

Análisis Geográficos

REVISTA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI Número 51 pp. 1-108 2019 Bogotá, Colombia, ISSN 0010-8551

IGAC
INSTITUTO GEOGRÁFICO
AGUSTÍN CODAZZI



**PROSPERIDAD
PARA TODOS**

COMITÉ EDITORIAL

- **Juan Antonio Nieto Escalante**
Director General
- **Diana Patricia Ríos García**
Secretaria General
- **Jaime Alberto Duarte Castro**
Subdirector de Geografía y Cartografía
- **Germán Darío Álvarez Lucero**
Subdirector de Agrología
- **Fernando León Rivera**
Subdirector de Catastro

EDITORES

- **Juan Antonio Nieto Escalante**
- **Edna Piedad Cubillos Caicedo**
- **Jonás C. León P.**
Editor
- **Luis Carvajal Celemin**
- **Edna Piedad Cubillos Caicedo**
Revisión y Corrección de Estilo

- **Martha Patricia Camacho Hernández**
Jefe Oficina Asesora de Planeación
- **Edna Piedad Cubillos Caicedo**
Oficina del Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)
- **Natalia Ochoa Sánchez**
Jefe Oficina de Difusión y Mercadeo de Información
- **Luis Carvajal Celemin**
Asesor Dirección General

- **Alba Giraldo**
Oficina Difusión y Mercadeo de Información
Diseño y Diagramación
- **Andrea Neiza M.**
Oficina Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)
Diseño y Diagramación
- **Imprenta Nacional de Colombia**
Impresión

Instituto Geográfico Agustín Codazzi
Análisis Geográficos / El Instituto. - - Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia, No. 51, 2013
108 p. ., ils. Mapas a colores, cuadr.
Incluye Referencias Bibliográficas
Texto bilingüe español-inglés

ISSN 0120-8551
1. Percepción Remota - Villa de Leiva (Boyacá) 2. Sensores Remotos 3. Cambios Climáticos Globales 4. Imágenes Satelitales - Colombia 5. Imágenes Hiperespectrales 6. Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE) 7. Sistema de Información Catastral (SIC) 8. Investigación Científica.

ES PROPIEDAD DEL ESTADO

La responsabilidad de los contenidos y la calidad de las imágenes son exclusivamente de los autores y no compromete al Comité Editorial ni a los Editores de la Revista.

© INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI 2013

www.igac.gov.co



TABLA DE CONTENIDO

Percepción Remota

07 José Camilo Fagua y Elena Posada
Evaluación temporal del proceso de desertificación en el enclave seco andino de Villa de Leyva, departamento de Boyacá (Colombia) empleando NDVI de MODIS.

17 Paola Johanna Isaacs Cubides y Mauricio Ramírez Daza
Variables obtenidas a partir de sensores remotos para el estudio y monitoreo del cambio climático global.

29 David Arenas Herrera y Mauricio Ramírez Daza
Eliminación del bandeamiento de imágenes satelitales LANDSAT 7.

35 Nardy Liliana Neiza M. y Elena Posada
Reconocimiento de zonas inundadas con datos de imágenes satelitales en Colombia.

49 Jonás C. León Pérez
Imágenes Hiperespectrales (HSI): La nueva generación de los sensores remotos.

TABLE OF CONTENTS

Remote Sensing

07
Temporal evaluation of desertification process at Villa de Leiva's andean dry location using NDVI of MODIS.

17
Variables obtained through remote sensing for the study and monitoring of the global climate change.

29
Filling gaps in landsat etm images.

35
Recognition of zones flooded with information of satellite images in Colombia.

49
Hyperspectral Imaging (HSI): Remote sensing new generation.

 **Infraestructuras de Datos Espaciales**

69

Óscar Mauricio Puentes

Micrositio del geoportal ICDE. Un avance para la consolidación del nodo de riesgo y emergencia ICDE.

 **Gestión del Conocimiento**

75

Jaime Silva Herrera y Ángela María Guancha M.

Innovación y tecnología. Una mirada a la política de investigación del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

 **Recurso Tierra**

83

Napoleón Ordóñez Delgado, Ana María Palacino y Jorge Hernán Londoño Ramos

Metodología para elaborar y actualizar Áreas Homogéneas de Tierras con fines catastrales.

Spatial Data Infrastructures

69

Microsite of Colombian spatial data infrastructure. A step towards the consolidation of risk and emergency node.

Knowledge management

75

Innovation and technology. A look at the research policy of the Geographical Institute Agustín Codazzi.

Land Resources

83

Methodology to develop and update Homogeneous Areas of Land for cadastral.

En la actualidad Colombia enfrenta múltiples retos, entre los que se incluyen la mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático, la destrucción de los recursos naturales y la biodiversidad, la erradicación de la pobreza extrema y, más concretamente, la adopción y puesta en marcha de un modelo de desarrollo que garantice un desarrollo urbano y rural armónico, sostenible y justo. En este último caso, tomando en consideración la valerosa política de tierras del actual Gobierno con sus componentes de restitución y formalización de la propiedad. Para todo ello, serán indispensables los materiales cartográficos, agrológicos y catastrales que se espera producirá el Instituto.

Estos retos y muchos otros, requieren de la participación activa de los científicos del país para dar una respuesta basada en la investigación confiable y oportuna. En este sentido, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), orientado por su misión institucional, realiza investigaciones científicas e implementaciones tecnológicas en los campos de la geografía y la cartografía, la agrología, la geodesia, el catastro, la percepción remota, los sistemas de información geográfica y tecnologías afines y las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE), en el marco del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología.

Es menester recalcar que las investigaciones se van a desarrollar utilizando tecnologías avanzadas, como el uso de vehículos aéreos no tripulados y radares, entre otras, que apoyarán la producción oportuna de cartografía, a escalas detalladas, de las zonas de alta concentración predial o a las cuales es difícil acceder por los medios tradicionales por sus condiciones de nubosidad permanente.

Para lograr el máximo provecho del esfuerzo investigativo es necesario divulgar los hallazgos, como se ha venido haciendo en la Revista *Análisis Geográficos*. En este número 51, en la Revista se abordan temas variados del quehacer científico del IGAC, que esperamos sean de provecho y utilidad para los formuladores de política y para el mismo cuerpo de investigación nacional y extranjero.

En la sección de Percepción Remota se presentan cinco trabajos que muestran la utilidad de las imágenes de sensores remotos para la evaluación temporal del proceso de desertificación, el reconocimiento de zonas inundadas y el estudio y monitoreo del cambio climático global. Así mismo, se trata sobre técnicas de eliminación de bandeamientos de imágenes satelitales y las bondades de imágenes hiperespectrales que permiten detectar, identificar, discriminar y cuantificar con mayor precisión los suelos, la vegetación y los minerales, entre otros.

La sección Infraestructura de Datos Espaciales muestra la importancia de la comunicación entre la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE) y el sector de riesgos y emergencias, para la toma de decisiones oportunas. En la sección de Recurso Tierra se presenta la metodología para la determinación de zonas homogéneas de tierras, de mucha utilidad para apoyar la formación y actualización catastral de los predios rurales y el ordenamiento territorial. Adicionalmente, en lo relacionado con la gestión del conocimiento se trata sobre la política de investigación del IGAC, en su perspectiva histórica, reconociendo que este es un campo dinámico y que está en constante evolución, tema que será analizado de forma detallada en futuras entregas.

Por último, invitamos a nuestros investigadores, socios estratégicos y a todos aquellos profesionales que laboran en instituciones con funciones complementarias a las nuestras, a continuar con entusiasmo la divulgación de la producción científica, que será bien recibida en nuestra revista, y así contribuir, desde el campo de la información científica, a la construcción de un país en paz, con desarrollo sostenible, en el contexto de un mundo globalizado.

Juan Antonio Nieto Escalante
Director General IGAC.

Evaluación temporal del proceso de desertificación en el enclave seco andino de Villa de Leyva, departamento de Boyacá (Colombia) empleando NDVI de MODIS

Temporal evaluation of desertification process at Villa de Leyva's andean dry location using NDVI of MODIS

José Camilo Fagua¹ y Elena Posada²

Resumen

Esta investigación se centró en determinar la resolución temporal mínima (número mínimo de tomas anuales) que se deben tener para que un sensor remoto óptico pueda evaluar la desertificación en un enclave seco andino en la región de Villa de Leyva (Boyacá). Para esto se analizaron 60 imágenes raster mensuales (de enero del 2006 a diciembre del 2010) correspondientes a los valores de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) para la zona de estudio. Con base en los resultados de este análisis, posteriormente se identificaron zonas en proceso de desertificación mediante relaciones lineales y no lineales entre los años 2000 y 2010. Finalmente se estimó el cambio entre los años 2000 y 2010 para tres categorías que son empleadas usualmente para estimar el cambio neto espacial en desertificación: zonas desertificadas, zonas con alto riesgo de desertificación y zonas con bajo riesgo de desertificación.

Palabras clave

NDVI, Villa de Leyva, MODIS, Mann Kendall, análisis de tendencias.

Abstract

Using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) remote sensing, we determine the minimal temporal resolution (the less number of images by year) necessary to evaluate desertification in a dry enclave locates in Villa de Leyva (Boyacá) (Colombia). Specifically, we analyses 60 monthly raster of NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) MODIS (from January 2006 to December 2010) corresponding to this dry enclave. The areas in which desertification increasing, decreasing or not changes significantly were identify using trends analysis (linear and not linear). Additionally, the overall change in the study area from 2000 to 2010 was estimated take into account three categories, lands in desertification, land in high risk of desertification, and lands of low risk of desertification.

Key words

NDVI, Villa de Leyva, MODIS, Mann Kendall, trends analysis.

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



Introducción

La Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación, la Sequía, y la Degradación de Tierras (CNULD) define desertificación como un proceso en el que tierras fértiles de ecosistemas secos (zonas áridas, semiáridas y/o subhúmedas secas) van perdiendo su fertilidad hasta degradarse a desiertos (CNULD, 2010). Estas zonas son más propensas que otros ecosistemas a la degradación total de sus suelos (desertificación), debido a que la pérdida de coberturas vegetales nativas, causada principalmente por el hombre, hace que sus suelos queden sin protección contra las condiciones climáticas drásticas (que caracterizan estos ecosistemas) y los manejos agrícolas inadecuados, dos fenómenos que en conjunto aceleran dramáticamente la desertificación (Poesen et ál., 1994; Medalus Project, 1999). Por lo tanto, se considera que la principal causa de desertificación es la destrucción total de la vegetación nativa debido a que este tipo de vegetación está adaptada a las condiciones drásticas (climáticas y físicas) que caracterizan a estos ecosistemas, lo cual les permite establecerse y actuar como un agente protector del suelo que lo utiliza sin agotarlo, y que mitiga la degradación que producen las actividades humanas y las variaciones climáticas drásticas (UNU-INWEH, 2007).

Pese a que no existen datos concretos, se plantea que en Colombia debe existir una acelerada tasa de desertificación en zonas secas debido a las condiciones topográficas (cadenas montañosas y valles internos) y climáticas (alta precipitación y vientos fuertes) del país, y a la forma desordenada como se han dado los procesos de ocupación y uso del territorio. Además se asume que otros factores como la erosión, la compactación, la salinización y la contaminación, han dinamizado aun más este proceso (MAVDT 2007). Se estima que el 21,5% (245.342 km²) de Colombia son ecosistemas secos

ubicados principalmente en la región Caribe, los valles interandinos del Magdalena y el Cauca, los altiplanos andinos, y los departamentos del Meta, Arauca y Vichada (IDEAM et ál., 2007). Estimaciones gruesas (escala 1:500.000) basadas en una relación de dos indicadores para identificar zonas propensas a la desertificación (coberturas de ecosistemas secos y suelos salinizados y/o erosionados), han evidenciado que cerca del 78,9% de los ecosistemas secos presentan riesgos de desertificación catalogados entre moderados y muy altos (IDEAM, 2008).

Los sensores remotos son una herramienta esencial para monitorear espacialmente la desertificación; una de las formas para realizar este monitoreo consiste en evaluar la dinámica espaciotemporal de la vegetación, usando índices de vegetación para identificar coberturas vegetales y sus cambios en el tiempo. Se asume que la pérdida de vegetación es un buen indicador de desertificación debido a que cuando está ocurriendo este proceso, el suelo va perdiendo la capacidad para sostener vegetación (bosques, cultivos, plantaciones de árboles, pastos, entre otros en el tiempo), por lo tanto el cambio de coberturas vegetales a suelo desnudo indica un avance espacial de la desertificación.

El NDVI es uno de varios índices (EVI, SAVI, GEMI, entre otros) para identificar vegetación a partir de imágenes de sensores remotos ópticos y se calcula haciendo una relación entre la diferencia de las bandas infrarroja cercana y roja y, su suma; esta relación resalta la vegetación fotosintéticamente activa gracias a la alta reflectividad de la banda infrarroja y a la absorvencia que la banda roja tiene en los vegetales que contienen altas concentraciones de clorofila (hojas verdes), es decir, el NDVI permite identificar vegetación cuando esta tiene altas concentraciones de clorofila. En ecosistemas secos el monitoreo de la desertificación mediante la identificación de coberturas vegetales empleando NDVI no es un ejercicio simple de percepción remota; en estas zonas el NDVI puede mostrar

variaciones anuales estocásticas que en un estudio multitemporal no indicarían disminución o aumento de desertificación, sino variaciones fenológicas de la vegetación. Esto sucede porque en meses secos la vegetación de los ecosistemas secos tiende a perder cobertura y/o a perder sus partes fotosintéticas registrando NDVI. bajos, mientras que en meses lluviosos la vegetación tiende a ganar cobertura y/o a desarrollar hojas con las mayores concentraciones de clorofila, produciendo altos valores de NDVI. Identificar este patrón estocástico anual es primordial para seleccionar los momentos más indicados del año para monitorear anualmente la desertificación, es decir, si en los meses con la mayor cobertura vegetal y con los valores más altos de NDVI se identifican suelos desnudos, necesariamente estos suelos estarían desertificados, puesto que en otras épocas tampoco tendrían cobertura vegetal alguna. Analizar escenas de otros meses (sin tener en cuenta esta variación en el NDVI) llevaría a tener sobrestimaciones o subestimaciones de la desertificación en una región. Una vez identificados los meses indicados para hacer un monitoreo anual de la desertificación es necesario tener un algoritmo que permita identificar zonas en proceso de desertización en un estudio multitemporal anual.

Con base en lo anteriormente expuesto, esta investigación se propuso en primera instancia determinar la resolución temporal anual mínima para que un sensor remoto pueda monitorear desertificación en un enclave seco interandino en Villa de Leyva (departamento de Boyacá, Colombia); para esto se evaluaron 60 raster mensuales de NDVI MODIS desde enero del 2006 a diciembre del 2010. Posteriormente se identificaron zonas en proceso de desertificación mediante relaciones lineales y no lineales de valores mensuales de NDVI de los meses que presentan los máximo de valores dentro de un año. Este análisis se realizó entre el año 2000 y el año 2010. Finalmente se estimó el cambio de zonas desertificadas ocurrido entre el año 2000 y el año 2010.

Materiales y métodos

Área de estudio

El enclave seco andino de Villa de Leyva (departamento de Boyacá, Colombia) es una depresión en el extremo sur del Valle del Río Suárez, bordeada por ejes cordilleranos que sobrepasan los 3 200 m de altitud, los cuales impiden el paso de una gran cantidad de nubes limitando la precipitación (Figura 1). El enclave está bajo la influencia climática de los altiplanos secos de Ubaté y Tundama, los cuales representan superficies de calentamiento que condensan el aire aumentando la temperatura regional (IAVH & Fundación ESC, 2006). La precipitación media anual está entre los 700 y 900 mm (estaciones El Emporio, Pasadena y Villa de Leyva) y es bimodal; épocas de lluvia en abril-mayo y octubre-noviembre (60 % de la precipitación anual) y épocas secas en diciembre-marzo y junio-septiembre (Molano, 1990; municipio de Villa de Leyva, 2004). Dentro del enclave hay un gradiente de precipitación que cambia a medida que se descende desde las laderas, encontrando las condiciones más secas hacia el centro de la depresión. Allí el calentamiento del aire genera la convección de vientos carentes de humedad que descienden desde las crestas, provocando una fuerte actividad eólica en las vertientes medias y bajas. El gradiente de precipitación se presenta porque los ejes montañosos en los que se enclava este valle, son barreras frente a las masas de vientos húmedos provenientes de los Llanos Orientales y del Magdalena (Molano, 1990). La temperatura media registrada es de 18 °C, con temperaturas máximas absolutas mensuales de 26.8 °C y temperaturas mínimas absolutas mensuales de 7.7 °C (municipio de Villa de Leyva, 2004). Los vientos son fuertes y la alta radiación solar que se da en épocas de sequía, junto con el exceso de evapotranspiración, incrementan el poder erosivo eólico (Hernández-C et ál., 1995).

Métodos

El primer objetivo (determinar el número mínimo de escenas anuales necesarias para que un sensor remoto óptico pueda monitorear desertificación en la zona de estudio) se realizó mediante un estudio multitemporal sobre la variación de los valores NDVI provenientes de 60 capas temáticas de NDVI MODIS para la zona de estudio. Las 60 capas forman una serie de tiempo y corresponden a los valores mensuales NDVI desde enero del 2006 hasta diciembre del 2010. El propósito de este análisis fue determinar si los valores de NDVI varían significativamente dentro y entre los años de estudio y determinar si existe un patrón de comportamiento de los NDVI; para esto se utilizaron tres algoritmos distintos (suavización Weighted Least-Squares, Análisis de Componentes Principales y ANOVA). Weighted Least-Squares es un algoritmo basado en la regresión, una técnica estadística para describir el comportamiento de un grupo de datos; el modelo Weighted Least-Squares aplica una regresión lineal en cada uno de los valores de la curva que se va a suavizar lo cual facilita la identificación de patrones. Cada una de las regresiones se estima en una ventana la cual se define como grupo de datos en el cual el punto evaluado está en la mitad.

Una vez determinados los meses en el año que tienden a tener los máximos valores de NDVI, para el segundo objetivo de esta investigación (elaborar una metodología para identificar zonas en proceso de desertificación) se realizó un análisis de tendencia a largo plazo a una serie de tiempo de 10 años (2000 a 2010) de NDVI MODIS, formada con solo una capa NDVI por año, la cual correspondió a los meses con los valores máximos mensuales de NDVI. Para el análisis de tendencia se utilizó el programa IDRISI SELVA, específicamente se hicieron raster para los siguientes algoritmos de tendencia con módulo Earth Trends Modeler: 1) un raster de coeficientes de determinación (r^2) lo cual permitió verificar los píxeles en los cuales existe una tendencia lineal. 2) Un raster de correlaciones lineales de Pearson (la cual se da en valores entre -1 a 1) lo cual indicó los píxeles que tienden a disminuir

lineal y significativamente los valores de NDVI en el tiempo (si el valor es negativo) y los píxeles que tiende a aumentar lineal y significativamente los valores de NDVI en el tiempo (si el valor es positivo). 3) Un raster de pendientes por píxel de una regresión ordinaria de mínimos cuadrado calculada con valores de NDVI en el tiempo, lo cual indica la tasa de cambio del NDVI en el tiempo, es decir, la tasa de cambio de NDVI por año. 4) Un raster de tendencias monotónicas Mann Kendall, el cual es un indicador de tendencia no lineal que se da en valores entre -1 a 1, donde un valor de 1 indica que la tendencia continuamente creció y nunca decreció, mientras que -1 indica que la tendencia continuamente decreció y nunca creció.

Finalmente, para el tercer objetivo (cambio de zonas desertificadas ocurrido entre el año 2000 y el año 2010) se tuvo en cuenta lo propuesto por Huang & Siegert (2004) quienes plantearon que si el máximo anual de NDVI es inferior a 0.116 entonces se considera como un área desertificada, mientras que si es mayor a 0.26 es vegetación, y si está entre el rango de 0.116 a 0.26 el NDVI no es suficiente para discriminar vegetación, debido a que seguramente corresponde a vegetación esparcida y el NDVI es influenciado por señales del suelo, estas zonas se pueden considerar en riesgo alto de desertificación. Con base con lo anterior se compararon los raster de los meses con máximo valor de NDVI MODIS de los años 2000 y 2010, para así determinar cambios en tres categorías: 1) desierto, 2) áreas con alto riesgo de desertificación (vegetación esparcida), 3) áreas con vegetación con bajo riesgo de desertificación.

también se encontró que los valores mensuales de NDVI varían significativamente entre los meses durante un año ($F_{11, 48} = 2.5121$; $p = 0.013$), siendo diciembre y mayo-junio los meses con el valor de NDVI significativamente más alto ($P = 0.018$ y $P = 0.01$, respectivamente), (Figura 2. (B)). Sin embargo, se encontró que los valores promedio anuales no varían significativamente entre los años evaluados ($F_{4, 55} = 1.1203$, $p = 0.35$), evidenciando que los cambios mensuales dentro de los años se repiten. Asimismo, al analizar los datos mediante un análisis de componentes principales, se encontró que el 70 % de la variación es explicada por dos factores principales ($\lambda = 5.25929$ y $\lambda = 3.01982$); el plot de estos dos factores en 2D (Figura 2. C) muestra que los promedios mensuales de los valores de NDVI forman un grupo con los meses de mayo-junio (máximos valores de NDVI). Los tres análisis que se emplearon (algoritmo Weighted Least-Squares, estadística descriptiva y análisis de componentes principales) llegaron a la misma conclusión, los meses con los valores más altos de NDVI son diciembre y mayo-junio. Estos meses no corresponden a los meses más lluviosos del año, es decir, abril y noviembre, sino a los meses siguientes al mes máximo de precipitación.

El raster de coeficientes de determinación (r^2) mostró que la mayoría de los píxeles no evidencian una tendencia lineal fuerte ($r^2 < 0.7$) indicando que

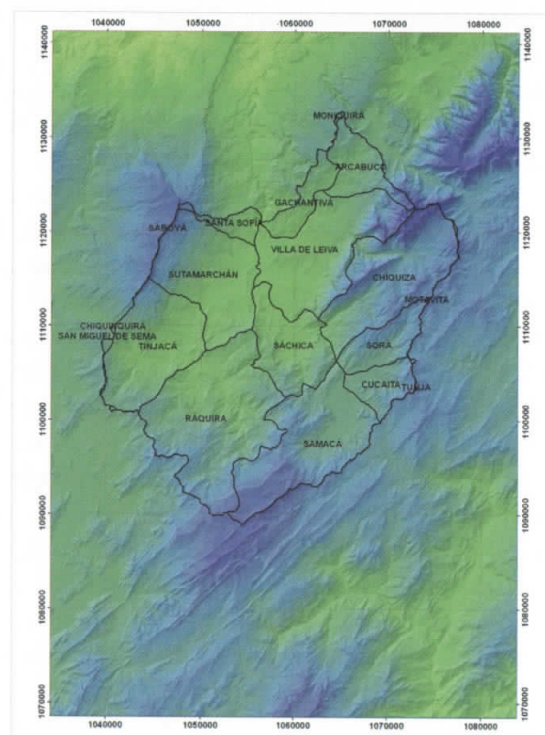
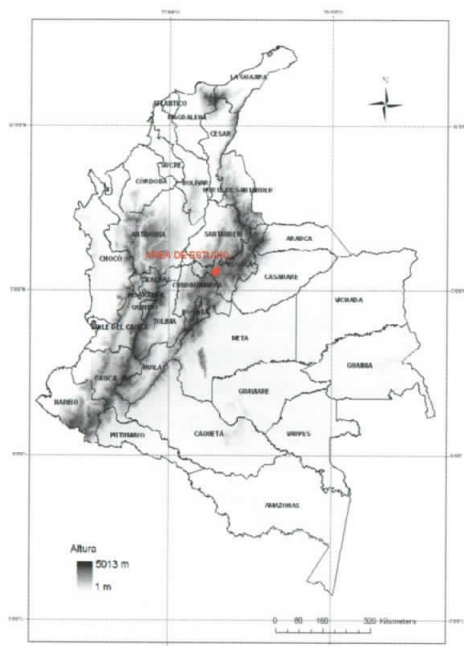


Figura 1. Área de estudio.

