaria, biomasa.
RADARSAT	Diferenciación de coberturas.
ENVISAT	Diferenciación de coberturas, vigor y humedad de la vegetación, productividad primaria, biomasa.
NOAA	Diferenciación de coberturas, vigor y humedad de la vegetación, productividad primaria, biomasa.

Tabla 6. Programas disponibles para evaluar suelos

Programa	Aplicación
ENVISAT	Humedad, albedo y reflectancia.
NOAA	Humedad y temperatura.
TERRA (Aster, MODIS)	Albedo y reflectancia.
METEOSAT	Albedo y reflectancia.

### Conclusiones

Para el estudio y monitoreo del cambio climático con base en sensores remotos, es necesario implementar el uso de protocolos y estándares para el análisis de este tipo de datos y la posterior información arrojada, de modo que sea comparable en todos los países del mundo.

Asimismo, es necesario definir qué variables son importantes para evaluar dicho tema, con el fin de no replicar esfuerzos innecesarios y aprovechar al máximo dicha información. La iniciativa de recopilar estas variables ya definidas a nivel mundial busca difundir los programas existentes para el monitoreo del cambio climático, conocer dichos lineamientos y difundirlos especialmente en el ámbito nacional para la comunidad científica y social que no la conoce hasta el momento.

### Referencias bibliográficas

Anaya, J. A., E. Chuvieco & A. Palacios-Orjuela. 2009. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management* 257(4): 1237-1246.

Armstrong, R. GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 60. Snow. 24 pp.

Barker, C. GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 63. Albedo. 20 pp.

Bombelli, A., v. Avitabile, H. Balzter, I. Belelli Marchesini, M. Bernoux, M. Brady, R. Hall, M. Hansen, M. Henry, M. Herold, A. Janetos, B. E. Law, R. Manlay, L. G. Marklund, H. Olsson, D. Pandey, M. Saket, C. Schullius, R. Sessa, Y. E. Shimabukuro, R. Valentini, M. Wulder. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. Report of the Global Terrestrial Observing System (GTOS) number 67, report 10. 30 p.

Defries, R. Achard, F., Brown, S., Herold, M., Murdiyarsa, D., Schlamadinger, B. y C. De Souza 2006. Reducing Greenhouse Gas Emissions from Deforestation in Developing Countries: Considerations for Monitoring and Measuring, Report of the Global Terrestrial Observing System (GTOS) number 46, GOFCC-GOLD report 26.

Famiglietti, J. GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 56. Ground water. 11 pp.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) - Global Terrestrial Observation System (GTOS). 2008. Terrestrial Essential Climate Variables. Biennial report supplement for Climate Change Assessment, Mitigation and Adaptation. Reporte GTOS 52. 44 pp.

Global Climate Observing System. GCOS. 2003. The second report on the adequacy of the global observing systems for climate in support of the UNFCCC April GCOS – 82.

Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC Executive Summary October 2004. GCOS – 92 (ES)(WMO/TD No. 1244) Systematic observation requirements for Satellite-based products for climate. Supplemental details to the satellite-based component of the "Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC" September 2006–103 pp.

Gobron, N y M. Verstraete. GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 65. (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, FAPAR). 24 pp.

Gobron, N y M. Verstraete. b. GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 66. Leaf Area Index (LAI). 22 pp.

## Eliminación del bandeamiento de imágenes satelitales LANDSAT 7

### Filling gaps in landsat etm images

David Arenas Herrera<sup>1</sup> y Mauricio Ramírez Daza<sup>2</sup>

Herold, Martin. *GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 64. Landcover. 36 pp.*

IPCC. 2007. *Climate change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the 4<sup>th</sup> Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pachauri, R.K., and A. Reisinger (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. 104 p.*

Looser, Ulrich. *GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 56. Riverdischarge. 24 pp.*

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 2008. *Segunda Comunicación Nacional Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero – Años 2000 y 2004, Módulo Uso de La Tierra, Cambio en el uso de la Tierra y Silvicultura (LULUCF), Resumen de Cálculos y Resultados. Resumen Técnico del Inventario Nacional de GEI. Proyecto “Preparación de la Segunda Comunicación Nacional de Colombia Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático-CMNUCC”.*

Smith S. & J. Brown. *GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 62. Water level in lakes and reservoirs, water storage. 32 pp.*

Vuglinskiy, Valery. *GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 59. 28 pp.*

Zemp, Michael Zemp, Isabelle Gärtner-Roer, Wilfried Haerberli, Martin Hoelzle and Frank Paul. *GTOS-WMO-UNESCO-UNEP-ICSU-FAO. 2009. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables. GTOS 61. Glaciers and Ice Caps. 28 pp.*

### Resumen

Las imágenes Landsat han sido una gran fuente de información por casi 40 años. La más reciente generación, Landsat 7, sufrió en el año 2003 una grave avería en su sensor y desde entonces toma imágenes con pérdidas de información o gaps. Este defecto puede ser corregido de diversas formas, una de ellas es por medio de la generación de mosaicos compuestos por diferentes imágenes con bandeamiento de la misma zona y por medio de filtros especializados que reduzcan o eliminen el ruido presente en las mismas.

### Palabras clave

Percepción Remota, Landsat, Bandeamiento, Gaps.

### Abstract

Landsat images have been a great source of information for almost 40 years. The latest generation, Landsat 7, in 2003 suffered a serious breakdown in its sensor and then takes imagery with a loss of information or gaps. This defect can be corrected for different ways, one of them is through the generation of mosaics composed of different images with gaps of the same area and through specialized filters which reduce or eliminate the noise present therein.

### Key words

Remote Sensing, Landsat, Fill the Gaps.

1. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá (Colombia), david.arenas@igac.gov.co  
2. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá (Colombia), hmramirez@igac.gov.co