Resultados

Después de suavizar la serie de tiempo de 60 NDVI MODIS con el algoritmo Weighted Least-Squares, se identificó una tendencia anual en los valores mensuales de NDVI; dichos valores tienden a ser significativamente más altos en mayo-junio y diciembre (Figura 2. (A)). Por otra parte, empleando una ANOVA paramétrica

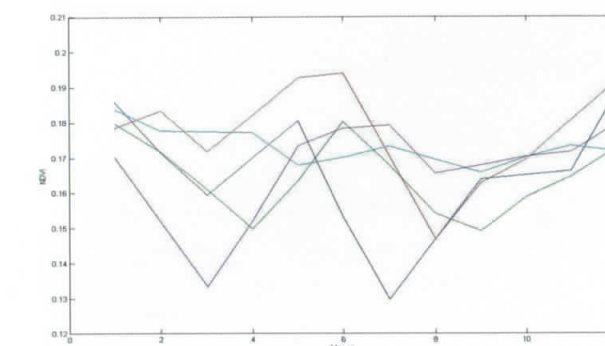


Figura 2. A. Patrón de NDVI por año después de suavización con algoritmo Weighted Least-Squares. Se aprecia que en los meses mayo-junio y diciembre los valores de NDVI son más altos. En azul en 2006; en verde 2007; en rojo 2008; en azul claro 2009; en morado 2010.

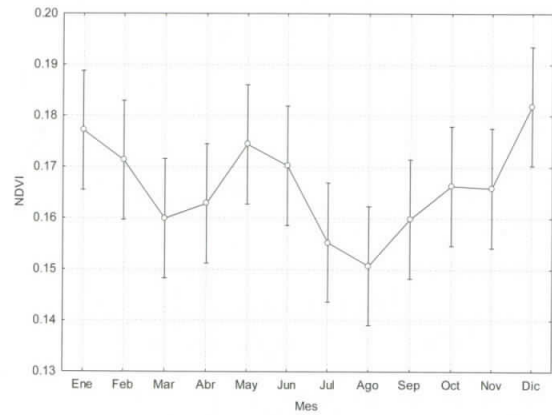


Figura 2. B. Comparación de promedios de NDVI mensuales entre 2006 y 2010.

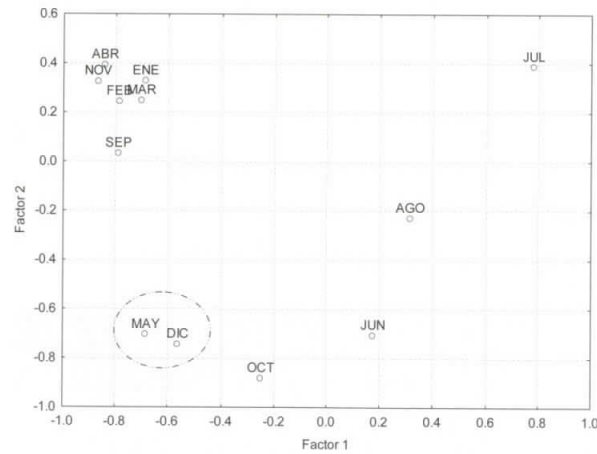


Figura 2. C. Análisis de componentes principales para los valores mensuales promedio de NDVI.

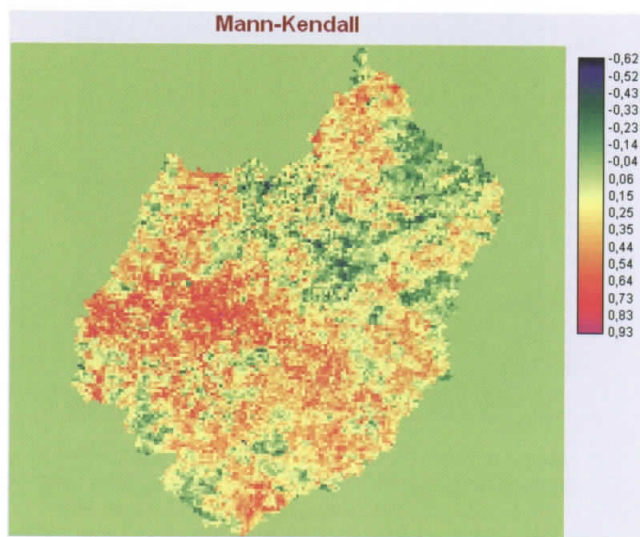


Figura 3. Raster de tendencias monotónicas Mann Kendall.

los análisis de tendencia deberían ser hechos con indicadores no lineales. No obstante al evaluar los dos indicadores lineales, es decir, Raster Pearson y Raster Pendientes se encontró que varios píxeles en el noreste y suroccidente tienen una tendencia negativa indicando disminuciones anuales en los valores de NDVI y por ende desertificación. El indicador no lineal, raster de Mann Kendall (Figura 3), evidencia en las mismas regiones (noreste y sur occidente) áreas más extensas (más píxeles) con tendencia a reducir el NDVI pero con una magnitud menor, es decir, en un proceso de desertificación no tan acelerado como los muestran los indicadores lineales. Finalmente se encontró que en las 40 627.3 hectáreas que conforman el área de estudio, los desiertos de la parte central, principalmente, disminuyeron en un 8 % su cobertura y pasaron a ser áreas en alto riesgo de desertificación (Tabla 1, Figura 4).

Discusión

Los resultados muestran cómo los valores de NDVI cambian significativamente entre los meses de un mismo año, mientras que valores anuales de NDVI no cambian significativamente entre los años; en conjunto estos dos resultados evidencian que las variaciones del NDVI dentro de los años son en gran parte producto de variaciones fenológicas de la vegetación en la región de Villa de Leyva. Dichas variaciones deben ser tenidas en cuenta a la hora de monitorear desertificación, es decir, la comparación ideal para monitorear desertificación en Villa de Leyva debe realizarse con tomas satelitales correspondientes a los meses de diciembre y/o mayo-junio que son los meses con mayores valores de NDVI. Comparar tomas satelitales de sensores remotos en meses distintos llevaría a sobrestimaciones (si se compara un mes con máximos de NDVI vs. un mes con valores mínimos o medios de NDVI) o subestimaciones (si se compara un mes con mínimos de NDVI vs. un mes con valores máximos o medios de NDVI). Este aspecto no había sido tenido en cuenta en ningún análisis espacial previo sobre desertificación o degradación de tierras colombianas empleando sensores remotos, por lo tanto este resultado es un importante aporte metodológico para análisis futuros.

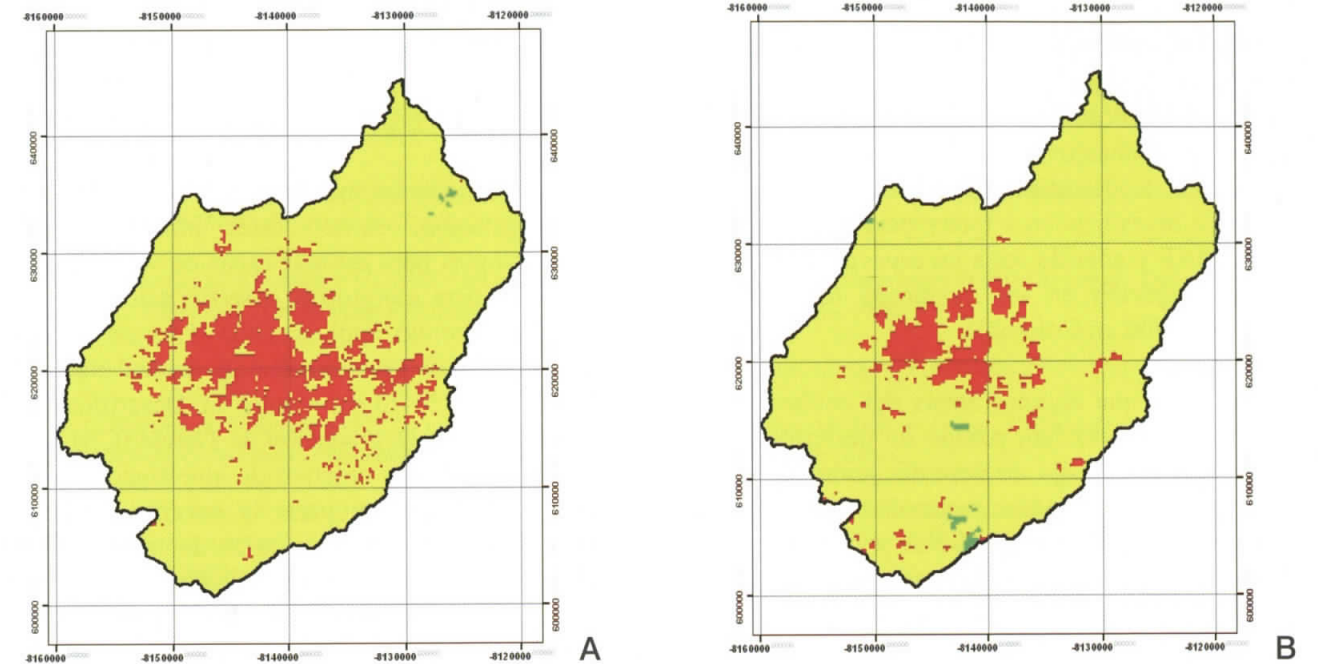


Figura 4. Áreas desertificadas y en alto riesgo para los años 2000 (A) y 2010 (B). En rojo desiertos, en amarillo áreas con alto riesgo de desertificación, en verde áreas con bajo riesgo de desertificación.

Tabla 1. Porcentaje de áreas desertificadas

Estado de desertificación	% de área en 40627.3 ha 2000	% de área en 40627.3 ha 2010
Desierto	14.90	6.87
Alto riesgo de desertificación (vegetación esparcida)	85.01	92.69
Bajo riesgo de desertificación	0.10	0.44

Se esperaba que los valores máximos de NDVI para Villa de Leyva sucedieran en los meses con máxima precipitación, sin embargo los máximos de NDVI sucedieron en los meses subsiguientes al máximo de precipitación (al final de las modas). Investigaciones en otros ecosistemas secos del planeta (ver Huang & Siegert, 2006; Rasmus et al., 2009) han llegado a resultados similares y explican esto porque meses seguidos de precipitación unido a disminuciones no drásticas como las que suceden en el mes siguiente al máximo modal de precipitación, favorece el crecimiento de la vegetación de zonas secas, y además el error atmosférico para los sensores remotos es menor (disminuye humedad, nubes, entre otras).

El enclave seco de Villa de Leyva, ecosistema seco analizado en esta investigación, está localizado en la cordillera Oriental de Colombia, por ser parte de la región Andina, se caracteriza por un régimen bimodal de precipitación. La presencia de dos modas de precipitación produce dos modas (de máximos valores de NDVI) de NDVI subsiguientes a los meses de máxima precipitación. Esto indica que los máximos valores de NDVI en ecosistemas secos dependerían de las modas de precipitación (resultados similares han sido encontrados en otros ecosistemas secos del mundo). En Colombia las modas de precipitación varían en las grandes regiones (Llanos Orientales, Andes, costa Norte, costa Pacífica), lo que indica que para hacer un

monitoreo de desertificación, se debe hacer un estudio similar al que se desarrolló en este proyecto por región geográfica al menos, para garantizar así una identificación adecuada de los meses que deben ser evaluados con sensores remotos en un monitoreo de desertificación. Esto constituye un punto de investigación a futuro para este proyecto en el CIAF y además sería un aspecto obligatorio de investigación en un monitoreo nacional de desertificación en Colombia.

Se encontró que algunas zonas del enclave seco de Villa de Leyva han pasado de desiertos a ser zonas con alto riesgo de desertificación; datos en campo de otros estudios realizados en la misma zona por el Instituto Humboldt, evidencian que esto está ocurriendo por dos razones principales: 1. Algunos de estos terrenos fueron abandonados (debido a su total infertilidad) y la vegetación nativa ha empezado a cubrir algunas de estas zonas, lo que es un primer paso de un largo proceso de recuperación para algunos suelos. 2. Muchos de estos suelos han sido extensamente plantados con pinos (especie foránea), los cuales crecen rápido en estos ambientes, pero lamentablemente deterioran más la fertilidad del suelo, lo que a futuro podría aumentar el problema de desertificación de esta región. No obstante es necesario hacer un estudio con sensores remotos con una mejor resolución espacial para asegurar o negar esta hipótesis. Esto constituye otro punto de investigación a futuro para este proyecto en el CIAF.

Cuando se analizan las tendencias del NDVI en Villa de Leyva en los últimos 10 años, se identifican zonas con alto riesgo de desertificación (que aún no son desiertos) que evidencian disminuciones significativas de NDVI (estimaciones lineales y no lineales). Pese a que se identifican varios sectores con estas características en todo el enclave seco, hay una gran zona con una disminución significativa del NDVI (valores negativos del coeficiente de Mann Kendall) que todavía no es catalogada como desierto. Datos en campo de otros estudios realizados en la misma zona por el Instituto Humboldt, permiten ver que esta es una de las últimas zonas agrícolas de este enclave y

corresponde al valle más fértil de la región. Nuestros resultados evidencian que los suelos de esta zona se están degradando y que podrían convertirse en un desierto en los próximos años.

NDVI es uno de los índices para estimar coberturas de vegetación, existen otros índices y otras metodologías para estimar capas de vegetación, y por ende para monitorear desertificación. En este trabajo se decidió emplear el NDVI por ser la forma que determinó La Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación, la Sequía, y la Degradación de Tierras (CNULD). Sin embargo, otro objetivo de investigación en el CIAF puede ser comparar la exactitud temática de las diferentes metodologías de monitoreo de desertificación con sensores remotos.

Conclusiones

En el enclave seco de Villa de Leyva, el NDVI presenta cambios significativos entre los meses de un mismo año, lo que indica cambio de cobertura de la vegetación y/o cambios en los niveles fotosintéticos de la vegetación. Diciembre y mayo-junio, son los meses con mayores valores de NDVI, por tanto se infiere que estos son los meses con mayor cobertura vegetal y/o con mayor actividad fotosintética de la vegetación. Estos meses no corresponden a los meses más lluviosos del año, es decir, abril y noviembre; mayo-junio y diciembre son los meses siguientes a los picos de precipitación. En consecuencia mayo-junio y diciembre son los meses indicados dentro de un año para monitorear desertificación año tras año en el enclave seco de Villa de Leyva; comparar imágenes de otros meses produciría subestimaciones o sobrestimaciones de la desertificación. Se plantea que cada ecosistema seco necesita un análisis como el que se realizó en este trabajo para determinar los meses indicados para mapear y monitorear correctamente con sensores remotos un proceso de desertificación.

Referencias bibliográficas

- Barinas M. y Rojas E. 1993. *Estudio geográfico del municipio de Villa de Leyva. Boyacá. Escuela de Ciencias Sociales y Económicas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. Págs. 1 – 72.*
- Becerra R., M. C. & A. V., Méndez G. 1990. *Contribución al estudio de la flora del municipio de Ráquira (Boyacá). Tesis de Pregrado. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D. C.*
- Cabrales, R., Espitia M. y Velasquez H. 1992. *Uso actual y potencial de los suelos en el municipio de Villa de Leyva. Tesis. Facultad de Ciencias de la Educación, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. Págs. 8 – 73.*
- Chen, X. Y., Hutley, L. B., & Eamus, D. 2003. *Carbon balance of a tropical savanna of northern Australia. Oecologia, 137, 405–416.*
- Cruz, I., C. Guaque & U. Santos. 1992. *La erosión en la vereda Sopotá. Municipio de Villa de Leyva. Trabajo de grado. Escuela de ciencias sociales y económicas. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja*
- Guerschman J.P, Michael J. H, L. J. Renzullo, Barrett D. J., Marks A. S, Botha E. J. 2009. *Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors. Remote Sensing of Environment 113: 928–945.*
- Hernández - C, V. Rueda & H. Sánchez. 1995. *Las Fronteras del Desierto. En: Hernández-C. Desiertos, Zonas Áridas y Semiáridas de Colombia. Banco de Occidente. Bogotá.*
- IAPH (Instituto Humboldt) & Fundación ESC (Ecosistemas Secos de Colombia). 2006. *Evaluación de la biodiversidad asociada, condiciones socioeconómicas y oportunidades de conservación en un enclave seco del altiplano cundiboyacense. Instituto Humboldt . Bogotá D.C. Colombia. P. 130.*
- IAPH. 1997. *Formaciones xerofíticas y subxerofíticas. Págs: 96-105. En: Chávez, M. & N Arango (eds.). Informe Nacional sobre el Estado de la Biodiversidad de Colombia. Tomo I. Ministerio del Medio Ambiente - Naciones Unidas, Bogotá.*
- Huang S & F. Siegert. 2006. *Land cover classification optimized to detect areas at risk of desertification in North China based on Spot Vegetation imagery. Journal of Arid Environments 67:308–327.*
- IAPH. 2001. *Resultados Día de la diversidad Villa de Leyva. Documento publicado en el sitio web <http://araneus.humboldt.org.co/diadeladiversidad/resultados/ambientales.htm>*
- IGAC-ORSTOM. 1984. *Estudio regional integrado del altiplano cundiboyacense: estudio general de suelos. IGAC. Bogotá.*
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. *Suelos de Colombia. Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Bogotá. 1995. Págs. 585 – 599.*
- Klaus Schütze Páez. 1999. *Cobertura vegetal del Municipio de Villa de Leyva. Programa de Capacitación, Consejo Ambiental de Villa de Leyva – POT.*
- Leuning, R., Cleugh, H. A., Ziegler, S. J., & Hughes, D. 2005. *Carbon and water fluxes over a temperate Eucalyptus forest and a tropical wet/dry savanna in Australia: measurements and comparison with MODIS remote sensing estimates. Agricultural and Forest Meteorology, 129, 151–173.*
- Liu, X., Jiang, X., 1996. *Extraction of desertification information from the optical and digital processing of multiple-date remotely sensed images. Arid Land Geography 19 (3), 1–6.*
- McTainsh, G. H., Leys, J. F., Carter, D., Butler, H. J., McCord, A., Wain, A., et al. 2006. *Monitoring soil condition across Australia: recommendations from the expert panels. Canberra, Australia: National Committee on Soil and Terrain for the National Land and Water Resources Audit.*
- Medina, E. 1985. *Estudio Ecológico de Zonas Áridas y Semiáridas del Neotrópico. Interciencia 10(5): 223-224.*

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 ¹ y Mauricio Ramírez Daza ²

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.

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

² 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 km², 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 geostacionarios 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 geostacionario 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 CO₂ 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 CO₂ 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. Saktet, C. Schmillius, 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 Herrera¹ y Mauricio Ramírez Daza²

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 4th 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

Introducción

Desde la década de los años 70, las imágenes satelitales Landsat han sido una fuente valiosa de información; la más reciente misión Landsat es la 7 (Landsat 7 ETM+) lanzada en 1999. Las características de las imágenes tomadas por este satélite son muy útiles para diferentes temáticas, puesto que cuentan con una adecuada resolución espacial, radiométrica, espectral y temporal; además el área de toma es bastante amplio; lo cual facilita cubrir grandes zonas sobre la superficie terrestre. En el año 2003 el sensor de este satélite sufrió una avería que hace que las imágenes tomadas tengan un aspecto similar al de una persiana, en donde existen una serie de líneas de píxeles sin información o espacios vacíos conocidos como *gaps*.

Para solucionar este inconveniente es necesario realizar una serie de procesamientos a las imágenes, como la aplicación de filtros especiales que interpolan la información, llenado de vacíos o *gaps* utilizando imágenes de fechas similares y del mismo Path/Row o también empleando software especializados en este problema que hacen uso de otras imágenes para llenar los *gaps* de forma automatizada.

Con el presente artículo se pretende mostrar un procedimiento que hace uso de varias herramientas de percepción remota para tener una visión general de cómo se pueden llenar dichos vacíos empleando imágenes adicionales, elaboración de mosaicos de imágenes y aplicación de filtros para mejoramiento. Desde hace aproximadamente 40 años las imágenes tomadas por los diferentes satélites Landsat se han convertido en una gran fuente de información, convirtiéndose en una valiosa colección de imágenes para el estudio de la Tierra. A partir del año 2008 estas imágenes están disponibles de manera gratuita para todo el que las requiera a través de los sitios web <http://earthexplorer.usgs.gov/> y <http://glovis.usgs.gov/>, gracias a esto diversas entidades colombianas interesadas en la interpretación de coberturas de la Tierra, por medio de la metodología Corine Land Cover han venido utilizando desde entonces estas imágenes para generar esta capa de coberturas.

Estas imágenes son tomadas con periodicidad de 16 días y pueden ser descargadas de forma directa de los sitios mencionados, y las que aún no se encuentran disponibles para descarga, pero que se encuentran en sus servidores, pueden ser solicitadas y en aproximadamente 3 días hábiles estarán disponibles para ser utilizadas. Una de las desventajas de estas imágenes es que a comienzos del año 2003 uno de los mecanismos del sensor del satélite Landsat 7 presentó una avería en un instrumento que corrige las líneas escaneadas, conocido como Scan Line Corrector (SLC-off) que desde entonces causa el efecto de bandeamiento (Gaps o vacíos de información) en las imágenes tomadas por dicho sensor (Figura 1). Este efecto consiste en pérdidas de información por sectores de la imagen tomada de aproximadamente 350 metros, valor que puede variar de acuerdo a su posición en la imagen, en el centro de la misma no existe tal efecto, suele presentarse hacia los extremos y visualmente hace que las imágenes luzcan como una persiana, donde las pérdidas de información generan valores en los niveles digitales de 0.

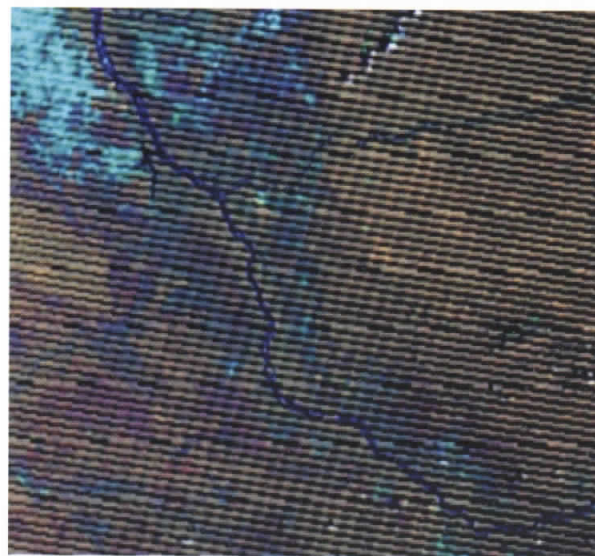


Figura 1. Bandeamiento presente en imagen Landsat.

Materiales y métodos

Para este caso se empleó el software ERDAS 9.2 e Ilwis 3.7 Open, adicionalmente se descargaron dos imágenes Landsat con Path/Row 6/57 del 22/02/2006 y 11/04/2006. La fuente de descarga fue Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Existen varios métodos para eliminar o reducir este efecto, varios software de procesamiento digital de imágenes incluyen una serie de filtros que permiten por medio de interpolación, reemplazar las líneas sin información basada en píxeles vecinos por medio de valores estadísticamente calculados. Erdas en sus diferentes versiones cuenta con la herramienta "Focal Analysis", que mediante un algoritmo y basado en la función estadística de mediana permite interpolar la información perdida. De igual forma Ilwis en sus distintas versiones, cuenta con un filtro llamado "Majority Zero", este filtro funciona de manera similar al de Erdas. El inconveniente de usar estos filtros radica en que al ser tan grandes las zonas sin información, el proceso se debe hacer reiterativamente generando información falsa en estas zonas por el hecho de usar métodos de interpolación.

Un método adecuado y probado en Colombia por entidades como el IDEAM, SINCHI y WWF Colombia, consiste en utilizar varias imágenes (Figura 2) del mismo PATH/ROW (ubicación en la grilla de Landsat) de un periodo determinado mediante la elaboración de mosaicos, debido a que el bandeamiento no es igual en todas las imágenes, esto permite eliminar todos los *gaps* al superponer las diferentes imágenes empleando como imagen principal la más reciente y la que menor cantidad de nubes posea. Este método al no ser interpolado elimina los *gaps* con información real, haciendo que el ruido sea menor y que la información presente en la imagen sea real. Una desventaja de este mosaico es que la información no sería toda de la misma fecha, haciendo que puedan existir cambios en un mismo tipo de cobertura en la misma imagen procesada.

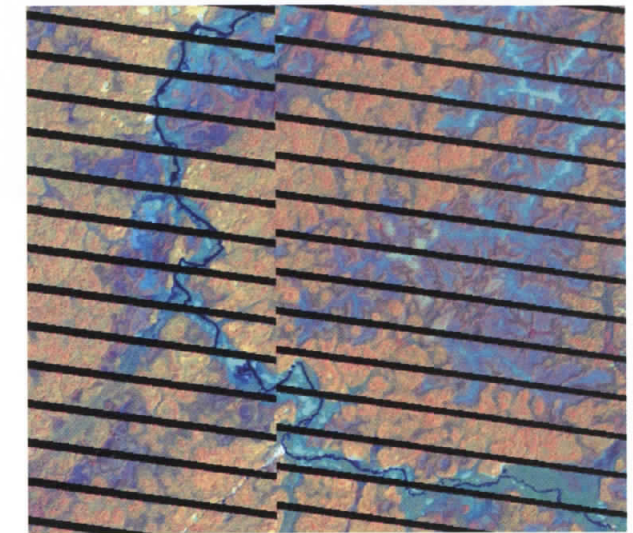


Figura 2. El bandeamiento en todas las imágenes no es igual.

Proceso de eliminación de bandeamiento

El proceso practicado a las imágenes Landsat objeto de este artículo se realizó mediante el empleo del software Erdas 9.2 e Ilwis 3.7. En Erdas se seleccionaron las imágenes necesarias para la eliminación del bandeamiento mediante superposición hasta que no quedara ningún *gap*, una vez determinadas las imágenes necesarias, se procede a la elaboración de un mosaico de tal manera que la mejor imagen quede en la parte superior del mismo, entendido esto como la imagen más reciente y con menos cantidad de nubes.

En la Figura 3 se ilustra el esquema del mosaico que conforma cada imagen corregida, para este caso se requirieron solo dos imágenes para eliminar los *gaps*, dependiendo del caso se pueden necesitar mayor cantidad de imágenes.

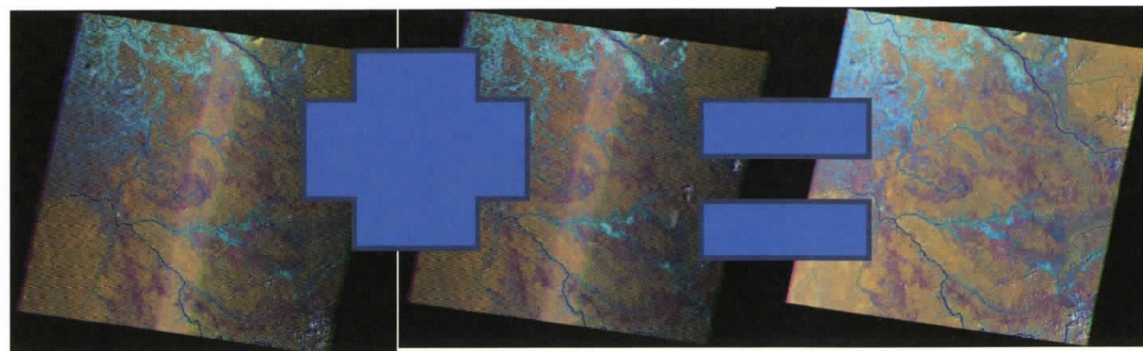


Figura 3. Esquema del mosaico para la eliminación del bandeamiento.

Una vez se realiza el mosaico en Erdas, la imagen resultante queda con una especie de ruido o líneas de colores extraños debido a que el bandeamiento entre bandas es diferente y pueden quedar vacíos en estas y al hacer una combinación RGB se genere este tipo de ruido, tal como se observa en la Figura 4.

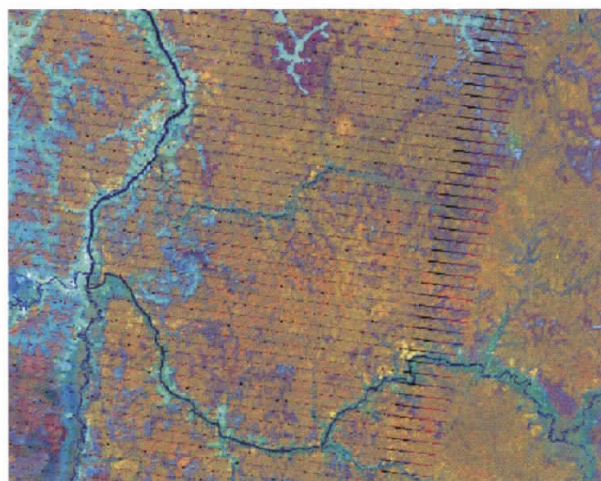


Figura 4. Ruido generado en la imagen después de hacer el mosaico.

Estos vacíos de información pueden ser corregidos con filtros especiales mediante el uso de Ilwis que posee un conjunto de estos denominados *Majority* para los cuales cada grupo de píxeles considerados en la imagen de entrada, el filtro asigna el valor predominante (el que con más frecuencia ocurre) a un píxel central en la imagen de salida; dentro de este grupo de filtros se encuentran los conocidos como "Majority" en especial el "Zero Majority Filter"

el cual asigna el valor predominante a los píxeles cuyos valores sean cero, en este caso los píxeles sin información de los gaps y del ruido generado en el mosaico. Una vez aplicado este filtro, el mosaico se ve como se muestra en la Figura 5.

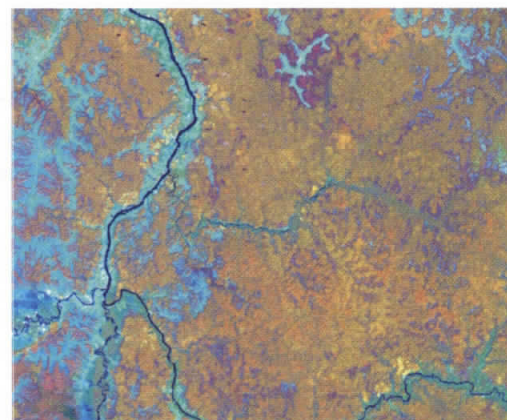


Figura 5. Mosaico filtrado.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos son muy buenos y permiten obtener imágenes aceptables para interpretación de coberturas u otros análisis, además al ser de carácter gratuito el único precio es el del procesamiento y mejoramiento.

La imagen filtrada resultante queda en formato nativo de Ilwis, por lo tanto debe ser exportada de nuevo al formato de Erdas o al deseado. Luego se recomienda su ortorectificación con base en

información básica de referencia como imágenes satelitales de otros periodos ya ortorectificadas o con base en cartografía básica escala 1:100.000.

Este método es muy efectivo pero es de carácter manual puesto que se debe estar al frente de todos los procesos y flujo de trabajo. Existe un software desarrollado por el USGS denominado "Frame and Fill" que realiza el trabajo de forma automática, solo se deben estructurar las imágenes de insumo en unas carpetas especiales y el resto del trabajo lo hace el software, los resultados también son muy buenos, pero el procesamiento realizado por él es demorado dependiendo de la cantidad de imágenes necesarias para llenar los gaps.

Con ambos métodos se obtienen buenos resultados y cualquiera que se elija es una buena opción, con el primero se tiene el control sobre los procesos, mientras que con el segundo se gana en automatización.

Conclusiones

El método analizado en el presente artículo permite un control total sobre el procesamiento de las imágenes, además este permite entender paso a paso cómo se tapan los gaps y se corrigen las imágenes.

Las imágenes resultantes son adecuadas para interpretación visual pero pueden generar ciertas inconsistencias en clasificaciones digitales, por lo tanto son una gran fuente de información para proyectos de interpretación de coberturas de la Tierra y otras temáticas, además ha sido probado en los últimos 4 años por las entidades encargadas de generar la capa de coberturas.

Referencias bibliográficas

RODRÍGUEZ RAMOS, Neisy. "Rellenado de los gaps provocados por la falla del Scan Line Corrector en las imágenes Landsat 7 ETM+". Internet: http://www.gabrielortiz.com/descargas/Articulo_SLC_Off_Proyect_7_07.pdf.

Ayuda ILWIS 3.7 Open.

Reconocimiento de zonas inundadas con datos de imágenes satelitales en Colombia

Recognition of zones flooded with information of satellite images in Colombia

Nardy Liliana Neiza M.¹ y Elena Posada²

Resumen

Con el fin de reconocer las zonas inundadas durante el periodo invernal del 2010 a 2011 en diferentes regiones de Colombia, se utilizaron insumos de imágenes provenientes de sensores remotos y se llevaron a cabo procesos con métodos de identificación extrayendo la respectiva información utilizada para la estimación de las zonas afectadas. Mediante datos recolectados por sensores remotos se puede observar extensiones amplias de la materialización de un fenómeno como estos y así mismo se visualizan los daños que puede ocasionar. Para llegar a una aproximación metodológica y poder proponer los pasos a realizar en el reconocimiento de zonas inundadas se tuvieron en cuenta los métodos semiautomatizados con revisión temática y la interpretación visual de inundaciones con las diferentes imágenes provenientes de sensores ópticos y de radar. Además de extraer la información específica se pudo evaluar los sensores y el tipo de información de las imágenes para diferentes regiones del país, que lleva a emplear métodos distintos y por consiguiente a concluir que se debe realizar un proceso sistemático adecuado según los datos del sensor a utilizar, las características de cada región a estudiar y el conocimiento en variedad de temáticas como: su comportamiento hídrico, geomorfológico, geológico, estado de suelos y recuperación en caso de inundación.

Palabras clave

Zonas inundadas, imágenes de sensores ópticos y radar, percepción remota.

Abstract

In order to recognize the flooded areas during the winter of 2010-2011 in different regions of Colombia, was used inputs from remote sensing images and processes are carried out with methods of extracting the relevant identification information used to estimate affected areas. Using data collected by remote sensing can see wide expanses of the materialization of a phenomenon like this and so it is displayed that can cause damage. To reach a methodological approach and to propose steps to take in the recognition of flooded areas was considered semi-automated methods with thematic review and visual interpretation of floods with different images from optical and radar sensors. Besides extracting specific information is unable to assess the type of sensors and image information for different regions of the country, leading to different methods used and therefore to conclude that it must perform a systematic process appropriate for the sensor data to used, the characteristics of each region to study and knowledge on a variety of topics such as: water behavior, geomorphological, geological, floor and flood disaster recovery thereof.

Key words

Flooded areas, images optical and radar, remote sensing.

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

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

Introducción

Las inundaciones son uno de los fenómenos con mayor severidad que afectan a la población humana, sus bienes, servicios; afecta a los cultivos y a los ecosistemas; estas se han incrementado en las últimas décadas en todas las regiones del mundo. Por lo general son causadas por eventos meteorológicos extremos, aunque muchas veces es por la acción humana que favorece la ocurrencia y aumenta la duración o la intensidad de una inundación. Disponer de herramientas que permitan el seguimiento e interpretación en tiempo real o en el menor tiempo de las áreas afectadas es importante en el momento de determinar los alcances de la situación para la emergencia, así como lo es para la toma de decisiones de un gobierno y en las acciones en la gestión de riesgo. Contar con estimaciones del área afectada, ayuda a disminuir las pérdidas de vidas humanas y brinda información a las autoridades competentes para ajustar su plan de acción. El análisis de eventos históricos de estos fenómenos, por su parte, asegura el monitoreo y la generación de mapas temáticos del comportamiento del mismo y de mapas de vulnerabilidad de las zonas afectadas, importante para la rehabilitación y recuperación de las áreas y a futuro para la planificación del uso del territorio en un país.

La observación a distancia de las extensiones amplias de inundación y de zonas de afectación, sin estar en contacto directo, es el mayor aporte que la percepción remota o teledetección puede ofrecer en el reconocimiento de la materialización y afectación de tales fenómenos. Por medio del conocimiento de los patrones espectrales típicos de las distintas coberturas terrestres, del procesamiento digital y de la interpretación visual de imágenes se puede extraer la información según las imágenes y los datos provenientes de sensores remotos satelitales y aerotransportados. Por tal motivo se darán a conocer

algunos sensores que aportaron información a la temática de inundaciones debido a la emergencia invernal producida en Colombia desde hace un año y que fueron adquiridos mediante la activación de la carta internacional de desastres (International Charter "Space and Major Disasters") y de forma directa; como también se expondrán algunos procesos a partir de las características espectrales de las distintas coberturas de la superficie terrestre (firma espectral) y del manejo de características de los datos de imágenes radar (polarización) que se han desarrollado y se tuvieron en cuenta para generar la cobertura de inundaciones en distintas regiones del país durante este periodo invernal, y en el monitoreo actual de áreas inundadas en las etapas de rehabilitación y recuperación de zonas afectadas en el territorio colombiano, ejecutado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), la Subdirección de Cartografía y su Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF).

Uno de los aspectos relevantes en el reconocimiento de zonas inundadas mediante aplicaciones de percepción remota es la selección de un determinado tipo de sensor, ya que esta dependerá de la resolución espacial requerida, de las características espectrales o polarizaciones para la identificación del fenómeno a estudiar y de su entorno, de la recurrencia con la que se decida estudiarlo o de la disponibilidad de medios económicos e informáticos para tratar la información obtenida, entre otros. A pesar de las limitaciones que puede presentar la percepción remota en la detección, la cuantificación y la evaluación de los distintos fenómenos de inundación, no existe otra herramienta con estas capacidades. Capacidades que están asociadas a la disponibilidad global de información en tiempo real, a la objetividad en la toma de datos y finalmente, a la existencia de la información multitemporal.

Se dará a conocer las ventajas y desventajas de los tipos de sensor e imágenes en zonas inundadas en Colombia, y algunos ejemplos a nivel mundial según las publicaciones tenidas en cuenta para el desarrollo e implementación de los métodos

utilizados y llevados a cabo durante el proceso de investigación de técnicas de procesamiento digital y de interpretaciones visuales aplicados a la identificación de zonas de inundación en diversos escenarios, como consecuencia del fenómeno meteorológico, en Colombia, expuestos a continuación con sus respectivos resultados y discusiones.

Materiales y métodos

Tanto los sensores pasivos (imágenes ópticas) como activos (imágenes radar) son potencialmente muy útiles para el estudio de zonas inundadas. El beneficio de utilizar radar no solo se debe a su capacidad para identificar superficies cubiertas por agua y estimar el nivel de anegamiento, sino también porque esta capacidad no se ve necesariamente disminuida por la presencia de nubes o vegetación. Rasid & Pramanik (1993) identificaron la presencia de nubes como el principal impedimento para el estudio de inundaciones en Bangladesh a partir de imágenes provistas por sensores pasivos (e.g. NOAA-AVHRR). Así también Sano et ál. (2007) documentaron que en la selva amazónica entre 1984 y 2003 en promedio hubo solamente una imagen Landsat con menos del 10 % de cobertura de nubes por año. Condiciones muy propicias en zonas tropicales y de impedimento para nuestro territorio colombiano.

Mapas realizados con datos de Landsat y con el DEM-SRTM es conocido como un método económico y eficiente para la asignación de amenaza de inundaciones y así poder abordar el problema por la falta de datos de origen en los países en desarrollo (Wang et ál., 2002 según Hoa et ál., 2010). Las características de una inundación deben ser estudiadas de acuerdo a: su comportamiento hidrológico, tamaño, forma de la cuenca y demás parámetros hidrológicos; como también a la geomorfología y geología que presenta el sitio en estudio; al estado de suelos y recuperación según su capacidad de filtración y porosidad; así como conocer los posibles elementos expuestos que tenga alcance dicha inundación. Por lo general se extraen la cartografía geomorfológica

mediante la interpretación de fotografías aéreas y de investigación de campo que evidencia históricamente los sectores de las inundaciones. Un mapa geomorfológico ayuda a estudiar las extensiones de la zona de inundación, la dirección de los flujos de inundación, y los cambios en el cauce del río a través del tiempo, evidenciando el comportamiento de las inundaciones repetidas, la naturaleza de las inundaciones anteriores y probables características de las inundaciones que ocurrían en el futuro. En Vietnam este enfoque de la investigación de las inundaciones ha sido verificada de manera significativa, donde el sistema de canales y la morfología de los ríos de llanura de inundación cambian de forma dinámica y con un alto potencial erosivo y el aporte de sedimentos es sustancial (Lastra *et al.*, 2008).

En Colombia se cuenta con trabajos de geomorfología en diferentes escalas, pero no en su gran totalidad de cubrimiento en área y con enfoques distintos desde la perspectiva de los temáticos según el estudio realizado y las escuelas formadas en el país. Los estudios de suelo se presentan más uniformemente y de acuerdo a escalas regionales, por lo tanto se carece de los insumos básicos para el análisis y las evaluaciones de inundaciones y otras amenazas, y en situaciones de emergencia y posibles desastres se acude a herramientas que extraigan información de manera rápida y precisa como lo son para la identificación de zonas inundadas mediante insumos de datos e imágenes satelitales y aerotransportados, dando a conocer los estados superados de niveles de agua, las características hidrológicas, extensión del fenómeno y por medio de los cuales se puede estimar su grado de afectación.

Los dos tipos de métodos desde la percepción remota utilizados para el reconocimiento de zonas inundadas han sido:

I. De identificación por medio de procesamiento semiautomático digital con revisiones temáticas de acuerdo a la escala de cobertura a generar (1:100.000 y 1:25.000).

II. De interpretación visual del fenómeno y su afectación en las imágenes previamente mejoradas.

Para el primer (I) método escogido se tuvo en cuenta la fuente del sensor y las ventajas de cada uno, designando la identificación de zonas de inundación en: imágenes ópticas e imágenes de radar.

Imágenes ópticas

El primer objetivo al realizar un estudio que involucre áreas inundadas es cuantificar la superficie afectada. En tal sentido, será necesario mapear el área de estudio donde exista una clasificación de al menos dos clases: píxeles inundados y no inundados. Según la extensión del área de estudio, la disponibilidad de imágenes, las características de las clases y la precisión requerida, el mapeo rápido se puede realizar con base en imágenes de baja o alta resolución espacial. Por ejemplo, el sensor AVHRR (a bordo de los satélites meteorológicos de la serie NOAA), resulta muy útil para el seguimiento de eventos a escala regional, debido a su alta frecuencia de paisaje (cobrimiento amplio del territorio y escenas grandes) y a su moderada resolución espacial. Este satélite provee información adecuada para el seguimiento de áreas inundadas, generación de alertas, estimación de daños y manejo del agua en exceso cuando el evento de una inundación ocupa un área significativamente mayor a la resolución espacial de estos satélites, es decir, es mayor a 1 m² por píxel. Si se requiere estudiar áreas más pequeñas, un área urbana o realizar cálculos más precisos de las áreas afectadas, serán necesarias imágenes de mayor resolución espacial. El satélite Landsat, en tal sentido, brinda información a mayor resolución espacial de (30x30) m². Esta información permite generar interpretaciones más detalladas, por ejemplo: zonas urbanas y caminos afectados, rutas en peligro, entre otros. Se pueden detectar efectos sobre el escurrimiento del agua producto de canales clandestinos, obras nuevas, rutas y vías de ferrocarril. Si se agrega información de curvas de nivel y se ajusta el análisis espacial a un Sistema de Información Geográfica (SIG), es

posible prever problemas de drenaje y ayudar a la visualización de posibles escenarios de riesgo.

Con respecto a las imágenes NOAA AVHRR, las imágenes Landsat requieren mayor tiempo de procesamiento y calibración temática, el tiempo de re-visita de este último sensor satelital a un mismo sitio, es de 16 días. Con una resolución intermedia entre estos dos tipos de sensores, se encuentra el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites AQUA y TERRA que también resulta muy útil para detectar agua, principalmente a partir de la información de la banda 5. Otro de los sensores con mayor utilidad a niveles locales son los que provienen de imágenes hiperespectrales, una tecnología relativamente nueva, que está siendo investigada actualmente por los científicos con respecto a la detección e identificación de minerales, bosques y materiales. Según Khurshid *et al.* (2006), la importancia de la teledetección hiperespectral radica en su capacidad para adquirir un completo espectro de reflectancia de cada píxel en la imagen. El espectro de reflectancia en regiones del 400-2500 n.m., se puede utilizar para distinguir una gran variedad de materiales de la cubierta de superficie, que no es posible con la tecnología de otros sensores.

Para la primera emergencia invernal en el sector norte de Colombia y con la plataforma del sensor británico UK DMC-II se trabajó con imágenes de noviembre de 2010 a enero de 2011, con resolución espacial de 22 m., evidenciando el recorrido de las inundaciones y la presencia de nubes en esta clase de sensores pasivos en el momento de mayor intensidad de lluvias que se presenta durante el mes de diciembre del 2010, por lo cual la identificación e interpretación de la cobertura de zonas inundadas se dificultó y se tuvo en cuenta únicamente los espectros de infrarrojos para su reconocimiento (Figura 1); sin embargo, se puede decir que este tipo de imagen es de gran utilidad por su resolución espacial, y sirve para el monitoreo de zonas de inundación a escalas semirregionales, además poseen la ventaja del vasto cubrimiento que ofrecen con resoluciones espaciales y espectrales muy semejante a una imagen SPOT.

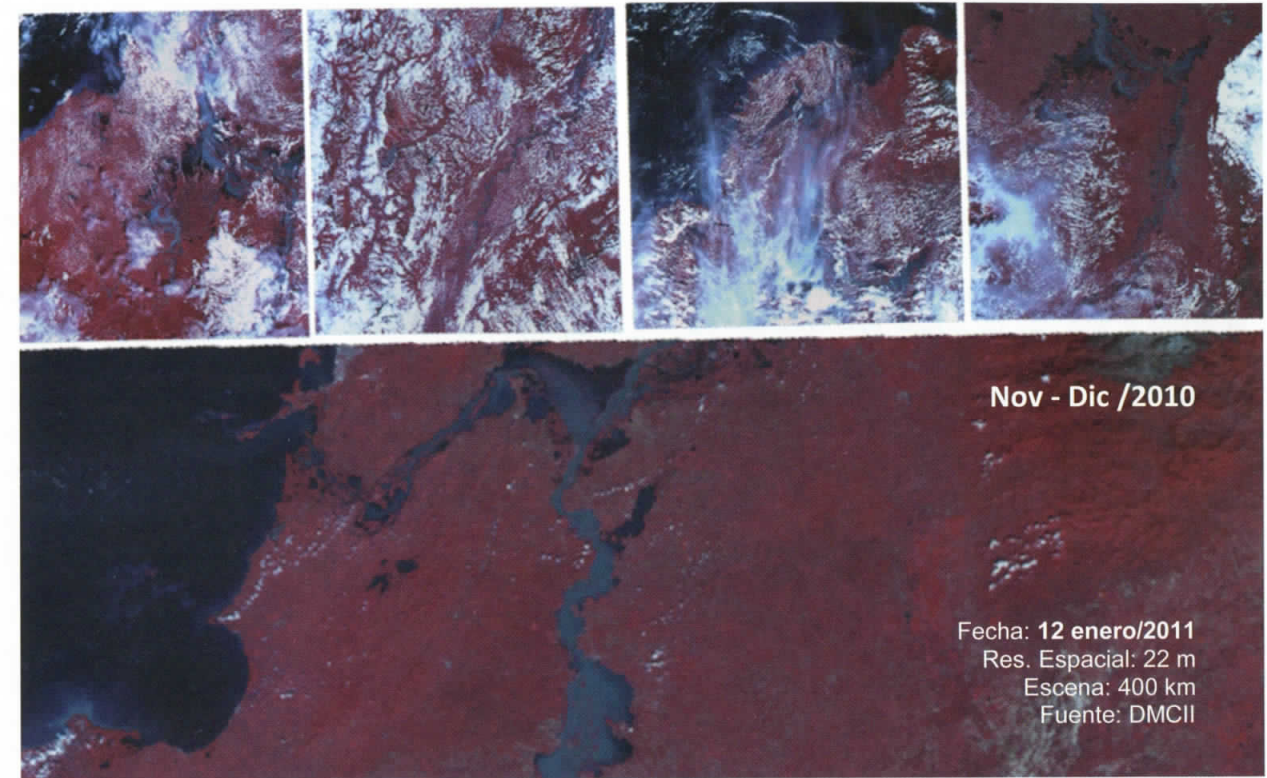


Figura 1. Imágenes ópticas UK-DMC2, sector NW de Colombia.

Imágenes radar

Las imágenes de satélite de los datos de radar de apertura sintética (SAR), proporcionan potencialmente parámetros útiles en la temática de inundaciones, tanto así que se puede extraer con buena definición el borde de la inundación y la zona como tal, además de sustraer datos con modelos digitales de elevaciones y estimaciones de nivel del agua en su cubrimiento y obtener el volumen almacenado en la zona afectada.

Conocer la extensión del área inundada y contar con información sobre el nivel del agua resulta fundamental para la gestión de inundaciones (Smith, 1997). Los sistemas satelitales de radar de apertura sintética (SAR) son particularmente adecuados para la asignación en la identificación de zonas de inundación, gracias a características tales como la visión sinóptica, la capacidad de operar en casi todos los climas, las óptimas condiciones tanto de día como de noche (Horritt *et al.*, 2003), y la

gran sensibilidad de la banda de microondas que le permita discriminar muy bien la interface agua-tierra.

Varios métodos se pueden encontrar en la literatura para obtener la medida de una inundación por medio de datos de radar y del espectro de microondas. Un primer intento fue realizado por Lowry *et al.* (1981), que utilizó radar en bandas X y L para asignar la inundación de Manitoba en 1979. Un aliciente para investigar sobre la cartografía de las inundaciones con datos SAR fue propuesta por la disponibilidad de los datos proporcionados por el radar de banda C a bordo del satélite ERS-1 (utilizado por Bates y Anderson, 1995; Oberstadler *et al.*, 1997). En efecto, fue con trabajos de ERS la primera reunión del grupo temático de monitoreo de las inundaciones (ESRIN en 1995), y numerosos investigadores presentaron mapas de inundaciones derivadas de este instrumento tal como lo muestra Smith en 1995.

Los radares montados en satélites que están disponibles actualmente son, Radarsat-2, Alos-palsar, Cosmoskymed (constelación de satélites pequeños para observación de la cuenca mediterránea, y Envisat; y, próximamente Risat y Saocom quienes permiten asegurar la provisión de imágenes en un mediano plazo). Además, tanto la cantidad como la calidad de esta información es superior a la de los primeros sensores disponibles. Por lo tanto, es de esperar que en el futuro los sensores de radar ocupen un lugar central en la detección de inundaciones.

La segunda activación del Charter para Colombia en el 2010, fue realizada por el Sistema Federal de Emergencias (SIFEM), del cual hace parte la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina (CONAE), y por medio de esta activación se obtuvieron imágenes de sensores activos como Radarsat-2 y Alos-palsar; e, imágenes Cosmoskymed (Figura 2), donadas por el proyecto G-MOSAIC2, además de imágenes ópticas anteriormente mencionadas.

Las características de los sistemas SAR son importantes en cuanto a toma y geometría de cada sensor, ya que de acuerdo a su ángulo de incidencia, al modo de haz y por ende de cobertura de la escena y de detalle por su resolución espacial y espectral, son de utilidad en el manejo de escala de interpretación para el reconocimiento de zonas

de inundación en diversas regiones del territorio colombiano, características diferentes en cada sensor y que pueden favorecer en algunas zonas del país y ser limitantes para otras. Un ejemplo de estas características fue evidenciado por las imágenes e interpretaciones de zonas inundadas para la zona del Valle del Cauca sobre la margen del río Cauca del sensor RadarSat-2, capturadas los días 9 de febrero (a) y 26 de mayo de 2011 (b), correspondiente a los modos de resolución Estándar y modo Wide-1 respectivamente (Figura 3).

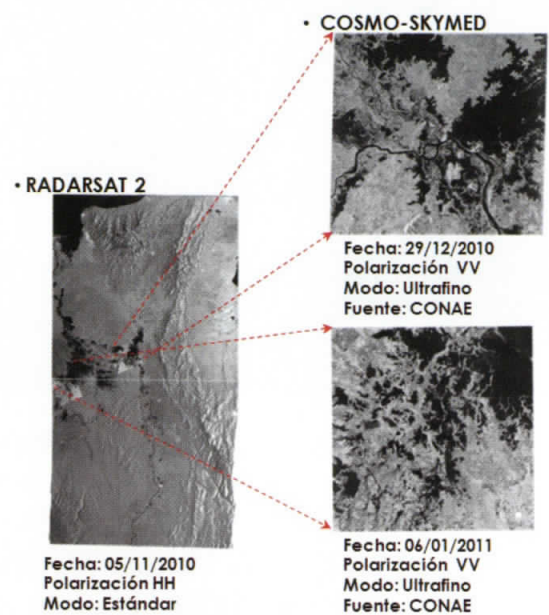


Figura 2. Ejemplos y especificaciones de imágenes radar.

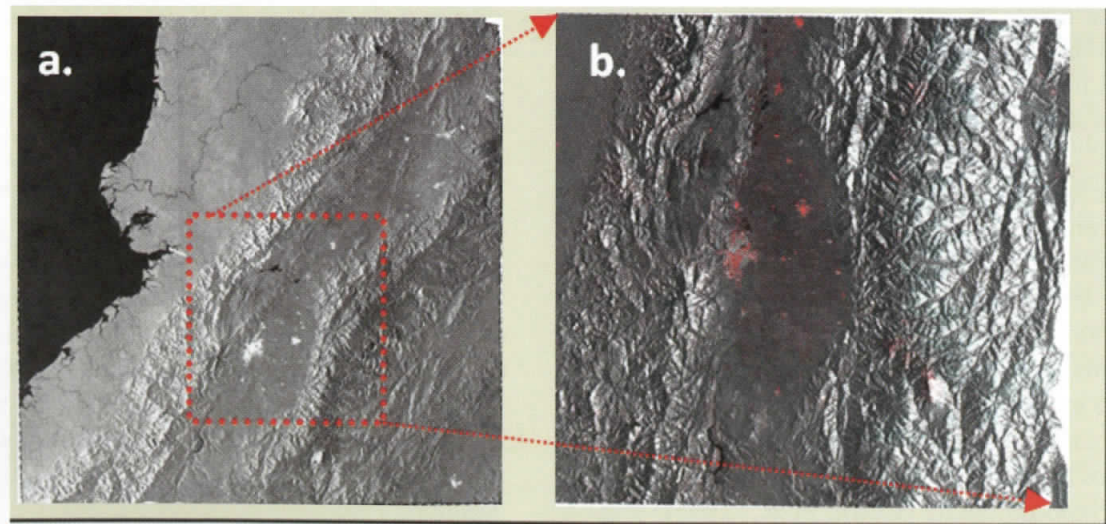


Figura 3. Tipos de imágenes Radarsat-2.

Para el segundo (II) método se tuvo en cuenta la interpretación visual del fenómeno y su afectación en las imágenes previamente mejoradas, y con datos de características que detectaban presencia de agua para realizar la cobertura de inundación en zonas, no solo con los nuevos cuerpos de agua, sino incorporando zonas con presencia de inundaciones.

Para obtener mejores resultados en la interpretación y utilizar técnicas de procesamiento especializado InSaR, los productos originales de la imagen deben presentar datos de magnitud y fase, un ejemplo de imagen con estas características de valores complejos de observación única (SLC) y con el sensor RadarSat-2 es la imagen del sector de Bogotá con banda C y polarización HH (Figura 4). Una de las características de los sensores activos es la importancia de sus polarizaciones, ya que si se obtienen las 4 a la vez se puede realizar una composición a color combinando 3 de ellas, que por lo general para un color semejante a la realidad se necesitarían las dos co-polarimétricas (HH-VV) y una cruzada (HV o VH).

Los procesos mediante técnicas interferométricas en la determinación de nivel de agua acumulado en una inundación y de zonas de extensión de la

misma fue registrado por Alsdorf *et al.* (2005), quienes observaron cambios de 2 y hasta 5 cm por día en el nivel del agua de los ríos afluentes del Amazonas a partir de información de radar en 3 frecuencias distintas. Grings *et al.* (2006) utilizaron información radar polarimétrica (plano de propagación de la onda electromagnética emitida por el radar- y modelos de transferencia radiactiva) para estimar el nivel del agua en ambientes dominados por juncos de la cuenca del Río de la Plata (Argentina). Estos autores simularon la retrodispersión generada por canopeos de juncos de diferentes alturas asumiendo que dichas diferencias están dadas por el nivel del agua. Así la inversión del modelo permitió determinar el nivel del agua con una precisión aceptable, por lo que es muy provechoso realizar este tipo de técnicas en algunas zonas del país para una mejor interpretabilidad del sector, además de buscar realizar modelos hidrológicos para analizar el estado de las áreas afectadas.

Resultados y discusión

El problema más destacado de los sensores ópticos en algunas regiones de Colombia, es cuando el fenómeno de inundación provocado por causas meteorológicas de lluvias intensas se encuentra

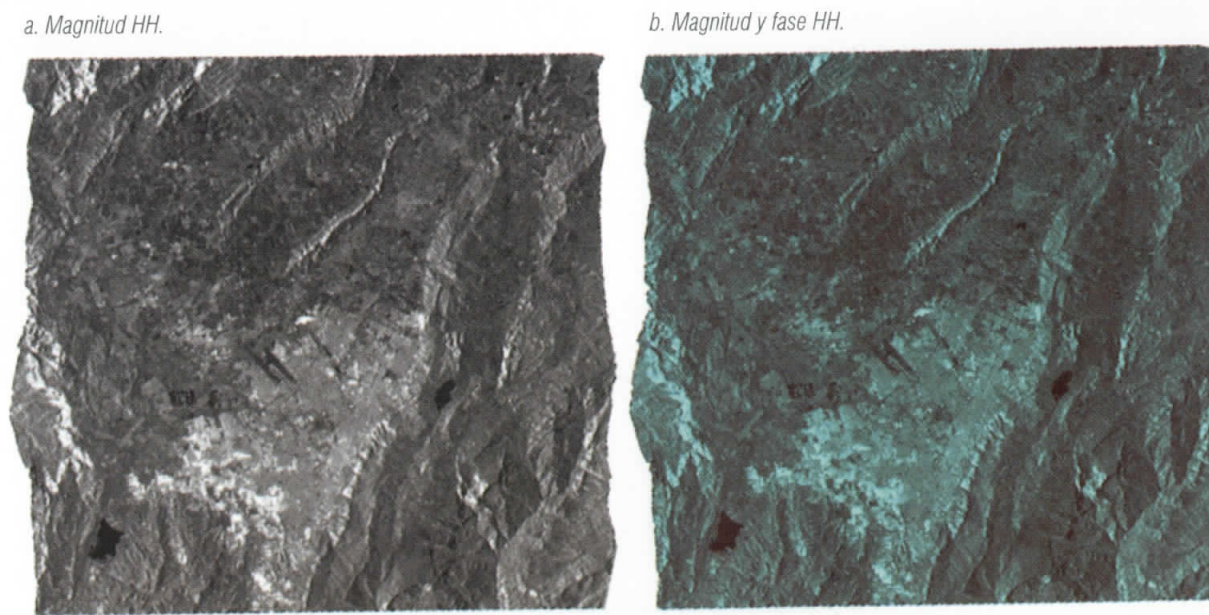


Figura 4. Imagen Radarsat-2 ciudad de Bogotá.

presente y no deja que el espectro de sus bandas penetren las nubes, por lo tanto no hay observación de la superficie terrestre, sin embargo uno de los recursos que se tiene de manera rápida y sin ningún costo son los datos e imágenes liberadas por el servicio geológico de Estados Unidos (USGS) que ayudan a diagnosticar el estado de las zonas inundadas y a entender cómo ha sido su comportamiento.

Un ejemplo de utilización de imágenes LandSat fue el presentado en junio de 2011, en zonas donde no se pudo observar el evento como en la región Andina por las intensas lluvias presentes en ese momento, no obstante para este mismo periodo y por medio de estas imágenes se pudo identificar el estado de recuperación en zonas del valle inferior del Magdalena y norte del país como en sectores de la Mojana y del Canal del Dique. La calidad de visualización e interpretación es baja cuando el fenómeno atmosférico está presente en la zona y con imágenes ópticas no se puede apreciar en superficie las extensiones, tipo, tránsito, ni zonas de afectación por inundaciones, por lo tanto con imágenes radar se puede superar la visualización y por ende la interpretación y realización de procesos de clasificación automatizados, tal como se muestra en la Figura 5, en zonas del Valle del Magdalena

Medio, con sensores LandSat y RadarSat-2 de modo Estándar con pases orbitales diferentes, ascendente para el mes de febrero de 2011 y descendente para el mes de junio, lo cual para la interpretación visual y procesos digitales desarrollados fueron eficientes.

Aunque estos fenómenos de nubosidad no son superados por completo en las imágenes radar y se pueden apreciar con menor intensidad comparado con una imagen óptica, ejemplo de esto se detectó en imágenes RadarSat-2 en la zona norte de Colombia a principios de 2011 (Figura 6) y en

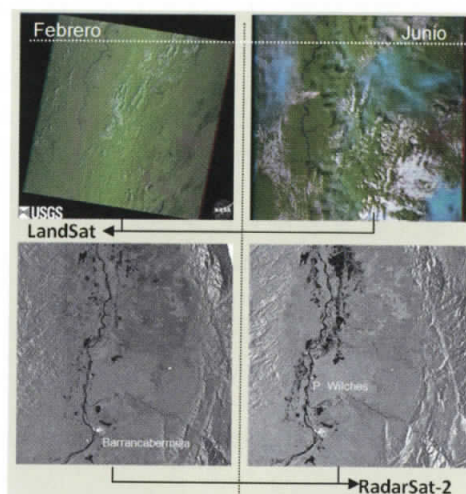


Figura 5. Visualización de inundaciones con sensores remotos.

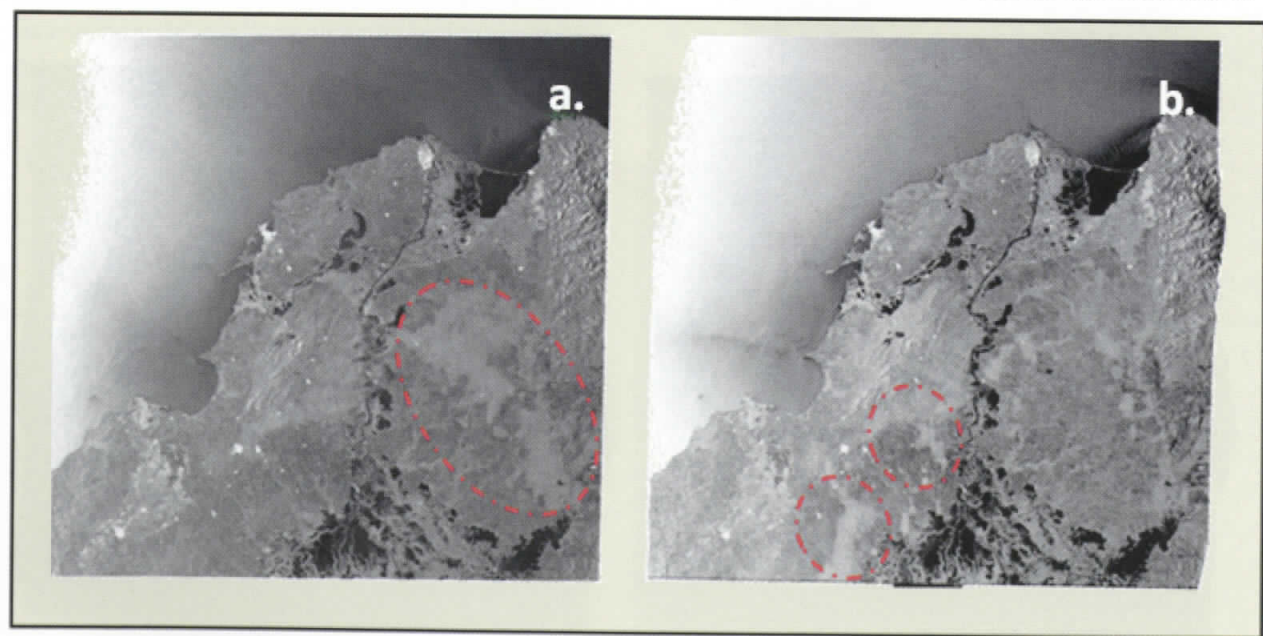


Figura 6. Efecto atmosférico en imágenes radar con sensor RadarSat-2. 16 febrero (a) y 5 marzo (b) de 2011. Presencia de nubes en círculos de color rojo.

imágenes de CosmoSkymed para la zona Andina a finales de 2011.

En las imágenes SAR las áreas de agua y las áreas terrestres son bastante diferentes. Existen dos grandes diferencias entre áreas de agua y áreas terrestres: el brillo y la rugosidad. Las zonas de agua son más oscuras y más lisas que las áreas terrestres. Así que en zonas de cambio, el brillo y la rugosidad varían bastante, mientras que en zonas donde no existen cambio no hay diferencias significativas entre las dos imágenes de comparación. En algunas regiones del país la identificación y detección de áreas inundadas fue de fácil manejo en la generación de su cobertura, por lo que se hizo bajo el control de interpretación visual con las imágenes clasificadas, realizadas mediante clasificaciones simples automatizadas no supervisadas. Estas zonas por lo general se encontraban en el valle amplio del Valle del Cauca, al norte de la ciudad de Cali, en donde las inundaciones fueron evidentes a simple vista, según la aparición de nuevos cuerpos de agua y zonas netamente con presencia de agua (Figura 7).

La media, la varianza y la mediana de la intensidad de un pixel en el vecindario espacial en imágenes multitemporales SAR pueden expresar diferencias de brillo y rugosidad. Actualmente se está desarrollando un set de entrenamiento del algoritmo Adaboost conformado por dos imágenes SAR y su correspondiente imagen con las áreas de cambio "reales". Para realizar la clasificación se necesita extraer la textura y usar los clasificadores débil y fuerte obtenidos para clasificar el "cambio" o "no cambio".

La característica más importante en la identificación de zonas inundadas a partir de información radar es el drástico cambio en la rugosidad de la superficie. Un cuerpo de agua presenta una superficie muy poco rugosa (suave) debido a la retrosección especular, en la cual la longitud de microondas proveniente del radar impacta de manera oblicua en la superficie y estas ondas son reflejadas dando una respuesta en imagen de superficie lisa o plana y con tonalidades oscuras. Por lo tanto, la retrodispersión captada por el radar será mucho

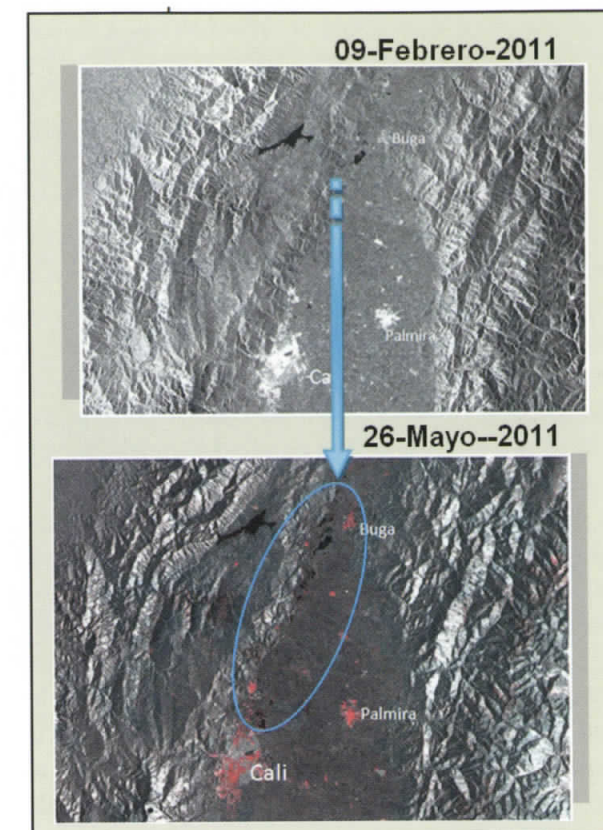


Figura 7. Identificación y extracción de cobertura de inundación.

más baja en áreas cubiertas por agua que en áreas cubiertas por vegetación o suelo desnudo. Estas características son expuestas en la publicación "La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones" (Horritt *et al.*, 2001) que a su vez referencian ejemplos como la delimitación de la extensión del área inundada en Manitota (Canadá) realizada por Lowry *et al.* (1979), la delimitación por datos radar realizada por Sipple *et al.* (1994), quienes lo hicieron a lo largo del río Amazonas (Brasil), y el ejemplo de Teti *et al.* (1993) en el centro oeste de Estados Unidos durante las inundaciones del 1993. Las principales dificultades encontradas en la delimitación de las áreas cubiertas por agua ocurren cuando el viento o la vegetación acuática modifican la rugosidad de esta. Lo anterior dentro del territorio colombiano se debe tener en cuenta en regiones desérticas como la del norte del país en La Guajira, y en zonas de manglares o con ecosistemas acuáticos que enmascaren la

inundación y que desde la observación espacial no se puedan identificar claramente, como las respuestas altas de retrodispersión que presentan los datos de los sensores SAR en sectores de Urabá (Figura 8).

La interpretación de zonas inundadas desde la percepción remota no solo debe realizarse con métodos automatizados, se deben tener en cuenta los estudios especializados como la geomorfología de la región, los tipos de suelos y caracterizaciones hidrológicas de la zona, estudios escasos en nuestro país a escalas regionales y detalladas, por lo que en la mayoría de los casos el mismo insumo de imagen es utilizado para la definición de las anteriores temáticas, pero que por cuestiones de caracterizar en tiempo inmediato debido a la situación de emergencia o de gestión de riesgo por inundación a corto y mediano plazo se hace imposible conceptualizar las temáticas por separado. Por lo que las interpretaciones se deben hacer según la experiencia del intérprete, de su conocimiento de la zona y realizar procesos automatizados de análisis mediante mapas de sombras (d) tal como se

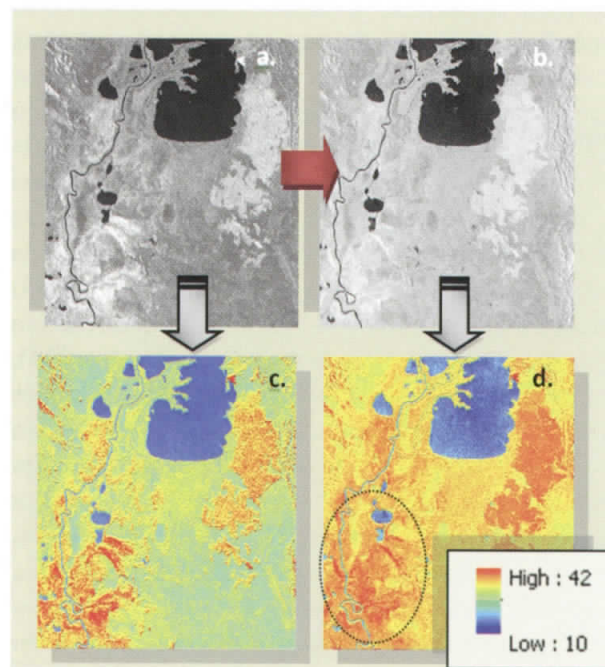


Figura 8. Procesamiento digital e índices de retrodispersión en el sector de Urabá. Sensor RadarSat-2. Modo Estándar.

presenta en la Figura 9, para separar las extensiones “normales” de ecosistemas pertenecientes a la Ciénaga Grande de Santa Marta, de la inundación propiamente expuesta para el mes de febrero de 2011. En la figura 9 se presenta la imagen original (a), el resultado de imagen según su cálculo de índices de retrodispersión (b) y la clasificación de la imagen resultante con extracción de cuerpos de agua e identificación de zonas inundadas.

Otro de los procesos digitales realizados a las imágenes radar para identificar los cuerpos de agua formados por las inundaciones dentro de las zonas inundadas en Bogotá, fue mediante la aplicación de texturas, combinando los datos de magnitud y fase de la polarización HH, como se observa en la Figura 10, escena correspondiente al día 6 de febrero de 2011 (a), que junto con análisis espaciales (b) se obtuvo en formato raster la debida clasificación y se extrajo mediante procesos de vectorización la cobertura en esta zona.

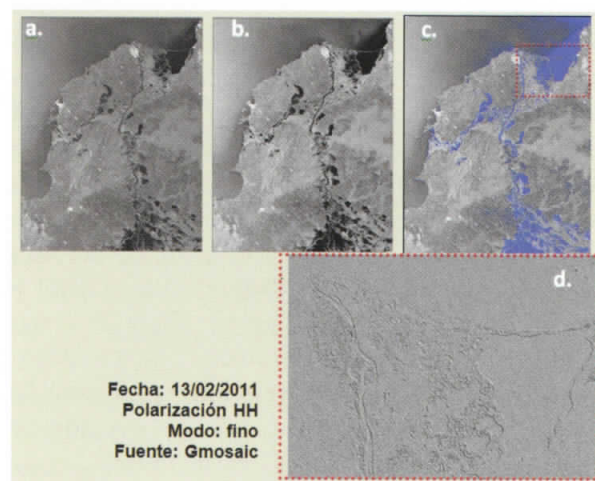


Figura 9. Resultados de interpretación de inundación sector N-W de Colombia, desembocadura del río Magdalena y CGSM.

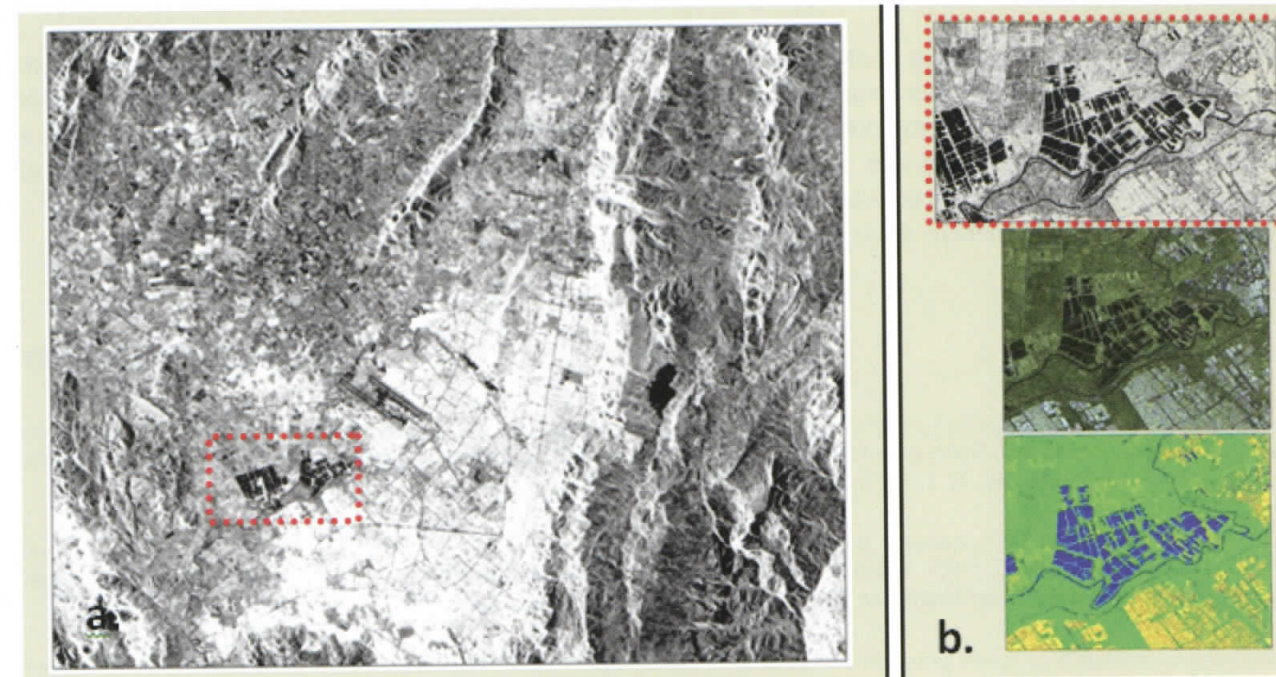


Figura 10. Procesamiento digital con imagen RadarSat-2.

Conclusiones

En el reconocimiento de zonas inundadas para Colombia desde la perspectiva de percepción remota y con la utilización de datos de imágenes de sensores remotos, se exploraron los recursos para definir los métodos de identificación de procesamiento digital semiautomatizado, con supervisión y validación para la generación de coberturas con aparición de cuerpos de agua y aéreas inundadas en la determinación de zonas de afectación en algunas regiones del país, durante un periodo de un año desde diciembre de 2010; empleando en la mayoría de los casos interpretaciones visuales junto con procesamientos realizados a las diferentes imágenes para su mejoramiento en la visualización del fenómeno a analizar. Lo anterior con miras a realizar una guía metodológica como protocolo y aporte desde la percepción remota o teledetección en el reconocimiento del tránsito y tipo de inundación con la localización de su afectación que sirvan al manejo de las etapas de gestión del riesgo por inundaciones en futuros eventos, teniendo en cuenta la escala y el detalle que se requiera dentro del territorio colombiano.

Se han podido identificar algunas metodologías de procesamiento digital, las que según la imagen y para cada región tienden a realizarse cambios en su estructura de aplicación, se recomienda entonces que para su terminación y definición se haga por zonas o regiones y empleando características adecuadas dependiendo de las tomas y la geometría de cada sensor a utilizar.

El conocimiento y el manejo de los datos de imágenes satelitales es de gran ayuda no solo al reconocimiento de inundaciones, sino para temáticas específicas importantes en la identificación de zonas aptas para amenazas y por ende posibles generadoras de riesgo. Sin embargo, desde la percepción remota vemos una representación diferente a la ocurrencia de dichos fenómenos, es decir, una imagen es captada desde una visión del espacio hacia la superficie terrestre, y en el caso de una inundación, esta se da por el aumento de niveles de agua por encima de la superficie terrestre o ecosistemas presentes, lo que para la interpretación con estas tecnologías debe ser empleada por profesionales conocedores de la

región, al igual que tener en cuenta el conocimiento de los elementos visibles en las imágenes. Una imagen posee muchos más elementos físicos y de composición de una región que combinado con la cartografía base y su respectiva toponimia, es complemento para el manejo de la cartografía

moderna que sin lugar a duda se convertirá en un incentivo para avanzar en el conocimiento de estas técnicas de procesamiento de sensores aplicados a temáticas específicas como la mencionada en el presente artículo.

Referencias bibliográficas

Alsdorf, D.; Dunne, T.; Melack, J.; Smith, L. and Hess, L. 2005. Diffusion modeling of recessional flow on central Amazonian floodplains. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L21405, doi:10.1029/2005GL024412.

Bates, P. D. and Anderson, M. G. 1995. 'Issues of hydraulic model validation and design using remotely sensed data', *Proceedings, First ERS Thematic Working Group Meeting on Flood Monitoring, European Space Agency/ESRIN, Frascati, Italy*, 26±27.

Grings, F. M., Ferrazzoli, P., Jacobo-Berles, J.C., Karszenbaum, H., Tiffenberg, J., Pratalongo, P. Kandus, P. 2006. Monitoring flood condition in marshes using EM models and Envisat ASAR observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44:936-942.

Ho a, L. T. K., Umitsu, M.B and Yamaguchi, Y. 2010. Flood hazard mapping by satellite images and srtmdem in the vu gia – thu bon alluvial plain, central Vietnam. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan*.

Horritt, M.S.; Mason, D.C.; Cobby, D.M.; Davenport, J.T and Bates P.D. 2003, Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery. *Remote Sens. Environ.*, 85(3), 271–281.

Khurshid, K.S., K. Staenz, A. Bannari, L. Sun, R. Neville, H.P. White, C.M. Champagne and R. Hitchcock. 2006. Pre-processing of EO-1 Hyperion Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 32, no. 2, p. 84-97.

Lastra, J, Fernández, E., Díez-Herrero, A., Marquínez, J. 2008. Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. *Natural Hazards*, 45:277–293.

Lowry, R.T., Mudry, N., Langham, E.J. 1979. A preliminary analysis of SAR mapping of the Manitoba flood, May 1979. *Satellite hydrology; Proceedings of the Fifth Annual William T. Pecora Memorial Symposium on Remote Sensing*: 316-323.

Lowry, R. T., Langham, E. J., and Mudry, N. 1981. 'A preliminary analysis of SAR mapping of the Manitoba Flood, May 1979', in *Satellite Hydrology, Proceedings, Fifth Ann. William T. Pecora Memorial Symp. on Remote Sens.*, 1979, Amer. Wat. Resour. Assoc. Tech. Pub. No. TPS81-1, pp. 316-323.

Oberstadler, R., Honsch, H and Huth, D 1997. Assessment of the mapping capabilities of ERS-1 SAR data for flood mapping: case study in Germany. *Hydrol. Processes* 11, 1415-1426.

Rasid, H. and Pramanik, M.A.H. 1993. 'Areal extent of the 1988 flood in Bangladesh: how much did the satellite imagery show?' *Natural Hazards* 8, 189–200.

Sano, E.E., Ferreira, L.G., Asner, G.P., Steinke, E.T. 2007. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. *International Journal of Remote Sensing* 28:2739-2752.

Sipple, S.J., Hamilton, S.K., Melack, J.M., Choudhury, B.J. 1994. Determination of inundation area in the Amazon river floodplain using the SMMR 37 GHz polarization difference. *Remote Sensing of Environment* 48:70-76.

Smith, L., Isacks, B. L., Forster, R. R., Bloom, A. L., and Preuss, I. 1995. 'Estimation of discharge from braided glacial rivers using ERS-1 SAR: first results', *Wat. Resour. Res.*, 31, 1325-1329.

Smith, L.C. 1997. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review. *hydrological processes*, Vol. 11, 1427-1439.

Teti, J.G., Ilseman, F.J., Verdi, J.S., Boerner, W.M., Krasznay, S.K. 1993. Application of the polarimetric matched image filter to the assessment of SAR data from the Mississippi flood region. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation*, IEEE International 3:1368-1370.

Voigt, S; S Martinis, S.; Zwenzner, H.; Hahmann, T.; Twele, A. and Schneiderhann, T. 2008. Extraction of flood masks using satellite based very high resolution SAR data for flood management and modeling. *German Remote sensing data center, German Aerospace Center, Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling, Germany*.

Wang, Y., Colby J. D, and Mulcahy K. A. 2002. An efficient method for mapping flood extent in a coastal flood using Landsat TM and DEM data. *International Journal of Remote sensing*, 2002, Vol. 23, no. 18, 3681–3696, Taylor & Francis Ltda.

Imágenes Hiperespectrales (HSI): La nueva generación de los sensores remotos

Hyperspectral Imaging - HSI: Remote Sensing New Generation

Jonás C. León Pérez¹

Resumen

En este trabajo se muestran las características específicas de las imágenes hiperespectrales (HSI, HyperSpectralImagin), las que están compuestas por más de cien bandas espectrales y ancho de banda relativamente estrechas (5-10 nm). Se explica que los datos hiperespectrales pueden ser visualizados como un cubo tridimensional, con dos dimensiones representadas por las coordenadas espaciales (x, y) y la tercera representada por las bandas espectrales (λ), ubicadas en el eje z. Se desarrollan los temas de firma espectral pura (endmembers), biblioteca espectral, programas con sensores hiperespectrales y procesamiento digital de datos hiperespectrales (calibración de datos de reflectancia, reducción de la dimensionalidad de la imagen y clasificación). Se concluye que las HSI son una fuente relativamente nueva de datos para que los objetos y materiales (suelos, vegetación, minerales, etc.) puedan ser detectados, identificados, discriminados y cuantificados con mayor precisión.

Palabras clave

Imagen Hiperespectral, firma espectral pura (endmember), cubo hiperespectral, biblioteca espectral (espectroteca), procesamiento digital de HSI.

Abstract

This paper shows the hyperspectral imaging (HSI) characteristics, composed by more than one hundred spectral bands and relatively narrow bandwidth (5-10 nm). It is explained that the hyperspectral data can be displayed through a three dimensional cube with two dimensions represented by the spatial coordinates (x, y) and third spectral bands represented by (λ) located on the z axis. The following topics are developed: pure spectral signature (endmembers) spectral library, hyperspectral sensors programs and digital processing of hyperspectral data (reflectance calibration data, reducing the dimensionality of the image and classification). We conclude that the HSI is a relatively new source of data for the objects and materials (soils, vegetation, minerals, etc.) can be detected, identified, discriminated and quantified more accurately.

Key words

Hyperspectral Image, pure spectral signature (endmember), hyperspectral cube, spectral library, digital processing of HSI.

¹ Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá (Colombia), jonas.leon2@igac.gov.co, jleonp@unal.edu.co

Introducción

En el amplio campo de la percepción remota, los sensores e imágenes hiperespectrales (HSI, por su sigla en inglés), también conocidas como imágenes espectroscópicas, son una fuente relativamente nueva de datos y que están siendo aplicadas en áreas tan diversas como la agricultura, la exploración de minerales e hidrocarburos, la geología y la silvicultura, entre otras. La gran sensibilidad y fina resolución espectral proporcionadas por esos sensores, ofrecen una oportunidad sin precedentes para estudiar con detalle zonas remotas y a veces inaccesibles.

El concepto de percepción remota hiperespectral se empieza a utilizar a mediados de los años 80, cuyos productos, las imágenes hiperespectrales, están compuestas por cientos de bandas espectrales contiguas, en contraposición de las imágenes multispectrales, que están integradas por menos de 10 bandas espectrales discretas. Como resultado, muchos objetos y materiales pueden ahora ser detectados, identificados, discriminados, clasificados y cuantificados con mayor precisión.

Pero, por otro lado, se ha tenido la idea de que la imagen hiperespectral es una extensión natural de la imagen multispectral, con una expansión de bandas, motivo por el cual las técnicas desarrolladas para el tratamiento de las imágenes multispectrales pueden ser aplicadas, casi sin modificarlas, a las imágenes hiperespectrales. Sin embargo, esta interpretación intuitiva puede ser errada, principalmente porque las técnicas desarrolladas para el análisis de las imágenes hiperespectrales, están generalmente orientadas a definir objetos específicos, que pueden ser detectados a nivel de pixel mezclado y/o subpixel, en contraposición a las técnicas orientadas a 'patrones', de las imágenes multispectrales, merced a su baja resolución espectral.

En consecuencia, el objetivo del presente artículo es mostrar la naturaleza específica de la imagen hiperespectral, incluyendo temas como el cubo hiperespectral, firmas espectrales puras, bibliotecas espectrales, la selección y reducción de bandas, análisis de mezclas espectrales, y los sistemas de clasificación, en la perspectiva de utilizarla adecuadamente para el estudio de los recursos naturales y del medio ambiente, en regiones de gran complejidad, como son las zonas tropicales.

Conceptos generales

Definiciones

El término "hiper" es una palabra de origen griego que significa "sobre", "por encima" o "una cantidad exagerada", que unida a la palabra "espectral", que denota los colores componentes de la luz, forman el término "hiperespectral", que significa "muchos colores" o, más específicamente, "una cantidad exagerada de bandas con sus correspondientes longitudes de onda" (Borengasser et ál., 2008; Schmidt, 2003). En otras palabras, la percepción remota hiperespectral se refiere a tomar una porción del espectro electromagnético y partirlo en piezas o porciones (Figura 1), con el propósito de hacer un análisis riguroso de ellas (Borengasser et ál., 2008), para cumplir con los objetivos prefijados, por ejemplo, discriminar las malezas presentes dentro de un cultivo en desarrollo.

Específicamente, las imágenes hiperespectrales están compuestas por más de 100 bandas espectrales con anchos de banda relativamente estrechos (5-10 nm), a diferencia de las imágenes multispectrales que están conformadas por 5 a 10 bandas espectrales con anchos de banda amplios (70-400 nm), como se muestra esquemáticamente en la Figura 2. Desde el punto de vista de la forma de la curva espectral característica de cada objeto o fenómeno sobre la superficie terrestre, es evidente que en las imágenes hiperespectrales la curva es continua, mientras que en las imágenes multispectrales esta es una representación de la unión de puntos aislados (bandas) en pocas porciones específicas, o áreas de muestreo (Figura 3).

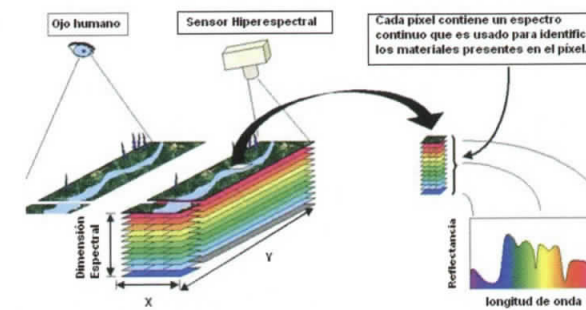


Figura 1. Concepto central de la percepción remota hiperespectral.

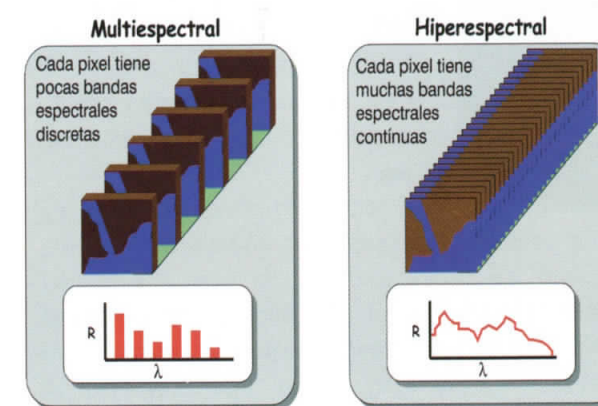


Figura 2. Número de bandas de las imágenes multispectrales (a) e hiperespectrales (b).

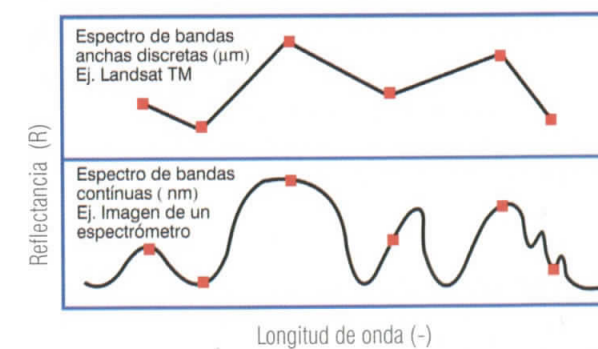


Figura 3. Curvas típicas de imágenes multispectrales e hiperespectrales.

La tecnología

Una imagen hiperespectral es el resultado de la combinación de las siguientes tres tecnologías: I) imagen convencional, II) espectroscopia, y III) radiometría, lo que permite producir imágenes que asocian la signatura espectral con cada elemento espacial, denominado pixel (Gat and Subramanian, 1997; Gat, 1998), cuyo esquema se muestra en la Figura 4. Además, es conveniente resaltar que el término 'espectroradiometría' expresa la combinación de las técnicas espectroscópicas con las mediciones radiométricas (Kardeván, 2004).

El concepto de un cubo hiperespectral

Los datos producidos por una imagen espectral forman un cubo hiperespectral, que es un arreglo tridimensional de la información espacial (imagen), ubicados en los ejes X y Y, y la información espectral (-), sobre el eje Z; como consecuencia, una imagen espectral produce una curva espectral completa de cada pixel (Figura 5).



Figura 4. Relación entre las técnicas radiométricas, espectrométricas y de imágenes. Fuente: Elachi, 1987.

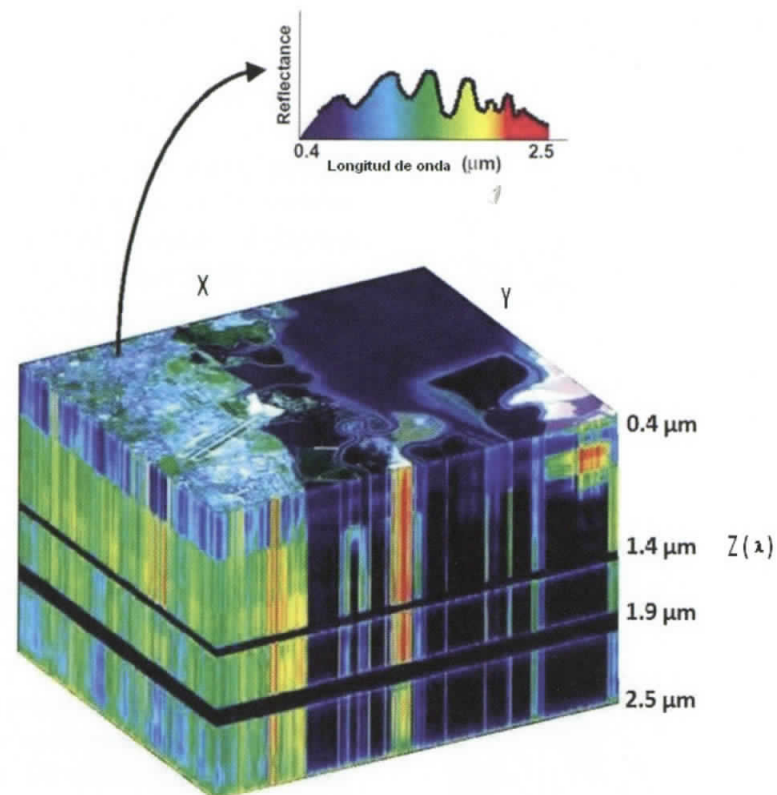


Figura 5. Representación del cubo hiperespectral.

El cubo hiperespectral o hipercubo, es un método poderoso y dinámico para visualizar, analizar y explotar los datos, ligando sus características espacial y espectral con la posibilidad de generar, entre otras, las librerías espectrales (Gat and Subramanian, 1997; Borengasser, et ál., 2008), o espectrotecas, útiles para el proceso de clasificación de imágenes.

El resultado final de las imágenes de alta resolución espectral es que con ellas se pueden identificar materiales específicos, reconociendo su composición y ciertas propiedades físicas, mientras que con los sensores multispectrales solamente se pueden discriminar entre materiales (Short, s.f.).

En resumen, una HSI tiene las siguientes ventajas e inconvenientes frente a otros sensores (Chuvieco, 2002; Gat, 1999):

Ventajas

- Pueden analizarse las relaciones espectrales – espaciales.
- Pueden observarse pequeñas bandas de absorción.
- Puede determinarse la composición de una mezcla de materiales dentro de una resolución espacial (pixel).
- Pueden localizarse las firmas espectrales de objetos que ocupan espacios menores al tamaño de un pixel.

Inconvenientes

- Se requieren correcciones radiométricas y geométricas precisas.
- Se generan grandes volúmenes de datos.

En relación con el segundo inconveniente, algunos autores (Gat y Subramanian, 1997; Borengasser, 2008) manifiestan que es recomendable seleccionar las bandas útiles y eliminar el gran volumen de datos que no solo no contribuyen al desarrollo de la aplicación, sino que pueden causar enorme confusión.

Firma espectral pura (Endmember)

En el ambiente de la percepción remota hiperespectral, la habilidad para derivar información desde los datos espectrales es clave en el desarrollo de una aplicación. En consecuencia, de la gran cantidad de datos espectrales se deben extraer aquellos que sirven para definir la firma espectral de interés, que permita identificar el material u objeto bajo consideración, es decir, obtener una firma espectral pura o 'Endmember' en inglés.

Un método para recolectar firmas espectrales puras es utilizando un espectroradiómetro en el laboratorio, que se focaliza sobre un material simple (puro) y conocido. Esas firmas son luego incorporadas al sensor espectral, y los algoritmos de detección son usados para definir y refinar la escena espectral colectada que pueda servir para reconocer el material con características similares (Borengasser et ál., 2008). Finalmente, la firma espectral pura, o referencia espectral, es almacenada en una librería espectral.

Sin embargo, las firmas espectrales puras no son constantes dentro de una escena simple, lo que indica que puede haber variaciones espectrales de ellas (Bateson et ál., 2000), debido principalmente a la inherente variabilidad en la naturaleza. Así, al hacer un análisis geológico, teóricamente es posible encontrar un espectro de cada mineral puro, pero hay factores que afectan esa posibilidad, ya que materiales con idéntica composición pueden tener diferentes firmas espectrales, debido a diferentes grados de cristalización y de meteorización, presencia o ausencia de agua y grado de transparencia. Similar situación puede suceder cuando se analiza la vegetación, cuyas

firmas espectrales son afectadas por las lluvias, presencia o ausencia de minerales en el suelo, fase del ciclo de desarrollo (fenología) y orientación de las hojas con relación al sol.

Por otro lado, el uso de firmas espectrales puras para estimar la composición de un pixel se asemeja al análisis de un sistema triangular (o de mayor grado) donde los vértices son ocupados por los elementos puros (A, B y C) y la mezcla de los tres materiales, tal como X (Figura 6), corresponde a la distancia relativa a esos elementos puros (Liang, 2004), representado en porcentajes. Así, en la Figura 6 la mezcla X tiene el 10 % del elemento A, 20 % del elemento B y 70 % del elemento C. Por su parte Bohlman (2008) muestra, en contraste al ejemplo hipotético anterior, un caso de estudio en boques tropicales de Panamá, para identificar las posibles mezclas en un píxel, teniendo como vértices (elementos puros) a la vegetación verde, el suelo y la sombra.

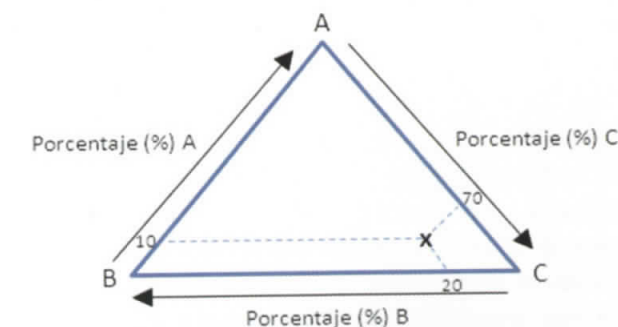


Figura 6. Composición de un pixel (x) con base en la proporción (%) de los elementos puros (A, B y C).

Biblioteca espectral (espectroteca)

Conceptos generales

El evidente desarrollo que están teniendo los sensores hiperespectrales, ha estimulado la creación de bibliotecas espectrales o espectrotecas. Se trata de colecciones de espectros, generalmente tomados en laboratorio, bajo condiciones controladas, que buscan recoger la reflectividad característica de materiales hechos por el hombre, de minerales puros, de

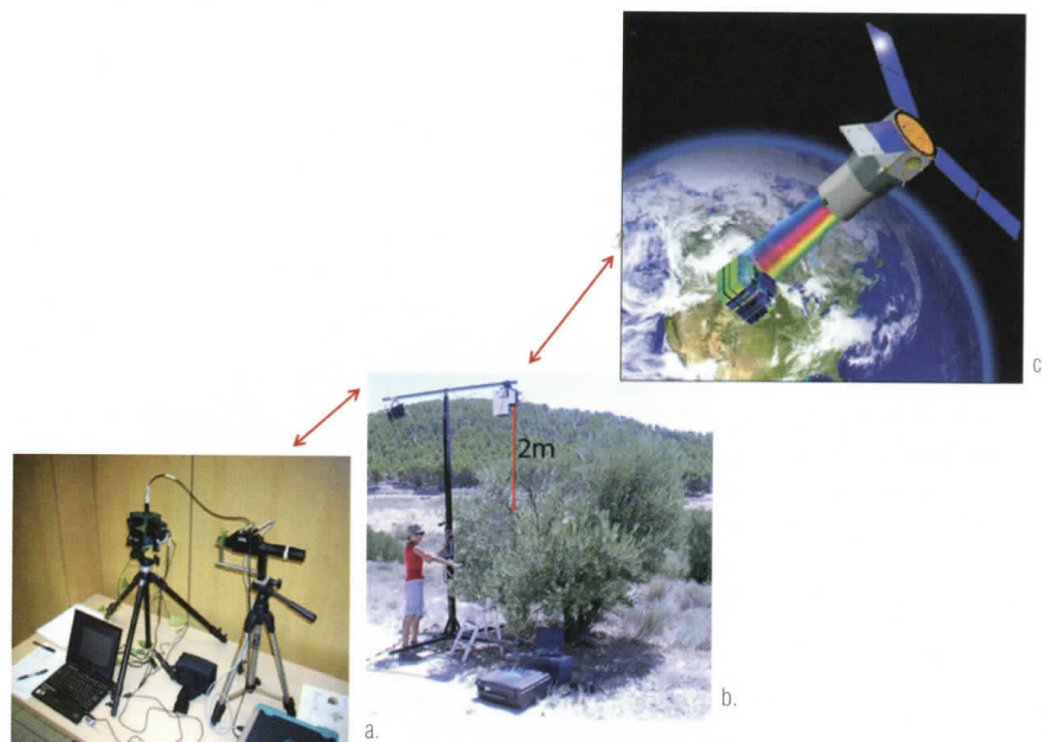


Figura 7. Tres fuentes para obtener firmas espectrales (a. en el laboratorio, b. en el campo y c. desde las imágenes) y sus relaciones.

minerales en sitios específicos, de conglomerados de vegetación pura y de variadas mezclas. Sin embargo, se pueden también obtener firmas características utilizando espectroradiómetros de campo en áreas naturales o controladas, y desde las mismas imágenes (espectros derivados de escenas) (Chuvieco, 2002). Los datos obtenidos en el campo pueden servir de puente entre los obtenidos en el laboratorio y, por los sensores ubicados en aviones o satélites (Figura 7).

Metodología para la construcción de bibliotecas espectrales

La construcción de bibliotecas espectrales es clave para mejorar la capacidad de obtener los mejores resultados en el mapeo de los recursos de la Tierra, utilizando las nuevas fuentes de datos proporcionados por las imágenes hiperespectrales, obtenidas desde plataformas aéreas o satelitales (Zomer *et al.*, 2009).

Pero, la construcción de las mencionadas bibliotecas no es fácil debido, fundamentalmente, para el caso de la vegetación, a cómo caracterizar la variabilidad espectral expresada en cambios debidos a los estados fenológicos y a las condiciones ambientales. Para minimizar este problema, una alternativa es desarrollar bibliotecas espectrales de sitios específicos, Schmid *et al.* (2004), como las implementadas por Robles *et al.* (2008), para conocer las respuestas espectrales de las principales especies vegetales de la Comunidad de Madrid (Figura 8); por Zomer *et al.* (2009), para clasificar la cobertura vegetal de tierras húmedas asociadas a refineras de petróleo, en Texas, Mississippi, California; por Schmid *et al.* (2004) para estudiar la degradación de las tierras húmedas en la región semiárida de La Mancha (España Central) y, Ben-Dor (1994) para caracterizar los principales suelos de Israel (Figura 9).

Cada uno de los autores mencionados anteriormente utilizaron diferentes espectroradiómetros de campo,

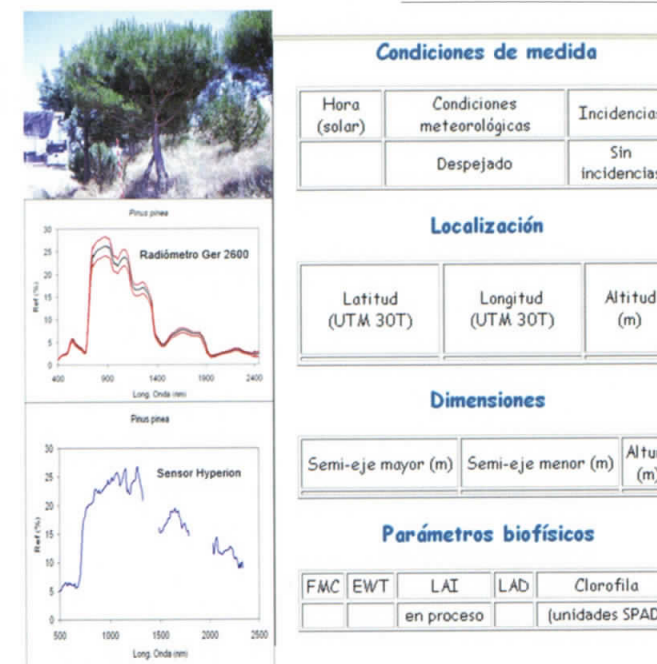


Figura 8. Parte de una librería espectral para vegetación. Fuente: Robles *et al.*, 2008.

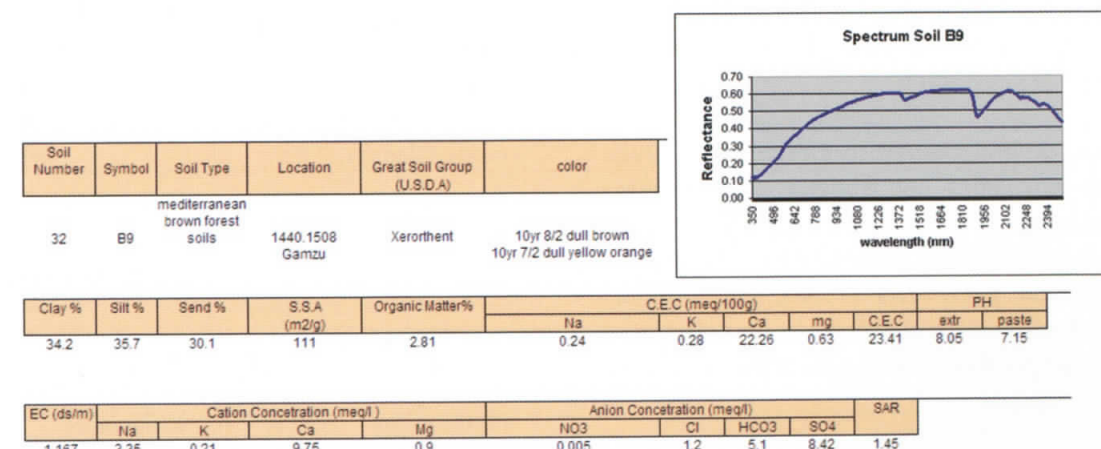


Figura 9. Parte de una librería espectral para suelos. Fuente: Ben-Dor, 1994.

diferentes imágenes hiperespectrales y diferentes datos complementarios. Así Schmid *et al.* (2004) utilizaron un espectroradiómetro ASD FieldSpec Pro (VNIR-SWIR) para hacer las lecturas espectrales y adicionalmente tomaron muestras de suelos, vegetación, sedimentos y costras de sal. En cada sitio de muestreo, seleccionaron cinco elementos de interés (vegetación), haciendo tres mediciones para cada uno de ellos. El preprocesamiento de las curvas espectrales incluyó la conversión de los

archivos espectrales del formato binario crudo a curvas de reflectancia absoluta, usando un software específico. Los datos hiperespectrales fueron proporcionados por el sensor aerotransportado DAIS 7915, adquiridos simultáneamente con las mediciones en campo, con la finalidad de hacer la calibración radiométrica de las imágenes.

Por su parte, Robles *et al.* (2003), desarrollaron una metodología siguiendo los pasos que se mencionan

a continuación: a) estudio del entorno para seleccionar las zonas de medida y especies vegetales de interés; b) definición de métodos de adquisición y procesamiento de la información de los sensores: Radiómetro GER¹-2600, cámara hiperespectral Specim y sensor Hyperion y, c) selección de variables auxiliares que complementen la biblioteca espectral. Para cumplir con los pasos mencionados se seleccionaron zonas de escasa pendiente que permiten la correcta instalación del instrumental y las mediciones radiométricas se hicieron entre las 10 y las 14 horas solares para que el ángulo cenital fuera mínimo; los sensores se situaron a una altura de 2 m sobre la superficie a medir, buscando que el campo de visión efectivo (FOV, por su sigla en inglés) sea tan grande como permitan los soportes para que la reflectividad medida de la planta sea representativa de esta. Además, se obtuvieron variables auxiliares tales como la localización utilizando un GPS, las dimensiones del individuo objetivo, hora solar de medida, el índice del área foliar, la distribución angular de las hojas y la humedad de la vegetación.

Otros casos de bibliotecas espectrales exhaustivas son las desarrolladas por Roberts *et al.* (1998), quienes recogieron las reflectividades de todas las especies de ecosistemas de chaparral californiano y, por Caetano y Oliveira (1998), en Portugal, ambos centrados en la clasificación de coberturas vegetales que puedan tener alguna influencia en el riesgo de incendios.

Es importante anotar que, las bibliotecas espectrales más elaboradas son las implementadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Clark *et al.*, 1993) que cuenta con una amplia variedad de espectros en el rango de 0,2 a 3,0 μm y, la compilada por el Jet Propulsion Laboratory (JPL), denominada ASTER (<http://speclib.jpl.nasa.gov>). Esta segunda biblioteca, está a cargo del JPL, Johns Hopkins University y el USGS que en su nueva versión (V.2) proporciona una colección de 2.300 curvas espectrales situadas entre 0,4-15,4 μm ,

1. Geophysical Environmental Research.

incluyendo espectros de minerales, rocas, suelos, meteoritos, vegetación (solamente 4 especies), agua, nieve y cubiertas humanas (asfalto, cemento, aluminio, pintura, etc.). Para cada espectro se incluye un archivo de documentación que facilita datos sustanciales sobre la fuente, condiciones de adquisición, el tipo de material observado, clase, subclase, tamaño de las partículas y composición química (Baldrige *et al.*, 2008; Chuvieco, 2002).

Cabe aclarar que en la biblioteca de minerales ASTER, han sido compiladas muestras de minerales estándar, bajo condiciones de laboratorio (VIS y NIR-SWIR), es decir, con total conocimiento de la composición del mineral puro, situación que no siempre se logra en condiciones de campo.

De lo expresado en este capítulo, se puede concluir que la base de datos espectral es absolutamente necesaria para manejar la gran afluencia de datos, productos de investigaciones actuales y del futuro, pero que tienen el inconveniente de presentar una amplia variedad de formatos, motivo por el cual es imperativo pensar en su estandarización y consolidación.

Programas con sensores hiperespectrales

Las imágenes hiperespectrales captadas desde plataformas aéreas o espaciales, presentan generalmente una resolución espectral en el rango de 1-20 nm, contiguos o casi continuos, en las regiones visible e infrarrojo cercano (VNIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR) y, a veces, dentro de la región termal (Buckingham *et al.*, 2002). La Tabla 1 muestra los principales sensores hiperespectrales activos con sus principales características, incluyendo las regiones.

Cabe destacar que fue a partir de 1970, con el desarrollo de la electrónica, las tecnologías de la computación y de la óptica, cuando se llega a la madurez que permite la creación de las imágenes

Tabla 1. Algunos sensores hiperespectrales y sus correspondientes características

Nombre del sensor	Empresa responsable	Plataforma	Máximo número de bandas	Máxima resolución espectral	Rango espectral
Hyperion en EO-1	NASA Goddard Space Flight Center	Satélite	220	10 nm	0.4 - 2.5 μm
MODIS	NASA	Satélite	36	40 nm	0.4 - 14.3 μm
CHRIS Proba (Compact High-Resolution Imaging Spectrometer)	ESA	Satélite	hasta 63	1.25 nm	0.415 - 1.05 μm
MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer)	ESA	Satélite	15	2.5 nm	0.39 - 1.040 μm
AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer)	NASA Jet Propulsion Lab	Avión	224	10 nm	0.4 - 2.5 μm
HYDICE	Naval Research Lab	Avión	210	7.6 nm	0.4 - 2.5 μm
PROBE-1	EarthSearchSciences Inc.	Avión	128	12 nm	1.4 - 2.45 μm
CASI 550 (Compact Airborne Spectrographic Imager)	ITRES Research Limited	Avión	288	1.9 nm	0.4 - 1 μm
CASI 1500	ITRES Research Limited	Avión	288	2.5 nm	0.4 - 1.05 μm
CASI 600	ITRES Research Limited	Avión	100	15 nm	0.95 - 2.45 μm
TASI 600	ITRES Research Limited	Avión	64	250 nm	8 - 11.5 μm
Hymap (Hyperspectral Mapping Imaging Spectrometer)	Integrated Spectronics	Avión	125	17 nm	0.4 - 2.5 μm
EPS-H (Environmental Protection System)	GER Corporation	Avión	133	0.67 nm	0.43 - 12.5 μm
DAIS 7915 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	GER Corporation	Avión	79	15 nm	0.43 - 12.3 μm
AISA Eagle (Airborne Imaging Spectrometer for Applications)	SpectralImaging	Avión	244	2.3 nm	0.4 - 0.97 μm
AISA Eaglet	SpectralImaging	Avión	200	---	0.4 - 1.0 μm
AISA Hawk	SpectralImaging	Avión	320	8.5 nm	0.97 - 2.45 μm
AISA Dual	SpectralImaging	Avión	500	2.9 nm	0.4 - 2.45 μm
AVNIR	OKSI	Avión	60	10 nm	0.43 - 1.03 μm

Fuente: adaptado de Dalponte *et al.* (2009).

hiperespectrales (Schaeppman, 2009). Con el arribo de esas tecnologías aparece la primera generación de instrumentos representado por el Airborne Imaging Spectrometer (AIS), bajo la responsabilidad del Jet Propulsion Laboratory (JPL) (1984), que fue el precursor del sensor más elaborado a la fecha (1995), denominado AVIRIS (Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer)

(Green *et al.*, 1998). Este sistema, también operado por el JPL, vuela sobre un avión U2, trabaja en el rango espectral de 0.4 a 2.5 μm , con 224 canales contiguos y un intervalo de muestreo de ± 10 nm. La gama de estudios realizados con este sensor es muy amplia, si bien el análisis de rasgos vegetales y de tipos de suelos han tenido mayor atención (Chuvieco, 2002).

Además de AVIRIS, hay otros sensores hiperespectrales en plataformas aéreas, entre los que se pueden destacar los siguientes: DAIS, gestionado por el DLR alemán, que es capaz de registrar 79 canales, la mayor parte en el VIS-IRC-SWIR, pero también con algunos en el infrarrojo medio (IRM) e infrarrojo térmico (IRT); el canadiense CASI, con dos versiones; el australiano HyMap; el japonés AISA y, Hy dice, desarrollado por la Fuerza Naval de los Estados Unidos (Chuvieco, 2002; Schott, 2000; Shaepman et ál., 2009).

Pero el avance continúa ampliando sus perspectivas, ya que en los últimos años se han puesto en órbita sensores espaciales de observación de la Tierra con capacidades hiperespectrales. De ellos, el que tiene mayor relevancia, junto con CHRIS-sobre Proba (ESA)², por cumplir con todos los requisitos de un sensor hiperespectral, es el Hyperion, instalado en la plataforma EO-1 lanzada en noviembre de 2000 por la NASA, proporciona 220 bandas espectrales entre 0.4 y 2.5 μm con una resolución espacial de 30 m y un área que cubre 7,5 x 180 km. En este mismo grupo se encuentra el MODIS a bordo de la nave espacial Terra, con solo 36 bandas espectrales y no presenta un registro continuo del espectro, sino diversas bandas aisladas y, el MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer de la ESA), a bordo de Envisat, con 15 bandas espectrales. Estos dos últimos programas, que tienen más de 10 bandas espectrales, pero discontinuas, no encajan adecuadamente en el carácter hiperespectral, motivo por el que se plantea una urgente necesidad por una definición apropiada de la terminología utilizada en este tema.

Muchas iniciativas nuevas están siendo puestas a prueba y aprobación para la observación espacial de la Tierra con sensores hiperespectrales, entre las que se pueden citar, HERO (Hyperspectral Environment and Resource Observer), EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) y Spectra Sat (propuesta para el desarrollo del programa Landsat de amplio espectro) (Shaepman, 2009).

² European Spatial Agency.

Complementarios a los avances en el diseño de nuevos sensores, son también significativas las mejoras en la capacidad de procesamiento de la información y en el desarrollo de algoritmos, que en conjunto auguran un aprovechamiento más eficiente de las imágenes hiperespectrales.

Procesamiento de datos hiperespectrales

Como se advirtió en la introducción, la aplicación directa de técnicas de clasificación para imágenes multiespectrales no son eficientes para las HSI, por las siguientes razones: los costos de computación para una dimensión - K son muy altos; se requieren muchos más datos de entrenamiento y, los clasificadores tradicionales no explotan adecuadamente la inmensa cantidad de información que hay en ellas (Schowengardt, 2007). Además, hay dos modos de clasificación que son exclusivas para HSI, tal como lo describen Mazer *et al.* (1988):

- Emparejar el espectro de todos los píxeles de la imagen con un espectro simple proveniente de una biblioteca espectral. Este modo es utilizado para localizar toda la ocurrencia de un material en particular, en toda la imagen.
- Emparejar un espectro simple, proveniente de imágenes de sensores remotos, con un espectro presente en la biblioteca espectral. En este caso se busca encontrar materiales que hacen juego con el espectro de una imagen dada.

Para ambos casos se requiere de la calibración de los datos obtenidos de los sensores remotos, con la finalidad de eliminar los efectos negativos de los gases atmosféricos (bandas de absorción y dispersión) en el procesamiento de los datos hiperespectrales cuyo proceso integral se muestra en la Figura 10.

Calibración de los datos de reflectancia

El paso más crítico en el análisis de imágenes hiperespectrales es la corrección precisa de los efectos atmosféricos (dispersión y absorción) y por esa vía convertir la radiación medida por el sensor a

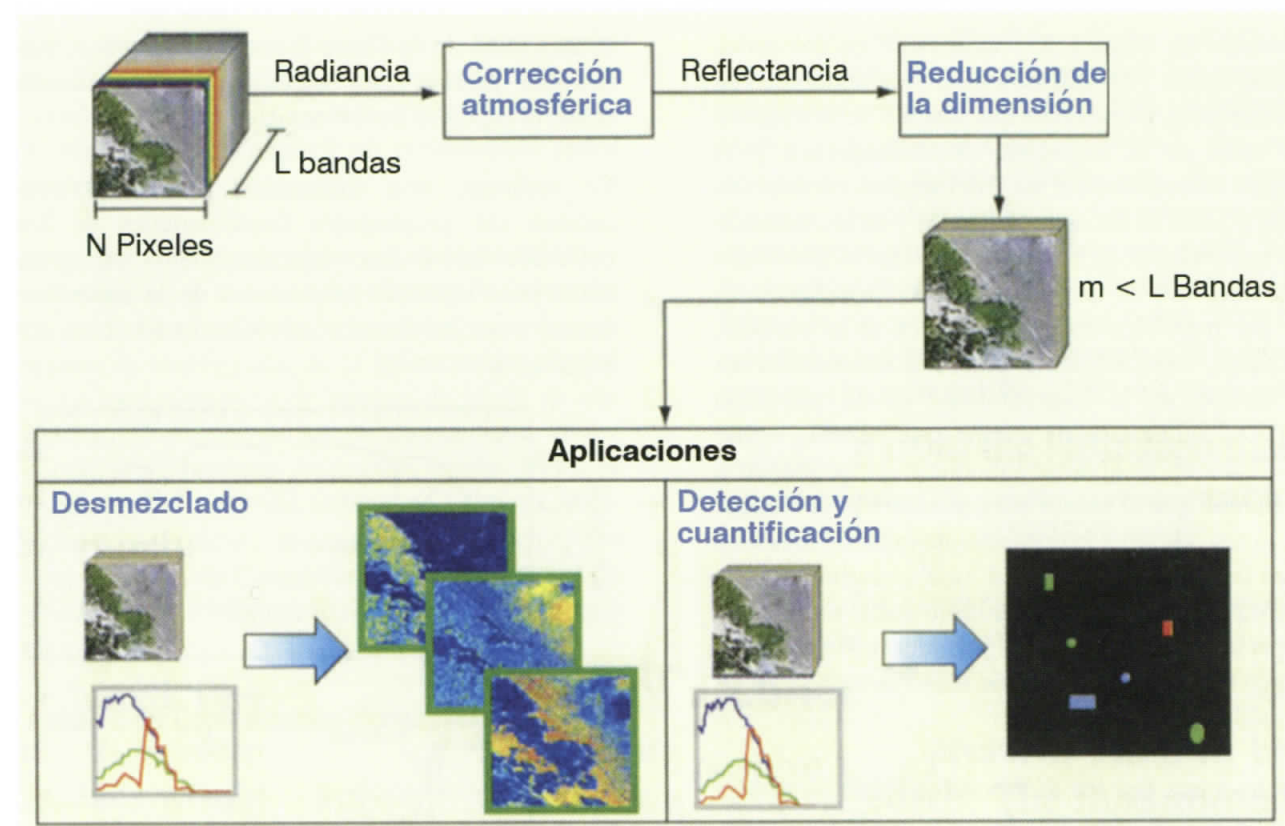


Figura 10. Proceso para el tratamiento de datos hiperespectrales.

valores de reflectancia, de tal manera que el espectro individual puede ser directamente comparado con los datos de campo y laboratorio que permita la identificación del material en estudio (Kruse, 1995; Clark et ál., 2002).

Lo anterior requiere que las longitudes de onda sean calibradas adecuadamente, donde las mediciones hechas en el laboratorio, antes y después de la adquisición de los datos, son el punto de partida. Adicionalmente, se pueden hacer chequeos a la calibración comparando la posición de las bandas de absorción atmosféricas conocidas y su localización en las imágenes hiperespectrales. Así, se conoce que la absorción por gases atmosféricos es dominado por el vapor del agua que hace opacas algunas regiones (por ejemplo en las bandas 0.69, 0.72, 0.76 y, principalmente, en las bandas 1.4 y 1.9 μm), con la contribución en menor grado del CO_2 (bandas localizadas a 2.005 y 2.055 μm , en el IR), ozono y otros gases (Kruse, 1995).

Para la calibración y corrección atmosférica de los datos de las HSI, se han desarrollado muchos métodos mostrados en los trabajos de Gao *et al.* (1993), Clark *et al.* (2002), Kruse (1995), de los cuales, los dos últimos, también presentan una revisión completa y detallada sobre los métodos, analizando sus resultados, alcances y limitaciones. Para los investigadores mencionados, los métodos pueden ser agrupados en cuatro categorías: correcciones derivadas de la escena, modelos de transferencia radiativa, métodos de calibración en campo, y métodos híbridos considerando los procedimientos de transferencia radiativa y la calibración en el campo.

El método derivado de la escena se refiere a la habilidad potencial para corregir a bordo los datos de sensores remotos, sin la dependencia de información o mediciones externas. Los modelos referidos a la calibración de datos de HSI usando las bases físicas de la transferencia de radiación, describen la importancia de la irradiancia solar, los

procesos de absorción y dispersión de los gases atmosféricos y la reflexión desde los materiales en la superficie, todos como una función de la longitud de onda de la radiación electromagnética y el ángulo direccional del sol y del sensor con respecto a los píxeles de los datos de la HSI y su localización correspondiente en la superficie terrestre. El método que hace uso de las mediciones de la reflectancia de los materiales en el campo y en el laboratorio, requiere, especialmente para las mediciones en el campo, de la disponibilidad de un adecuado espectroradiómetro de campo que permita tomar los datos en el área de influencia de la imagen y al tiempo que el sensor remoto sobrevuela el lugar de investigación y la consecuente toma de muestras para las mediciones con un espectroradiómetro de laboratorio. El método híbrido hace uso de las capacidades del segundo y tercer métodos que, según Clark (2002), produce mejores resultados en la calibración de las HSI.

Cualesquiera que sea el método utilizado, la ventaja que ofrece el espectro de reflectancia calibrado, comparado con los datos de radiancia sin corregir, incluye: 1) Las formas de los espectros calibrados son principalmente influenciados por las propiedades físicas y químicas de los materiales en la superficie, y, 2) el espectro calibrado del sensor remoto puede ser comparado directamente con los espectros de los materiales conocidos, obtenidos en el campo y en el laboratorio. Un ejemplo gráfico (Figura 11) de lo expresado líneas arriba, lo presentan Clark *et al.* (2002), quienes utilizaron datos del sensor hiperespectral AVIRIS. La Figura 11a muestra un espectro de radiación de un área sin vegetación, donde la forma del espectro está fuertemente influenciada por la función solar y los rangos de absorción (bandas) causadas por los gases atmosféricos, incluyendo también los efectos de dispersión de los aerosoles (pathradiance). Después de la calibración, el espectro (Figura 11b) revela los rasgos de absorción causados por los minerales sobre la superficie. Posteriormente se pueden examinar los espectros de los minerales del laboratorio para identificar los minerales causantes de los rasgos de absorción, en este caso hematita y montmorillonita. Las brechas en 11b están donde

la atmósfera de la Tierra es totalmente opaca, que impiden generar una superficie de reflectancia desde el espectro de radiancia en 11a.

En resumen, una calibración precisa permite mostrar las propiedades fundamentales de los materiales (minerales, vegetales, suelos, etc.) y es clave para ligar las propiedades de la superficie captados por los sensores remotos con los datos del laboratorio.

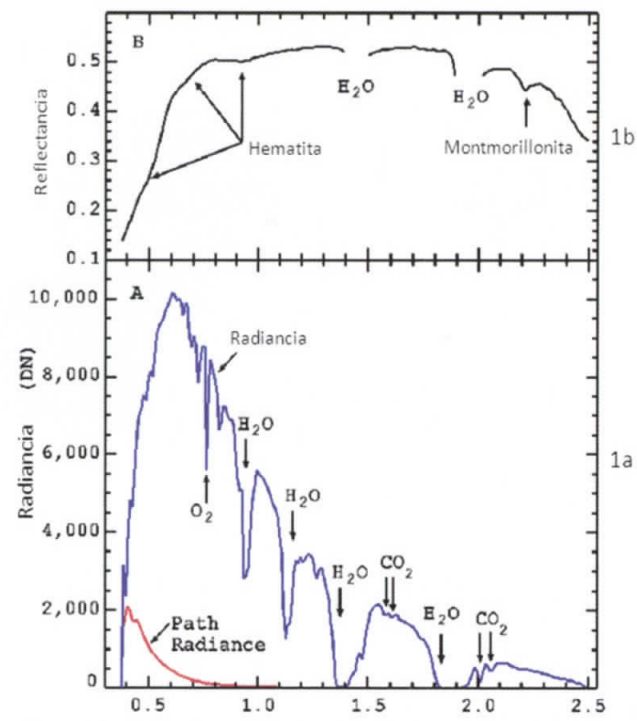


Figura 11. Efecto de la calibración de las imágenes hiperespectrales (la explicación en detalle, en el texto).
Fuente: Clark *et al.* (2002).

Reducción de la dimensionalidad de la imagen

Como se mencionó anteriormente, las características de las imágenes hiperespectrales se sintetizan en la presencia de un gran número de bandas espectrales, alta resolución espectral y grandes cantidades de datos, que pueden permitir una fácil discriminación de objetos presentes en una escena. Sin embargo, la gran cantidad de datos no solo dificulta su transmisión y almacenamiento sino también la clasificación (Su and Shu, 2009; Sobhan, 2007), así

como los análisis estadísticos que surgen cuando las bandas son redundantes y tienen una alta correlación entre sí (Chuvienco, 2002; Su and Shu, 2009), además de requerir un considerable poder de computación.

Para minimizar esos problemas (almacenamiento y redundancia) se recurre a las técnicas de reducción de la dimensionalidad de los datos, que buscan retener la mayor parte de la información original en un menor número de bandas, en razón de que mucha información de una banda puede ser total o parcialmente predicha desde otras bandas dentro de la base de datos (Lewis, Salvador y Gómez, 2005). Entre las técnicas más utilizadas se mencionan dos: Análisis de Componentes Principales (ACP) y Fracción del Mínimo Ruido (MNF, por su sigla en inglés).

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El ACP es una técnica frecuentemente usada en análisis espectral que permite sintetizar las bandas originales, creando unas nuevas bandas no correlacionadas – los componentes principales de la imagen – que recojan la parte más elevada de la información original (Lewis, Salvador and Gómez, 2005; Chuvienco, 2002).

En términos matemáticos, los componentes principales de una imagen se obtienen de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$CP_j = \sum_{i=1,p} a_{i,j} ND_i + R_j$$

Donde CP_j indica el número digital (ND) correspondiente al componente principal j, a_{i,j} el coeficiente aplicado al ND de la banda i para generar el componente j y R_j una constante que se incluye en cada componente para evitar valores negativos. Como resultado se obtendrán tantos componentes (p) como bandas, pero la forma de extraer esos componentes implica que solo los primeros tienen una información significativa con los que se

pueden separar o clasificar píxeles individuales dentro de las escenas, mientras que los restantes pueden ser ignorados debido a su baja contribución (Lewis, Salvador y Gómez, 2005). Un caso presentado por Sobhan (2007), para discriminar especies forestales, indica que los primeros cinco componentes principales explican más del 95 % de la variabilidad. El mismo autor manifiesta que las longitudes de onda del borde rojo³ (entre 740 y 750 nm) domina el primer CP, seguido por el infrarojo cercano, alrededor de 1280 a 1380 nm; que la parte visible de las bandas espectrales dominan en el segundo y tercer CP, y que en el cuarto y quinto CP predominan las bandas correspondientes al infrarojo de onda corta (SWIR).

Un desarrollo completo sobre la técnica de ACP, relacionado con el procesamiento digital de imágenes, se puede encontrar en Gonzales y Wintz (1977).

Fracción del Mínimo Ruido

La Fracción del Mínimo Ruido (MNF, por su sigla en inglés) es una transformación lineal relacionada con los componentes principales que ordena los datos de acuerdo al cociente señal/ruido⁴. Ella puede ser utilizada para reducir la dimensionalidad de los datos, para segregarse el ruido en los datos y para reducir los requerimientos computacionales en el proceso (Green *et al.*, 1988). Más específicamente, la MNF, llamada también método de análisis de componentes principales en dos cascadas (Liu *et al.*, 2008), consiste en aplicar dos ACP consecutivos: el primero, basado sobre una estimación de la matriz de covarianza del ruido, permite eliminar redundancias y re-escalar el ruido de los datos; el segundo es un ACP convencional de los datos

³ Borde rojo (red edge, en inglés) es un fenómeno que se produce como resultado de las propiedades espectrales diferenciales de las hojas verdes, que contienen pigmentos que absorben fuertemente las longitudes de onda del visible. Mientras la estructura celular refleja considerablemente el IRc, es decir, hay un marcado contraste entre la absorción de la clorofila y la reflectancia de la celulosa. Un valor alto del borde rojo indica una vegetación saludable; un valor bajo, sugiere enfermedad, marchitamiento o daño foliar (Liang, 2004).

⁴ Proporción entre la señal detectada por el sensor y el ruido aleatorio (mide la precisión del instrumento).

ya depurados. El ruido se estima a partir de los componentes más marginales de los autovalores, centrando el análisis en aquellos que retienen la mayor parte de la información original. Entonces, cuando se utiliza solamente la porción coherente en los procesos posteriores, el ruido es separado del dato, mejorando los resultados del procesamiento espectral (Kruse, 2003).

En un trabajo para estudiar la vegetación, utilizando datos del sensor HyMap, Addink, de Jong and Pebesma (2006) justifican el uso de la MNF, por dos razones: 1) el número de bandas (124) es muy grande para incluirlos en el procedimiento de segmentación y 2) los datos hiperespectrales muestran un alto nivel de colinearidad (collinearity) cuya aplicación permite reducir el número de variables mientras se mantiene mucho de la varianza. El análisis continuó con las 20 bandas MNF, que explicaban el 84 % de la varianza total en la imagen depurada.

Con los componentes no correlacionados y seleccionando los tres más significativos, también se pueden obtener imágenes de composición a color de una alta calidad, para un eficiente despliegue que proporciona un impacto visual máximo para el proceso de fotointerpretación y selección de áreas de entrenamiento (Jia and Richards, 1999).

Finalmente, sobre el tema tratado hay una pregunta interesante: ¿es necesario la reducción de datos? La respuesta de Resmini (2005) es: no con el desarrollo actual y futuro de las computadoras; no con la aplicación de nuevos algoritmos diseñados para el tratamiento de imágenes hiperespectrales y, sí, si se utilizan técnicas de clasificación tradicionales orientados a las imágenes multiespectrales, como también lo confirman Bakos and Gamba (2009), en un trabajo donde evalúan el potencial de las HSI para el mapeo de vegetación. En relación con los algoritmos, Díaz (2002) manifestaba que “no hay algoritmos desarrollados al presente que sean capaces de producir resultados tan precisos como aquellos disponibles para el análisis de las imágenes multiespectrales actuales”, merced a que ellos (los algoritmos) deben de ser más sensibles

para detectar cambios en pequeñas magnitudes que permitan identificar diferentes objetos, sin perder información valiosa.

Clasificación de la imagen hiperespectral

Hay muchas técnicas para la clasificación de imágenes hiperespectrales basadas en algoritmos, entre las que se encuentran aquellas que miden ángulos, distancias y correlaciones. Para las primeras, se admite que en un espacio espectral N-dimensional, donde la imagen hiperespectral se considera como un cubo, cada píxel puede ser definido como un vector X (Figura 12), que tiene una magnitud (longitud) y un ángulo medido con respecto a los ejes que define el sistema de coordenadas espacial. Con esta definición se deduce que las curvas espectrales son variaciones dentro de píxel como una función de las longitudes de onda (Homayouni and Roux, 2003).

De las técnicas que se basan en la medición de ángulos, se destaca el clasificador angular (SAM), cuyas particularidades se describen a continuación.

Clasificador angular (SAM, Spectral Angle Mapper)

El SAM es una técnica automatizada de clasificación supervisada, que utiliza exclusivamente el valor del ángulo entre dos vectores y no la longitud de los vectores (Kruse, 2003; IISC, 2008., Crósta, Sabine and Tavanik, 1996). Según Freeman (2003), la magnitud del vector puede estar relacionada con la iluminación del píxel y, el ángulo, con la forma de la curva espectral.

En esencia, el clasificador angular calcula la similitud entre el espectro de la imagen y un espectro de referencia que puede ser obtenido de una librería espectral o directamente del campo o del laboratorio. SAM determina la similitud espectral calculando el “ángulo espectral”, entre los dos espectros, tratando a ellos como vectores en un espacio n-dimensional, con n representando el número de bandas usadas (Kruse, 2003; Crósta,

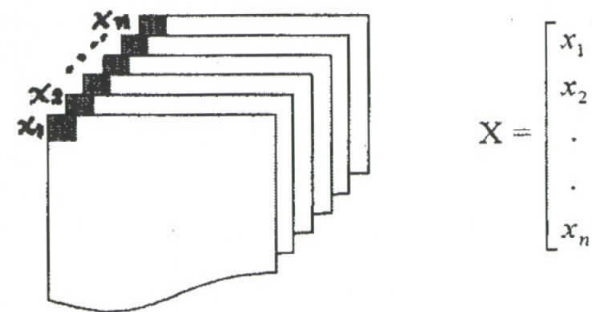


Figura 12. Cada píxel corresponde a un vector de observaciones.
Fuente: Adaptado de Homayouni and Roux (2003).

Sabine, Taranik, 1996). Valores pequeños del ángulo representan una alta similaridad espectral entre el píxel que se desea clasificar y el espectro de referencia. En la Figura 13 se observa que el ángulo θ_2 es menor que el ángulo θ_1 , por lo que se deduce que el material 2 tiene mayor semejanza con el material de referencia que el material 1 (Lathrop, 2006), pero θ_2 debe ser más pequeño que un valor especificado de tolerancia (IISC, 2008).

Este método no es afectado por los factores de iluminación solar, en consecuencia, el ángulo entre los dos vectores no varía con respecto a la longitud de los vectores.

La fórmula matemática de SAM, tiene numerosas presentaciones según los autores que, a su vez, utilizan diferentes notaciones. Para el presente caso se utilizará la fórmula mencionada por Chuvieco (2002), y que se expresa como sigue:

$$\theta = \arcsin \frac{\sum_{k=1,m} ND_{i,k} ND_{j,k}}{\sqrt{\sum_{k=1,m} ND_{i,k}^2} \sqrt{\sum_{k=1,m} ND_{j,k}^2}}$$

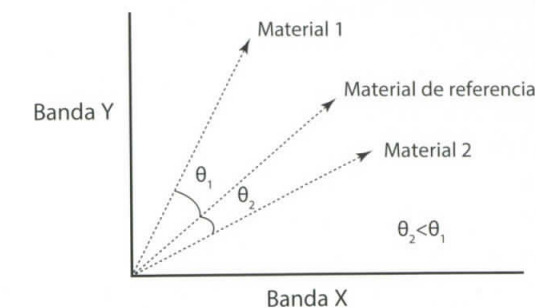


Figura 13. Representación esquemática de un clasificador angular.
Fuente: Lathrop, 2006.

Donde $ND_{i,k}$ es el valor del píxel i (el espectro objetivo) en una determinada banda k de la imagen, $ND_{j,k}$ el del espectro de referencia j en la misma banda, y m el número de bandas. Cabe aclarar que lo habitual para HSI es trabajar con valores de reflectancia pero, según explica el mismo autor, se utiliza ND porque estos pueden ser escalados de la forma que estime oportuno el intérprete, siempre que los dos vectores tengan las mismas unidades de medida.

Los resultados utilizando SAM proporcionan una buena aproximación para el mapeo del material espectralmente predominante en un píxel, sin embargo, la naturaleza raramente está compuesta de materiales simples y uniformes, configurándose, por el contrario, una mezcla espectral, cuyos componentes deben ser detectados espectral y espacialmente para su adecuada mapeación. Para la situación mencionada, se puede utilizar la técnica denominada Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME) o Linear Spectral Mixture Analysis (LSMA) en inglés.

Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME)

Es un hecho conocido que los píxeles individuales de una imagen de la superficie terrestre están constituidos por más de una clase de cobertura de la Tierra y que, cada clase contribuye a la respuesta espectral total de cada píxel (Shrestha, 2002). En consecuencia, el método ALME (Chuvieco, 2002) asume que la señal captada para un determinado píxel puede ser una mezcla de la reflectividad procedente de varias cubiertas, en función de la superficie que ocupan en ese píxel, y pretende calcular esas proporciones.

Para su implementación ALME parte de tres supuestos básicos: 1) la radiación recibida por el sensor desde cada clase de cubierta se restringe al ámbito de la parcela ocupada por ese píxel y, en consecuencia, considera que no está influyendo en la radiación reflejada la señal procedente de una cubierta vecina; 2) la radiancia global es proporcional a la superficie ocupada por cada cubierta, es decir, que no existe una cubierta que tienda a “ensombrecer” al resto, en la radiación final reflejada al sensor y, 3) existen firmas espectrales puras, válidas para toda la zona estudiada.

Si se aceptan estos tres supuestos, se puede asumir que la reflectancia de un determinado píxel con mezcla es una combinación lineal de la reflectancia característica de cada una de las cubiertas básicas (componentes puros, endmembers), en proporción equivalente a la superficie que ocupan, situación que se expresa en la siguiente fórmula (Shrestha, 2002; Resmini, 2005), desglosada por Chuvieco (2002):

$$\rho_{i,j,k} = \sum_{m=1,p} F_{i,j,m} \rho_{m,k} + e_{i,j}$$

Donde $\rho_{i,j,k}$ indica la reflectancia observada en el píxel i,j en la banda k ; $F_{i,j,m}$ es la proporción del componente m en el píxel i,j para cada uno de los p componentes puros; $\rho_{m,k}$ representa la reflectancia

característica de ese componente m en la banda k , y $e_{i,j}$ es un término del error residual asociado a la estimación de las proporciones en cada píxel i,j . En esta metodología, el punto crítico es la extracción de los componentes puros, para cuya solución se puede recurrir a los espectros de laboratorio o los almacenados en las espectrotecas disponibles.

Hay otros métodos para clasificar imágenes hiperespectrales entre los que se pueden citar el valor de la similitud espectral (SSV, Spectral Similarity Value) y análisis de absorción diferencial frente a la tendencia (Continuum removal). SSV (Homayouni y Roux, 2004; Lewis, Salvador y Gómez, 2005) es una medición que combina el coeficiente de correlación y la distancia Euclidiana, como se expresa en la siguiente fórmula:

$$SSV = \sqrt{d^2 + r^2}$$

Donde d es la distancia Euclidiana y r el coeficiente de correlación. La distancia Euclidiana mide principalmente la diferencia de brillo (brightness) entre dos vectores (un espectro se considera un vector), y el coeficiente de correlación compara la forma de dos espectros. Así, un valor pequeño de SSV, indicará que los espectros son más similares (Homayouni and Roux, 2004).

El método del análisis de absorción diferencial es importante porque además de considerar la longitud de onda promedio de las bandas de absorción, también analiza cuál es la intensidad de la absorción, que vendría dada por la “profundidad” o, lo que es lo mismo, la magnitud de la diferencia frente a la tendencia (unión de los valores máximos en los diferentes segmentos del espectro), así como su anchura y asimetría. Estos rasgos facilitan el análisis de un espectro desconocido, delimitando los detalles de gran interés para determinar sus propiedades biofísicas (Chuvieco, 2002).

En la Figura 14 se muestra un espectro específico de la vegetación, donde se observan una serie de bandas de clara absorción, centradas principalmente

en torno a las longitudes de onda de 0.46, 0.65, 1.4 y 1.9 μm , causadas, las dos primeras por los pigmentos (clorofila, xantofila, etc.) y las dos últimas por el agua.

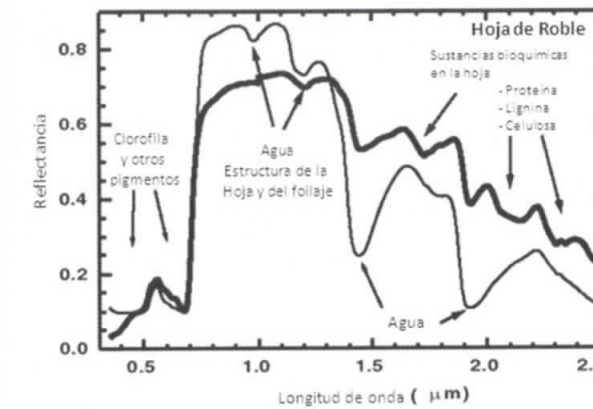


Figura 14. Reflectancia espectral obtenida en laboratorio, de una hoja fresca de roble (línea fina) y seca (línea gruesa). La reflectancia espectral de la hoja seca muestra la absorción característica de la proteína, lignina y celulosa en la región comprendida entre los 1.5 y 2.5 micrómetros.

Hay muchas otras técnicas para clasificar HSI, las que se pueden documentar en Homayouni y Roux (2004); Crósta, Sabine y Taramik (1996); Resmini (2005); Freeman (2003) y VanderMeer (2005).

Conclusiones

La imagen hiperespectral, compuesta por cientos de bandas contiguas, es el resultado de la combinación de tres tecnologías: imagen convencional, la espectroscopía y la radiometría, con la finalidad de producir imágenes que asocian la signature espectral con cada elemento espacial (píxel).

El cubo hiperespectral, es un método para visualizar, analizar y explotar los datos, ligando sus características espacial (x, y) y espectral (λ en z), con la posibilidad de generar, entre otras, las librerías o bibliotecas espectrales (espectrotecas).

Las firmas espectrales puras (endmembers) son el resultado de la aplicación de un espectroradiómetro en el laboratorio, sobre un material simple (puro)

y conocido. También se pueden obtener firmas características utilizando espectroradiómetros de campo, en áreas naturales o controladas y, desde las mismas imágenes. La colección de las firmas espectrales puras constituyen la espectroteca.

Hay actualmente numerosos programas con sensores hiperespectrales, cada vez más sofisticados, tanto en plataformas aéreas o satelitales, que aunados a las mejoras en la capacidad de procesamiento de la información y al desarrollo de algoritmos, auguran un aprovechamiento más eficiente de los HSI.

El procesamiento digital de datos hiperespectrales contempla, en general, tres pasos principales: la calibración de los datos de reflectancia, la reducción de la dimensionalidad de la imagen y la clasificación. La primera consiste en la corrección precisa de los efectos atmosféricos (dispersión y absorción) y por esa vía transforma la radiación medida por el sensor a valores de reflectancia, de tal manera que el espectro individual puede ser directamente comparado con los datos de campo y laboratorio que permita la identificación del material en estudio. La segunda, busca retener la mayor parte de la información original en un menor número de bandas, utilizando técnicas como el análisis de componentes principales y la fracción del mínimo ruido. La tercera, busca identificar y cuantificar los elementos presentes en la imagen, utilizando técnicas como el clasificador angular (SAM) y el Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME).

Aún cuando las imágenes hiperespectrales requieren de correcciones radiométricas y geométricas precisas y generan grandes volúmenes de datos, estas son una fuente valiosa y relativamente nueva de datos, para que los objetos y materiales (suelos, vegetación, minerales, etc.) puedan ser detectados, identificados, discriminados y cuantificados con mayor precisión.

Referencias bibliográficas

Addink, E.A., De Jong, S.M. and Pebesma, E.J. 2006. Spatial Object Definition for Vegetation Parameter Estimation from HyMap data. In Proceedings, "Remote Sensing: From Pixel to Processes", Enschede, The Netherlands, 8-11 may; p. 368-372.

Bakos, K. and Gamba, P. 2009. Potential of Hyperspectral Remote Sensing for Vegetation Mapping of High Mountain Ecosystems.

Baldrige, A.M. et al. 2008. The Aster Spectral Library Version 2.0. Pasadena, CA: JPL, 15p.

Bateson, C.A.; Asner, G.P. and Wessman, C.A. 2000. Endmember Bundles: A New Approach to Incorporating Endmember Variability into spectral Mixture Analysis. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, Vol 38, No.2, pp. 1083-1094.

Ben-Dor, E. The Remote Sensing and GIS Laboratory. Israel: Tel Aviv University. Available from Internet: <http://www.tav.ac.il/~rslweb/sils.html>.

Bohman, Stephanie. 2008. Hyperspectral Remote Sensing of Exposed Wood and Deciduous Trees in Seasonal Tropical Forests. En: Kalacika, M. and Sánchez-Ajofeifa (Ed.). Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Subtropical Forests. USA: CRC Press, p. 177-192.

Borengasser, Marcus; Hungate, W.S.; Watkins, R. Hyperspectral Remote Sensing: Principles and Applications. London: CRC Press, 119p.

Caetano, M. y Oliveira, T. 1998. The CNIG Digital Spectral Library. Lisboa: CNIG.

Chuvieco, Emilio. 2002. Teledetección ambiental. España: Ariel, 586 p.

Clark, R.N. et al. 2002. Surface reflectance calibration of terrestrial imaging spectroscopy data: a tutorial using AVIRIS. In: Proceeding of the 10th Airborne Earth Science Workshop, (JPL Publication 02-1).

Crósta, A.P.; Sabine, CH. and Tamanik. 1996. High-spectral resolution remote sensing for mineral mapping in the bodie and paramount mining districts, California. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 31, part B7. Viena, p. 161-166.

Dalponte, Michele et al. 2009. The Role of spectral Resolution and Classifier Complexity in the Analysis of Hiperespectral Images of Forest Areas. Remote Sensing of Environment, Vo. 113, p. 2345-2355.

Dias, N. Earth Observation Magazine Current Issues. 2002. Available from Internet: <http://www.eonline.com/common/currentissues/feb02/dias.htm>.

Elachi, C. 1987. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing. New York: Wiley Interscience.

Freeman, H. 2003. Evaluation of the use of hyperspectral imagery for identification of microseeps near Santa Barbara, California. 22p. Report-2 (master of Science in Geology). West Virginia University.

Gat, Nahum. 1999. Directions in Environmental Spectroscopy. Available from Internet: <http://www.techexpo.com/www/opto-knowledge/march99.pdf>

Gat, Nahum and Subramanian, Suresh. 1997. Spectral Imaging: Technology & Applications. En: Hyperspectrum Newsletter, Vol 3, No. 1, Available from internet: <http://www.techexpo.com/opto-knowledge/>

Gat, Nahum. 1998. Real Time Multi and Hyperspectral Imaging for Remote Sensing and Machine Vision. An Overview. An ASAE Meeting Presentation, Florida, 11 p. (paper No. 983027).

Gonzales, R.C. and Wintz, P. 1977. Digital Image Processing. Massachusetts (USA): Addison-Wesley, 431 pp.

Green, R.O. et al. 1998. Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Remote Sensing of Environment, vol. 65, P. 227-248.

Homayouni, s. and Roux, M. 2003. Hyperspectral image analysis for material mapping using spectral matching, 6p.

Indian Institute of Science-IISC. 2008. Hard classification techniques. Available from internet: <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/pape/TR-111/Chapter3.htm>.

Jia, X. and Richards, J.A. 1999. Segmented principal components transformation for efficient hyperspectral remote sensing image display and classification. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 27, No. 1, P. 535-542.

Kardeván, Péter. 2004. Reflectance Spectroradiometry. A New Tool for Environmental Mapping. In: Carpth J. of Earth Environmental Sciences. Vol. 2, No. 2, pp. 29-38.

Kruse, F.A. 1995. Imaging Spectrometer Data analysis – a tutorial. Pasadena, CA: JPL, 12p.

Kruse, F.A. 2003. Preliminary results-hiperspectral mapping of coral reef systems using EO-1 Hyperion, buck Island, U.S. Virgin Islands. In: 12 JPL Airborne Geoscience Workshop, 24-28 feb, Pasadena, California. 18 p.

Lathrop, R. 2006. Hyperspectral Remote Sensing. Available from internet: <http://www.crssa.rutgers.edu/courses/remsens.ppt/remensing-hyper.ppt>

Lewis, A.J.; Salvador, M.Z. and Gómez, R.B. 2004. Hyperspectral remote sensing of chemical and biological agents. USA, George Mason University, P. 1-13.

Liang, Shunlin. 2004. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. USA: John Wiley, 534 p.

Liu, X. et al. 2008. An improved MNF transform algorithm on hyperspectral images with Complex Mixing Ground Objects. In: Proceeding 2008 Congress on Image and Signal Processing, Vol. 3, P. 479-483.

Mazer, A.; Martin, M., Lee, M. and Solomon, J.E. 1988. Image processing software for imaging spectrometry data analysis. Remote Sensing of Environment, Vol. 24: 201-210.

Resmini, R.G. 2005. Hyperspectral imagery (HSI) dimensionality reduction. Available from internet.

Robles, C. et al. 2003. Proyecto Espectra. España: Universidad de Alcalá de Henares, Disponible en internet: <http://www.geogra.uah.es/~espectra/>

Roberts, D.A. et al. 1998. Mapping Chaparral In the Santa Monica Mountains using multiple endmembers spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, 65, pp. 267-279.

Schmidt, Karin S. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation Species Distribution in a Saltmarsh*.

Schmid, T. et al. 2004. A spectral library for a semi-arid wetland and its application to studies of wetland degradation using hyperspectral and multispectral data. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 25, No. 13, pp. 2485-2496.

Schott, John. *Spectral data adds a new dimension to remote imaging of earth*. Available from internet: <http://www.optoiq.com/index/photronics-technologies-applications/lfw-display/>

Schowengerdt, Robert A. 2007. *Remote sensing: models and methods for image processing*. USA: Academic press, 515 p. (Third Edition).

Shaepman, Michael E. 2009. *Earth system science related imaging spectroscopy – An assessment*. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, P. 5127-5137.

Short, Nicholas M. *Hyperspectral Remote Sensing; Imaging Spectrometers*. Available from internet: http://rst.gsfc.nasa.gov/sec13/sect13_5.html

Sobhan, I. 2007. *Species discrimination from hyperspectral perspective*. Available from internet: http://www.itc.nl/library/papers_2007/phd/sobhan.pdf

Su, J. and Shu, N. 2008. A dimensionality reduction algorithm of hyperspectral image based on fractal analysis. In: *the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and spatial Information Sciences*. Vol. 37, part B7. P. 297-302.

Van Der Meer, F. 2006. The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 8, No. 1, P. 3-17.

Voughan, P. 2001. *Estimación del contenido de humedad de la vegetación mediante espectroradiometría*. España, Tesis para optar al título de Doctor; Universidad Alcalá de Henares. 150 p.

Zomer, R.J.; Trabucco, A. and Ustin, S.L. 2009. Building spectral libraries for wetlands land cover classification and hyperspectral remote sensing. *Journal of environmental Management*, Vol. 90, pp. 2170-2177.

Voughan, P. 2001. *Estimación del contenido de humedad de la vegetación mediante espectroradiometría*. España, Tesis para optar al título de Doctor; Universidad Alcalá de Henares. 150 p.

Zomer, R.J.; Trabucco, A. and Ustin, S.L. 2009. Building spectral libraries for wetlands land cover classification and hyperspectral remote sensing. *Journal of environmental Management*, Vol. 90, pp. 2170-2177.

Micrositio del geoportal ICDE. Un avance para la consolidación del nodo de riesgo y emergencia ICDE

Microsite of Colombian spatial data infrastructure.

A step towards the consolidation of risk and emergency node

Óscar Mauricio Puentes¹

Resumen

Este artículo pretende realizar una primera aproximación a los intereses que enmarcan la comunicación entre la ICDE, la cabeza del sector de riesgos y emergencias UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos y Desastres) y las entidades que lo componen; fijando la trascendencia y provechos que brindan las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), en un contexto oportuno y de ventajas para la sociedad en general (sean productores o consumidores de información geográfica) por medio de el micrositio de riesgos y emergencias del geoportal ICDE.

La información geográfica tiene una influencia fundamental en la toma de decisiones, por eso la necesidad de garantizarle al sector de riesgos y emergencias un derecho y un deber en el marco de la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE) a través de medios como noticias, comunicaciones internas y externas, redes sociales, chats, etc., buscando evolucionar la comunicación y el trabajo en conjunto entre las partes con resultados más eficaces y colaborativos, ligados a estas dinámicas tecnológicas, pudiendo ser el primer progreso hacia lo que se denomina una Infraestructura de Datos Espaciales en enlace total con la UNGRD y las entidades correspondientes del sector de riesgo y emergencias, otorgándole a la ICDE en conjunto y con la totalidad del sector un papel comunicativo y receptivo, un rol protagónico para la construcción de la información y noticias en su propio espacio, permitiendo con esta dinámica un mayor acceso a las problemáticas actuales y a información en general para la toma de decisiones.

Palabras clave

Geoportal, riesgos, emergencias, comunicación, desastres.

Abstract

This article tries to make a first approximation to the interests that frame ICDE communication between the head of sector UNGRD risk and emergency (Unit National Risk and Disaster Management) and the entities that constitute it, setting the significance and advantages offered by Information Technology and the Communication (ICT) in an appropriate context and benefits for society in general (whether producers or consumers of GIS) through the microsite and emergency risk ICDE portal.

Geographic information is a fundamental influence on decision making, hence the need to guarantee to the field of risk and emergency a right and a duty under the Colombian Spatial Data Infrastructure (ICDE) through the news medias, internal and external communications, social networking, chatting and so on., seeking to develop communication and teamwork between the parties resulting in more effective and collaborative technology associated with these dynamics and can be the first progress toward what is called an Infrastructure Spatial Data UNGRD total binding and the relevant entities and emergency risk sector, giving the ICDE together with the whole sector and receptive communicative role, a leadership role for the construction of news and information their own space, allowing this dynamic better access to current issues and general information for decision-making.

Key words

Geoportal, risks, emergencies, communication, disaster.

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

Introducción

El acceso a la información se establece en un derecho propio de los individuos (internos y externos), y mucho más si se trata de información de carácter público y/o urgente. Este acceso posee características que la convierten en información que solo en algunas circunstancias puede ser restringida frente a los ciudadanos, quienes a su vez, son los protagonistas sobre todo en el ámbito de riesgos y emergencias, teniendo en sus manos el derecho y, más aún, el deber de realizar actividades de seguimiento y evaluación de las acciones del gobierno con las entidades.

Cada día contamos con un nuevo amanecer, permitiendo descubrir un mundo infinito de información, que a su vez, es procesada en nuestro cerebro, permitiendo analizar, descubrir, interpretar y tomar decisiones de acuerdo a lo que observamos. Los adelantos en tecnología han permitido que los datos y la información generen gran accesibilidad a diversos eventos en cualquier tema o materia. Esto, sumado a la gran red que es la Internet, comunicando a diario a la sociedad, hace necesario que se reflexione sobre esta tendencia y sobre cuáles son los mecanismos que se han de utilizar para lograr su desarrollo, en el sector del riesgo. Por ende surge la necesidad de actualizar y corregir nuestro micrositio.

A partir de la necesidad de conocer la disponibilidad de la información, en el caso de la UNGRD geográfica la idea es facilitar su acceso, el intercambio y el análisis, surgen estructuras tecnológicas como el nodo y su micrositio de gestión del riesgo y emergencias que permiten usar y manejar la información geográfica de diferentes fuentes así sean de riesgo y emergencias, sin importar su ubicación, implementando herramientas de visualización de datos espaciales, aplicativos y desarrollo orientados a catálogos de metadatos geográficos, y herramientas que les permitan realizar análisis espacial.

Argumentos

Los geoportales tienen la misión de ofrecer al usuario, de forma integrada y práctica, el acceso a una serie de recursos y servicios basados en información geográfica; resolviendo, en mayor medida, el problema de la conexión entre los productores (IGAC) de datos geográficos y los usuarios de información geográfica (en este caso la UNGRD), forjándose así, como la herramienta fundamental para los procesos de difusión de información.

La tecnología ha permitido que los datos y la información estén habilitados para gran número de usuarios en todo el mundo. Esto, adicionado a la gran red que es la Internet, haciendo necesario que se reflexione sobre esta tendencia y cuáles son los mecanismos que se han de utilizar para lograr su desarrollo, entendida como base también para el crecimiento económico y social de ambas partes.

Nuestro micrositio de gestión del riesgo y emergencias puede ser utilizado para agregar un conjunto de información geográfica. Este sitio está vinculado al sitio web principal (en este caso el geoportal ICDE). La mayor distinción entre este micrositio con su geoportal es su función específica comparado con el sentido más general del geoportal.

Esta herramienta favorece a la comunicación efectiva, directa entre el nodo y la entidad, permitiendo la creación y transferencia del conocimiento, pues la información resultante del análisis y la experiencia de los procesos puede ser transmitida y dispuesta a todos los usuarios.

Así mismo, al llegar a coordinar las acciones de la UNGRD con las implementadas por la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales, en los aspectos temático, sectorial, regional o local, se logra integrar en un marco de cooperación y comunicación coordinada con las demás entidades, el flujo eficiente de la información geográfica que permite, entre otros, el ahorro de tiempo, insumos y recursos.

Una de las ideas más claras es la de reunir las comunicaciones de los miembros del convenio IGAC-UNGRD, llevar archivos de documentos e informes que garanticen la difusión de toda la información entre los miembros del comité y del convenio.

Sin embargo, una acción trascendental sería favorecer la regulación de los procesos de planificación estratégica, territorial y sectorial en materias relacionadas con la información geográfica requerida.

La idea es que no solo se basen en asistir a las reuniones del comité, coordinar la intervención de los expertos que invite, ejecutar las acciones a que se comprometan y disponer lo necesario para que tanto el sector de gestión del riesgo como las instituciones que representan y que estén relacionadas con el convenio cumplan con los compromisos adquiridos.

Proponer proyectos para apoyar la ejecución y correcta implementación de las funcionalidades del micrositio y evaluar su desarrollo de manera periódica. Proponer al Comité de Coordinación políticas, lineamientos y estrategias para impulsar los proyectos de la ICDE.

Promover, a través del Comité Sectorial, el desarrollo e implementación de un sistema de gestión de información geográfica para que puedan acceder cada una de las entidades miembros del convenio.

De ahí a que cada miembro del Comité Sectorial estaría encargado de asesorar y apoyar las actividades del Comité de Coordinación y los proyectos de implementación a futuro.

Acciones a realizar en un micrositio correctamente implementado de gestión del riesgo y emergencias en el geoportal

- Realizar acciones que garanticen la adopción de procesos de gestión de información en las entidades miembros del convenio.
- Administrar el micrositio dispuesto para el comité en la página web de la ICDE.
- Impulsar las acciones de desarrollo institucional

que garantice su implementación en cada entidad miembro, e involucrar los compromisos y proyectos de la ICDE en sus planes para el sector.

- Organizar y gestionar publicaciones temáticas y científicas, incluyendo además directorios, sitios Internet, material promocional y distribuir los documentos apropiados a los miembros, individuos y organizaciones involucrados en el área de riesgo y emergencias.
- Proponer en función de publicidad en este micrositio, planes, programas y proyectos de investigación y capacitación para el desarrollo de la ICDE y asesorar en las que se adopten.
- Identificar las necesidades de capacitación en las entidades participantes y publicarlas para el adecuado desarrollo de los proyectos de la ICDE, proponerlas al Comité de Coordinación y promover la realización de los planes de capacitación adoptados.
- Definir los mecanismos para que cada uno de los representantes de las entidades, difunda, haga publicar los avances y conclusiones obtenidos en cada reunión de comité.

Categorización de contenidos en el micrositio de gestión de riesgos y emergencia

Como entidad cabeza y coordinadora del convenio, le compete rediseñar, actualizar los contenidos, e implementar el micrositio de gestión del riesgo y emergencias, tomando como base los contenidos e insumos existentes y los próximos a implementar.

En términos generales este espacio busca ofrecer herramientas de información, comunicación, actualización y georreferenciación de eventos que tengan que ver y que sean novedosos en el ámbito de riesgos y emergencias en el país.

Los propósitos específicos del micrositio

- Publicar materiales actualizados que den cuenta de temas relacionados con las emergencias actuales del país.
- Facilitar las acciones en cuanto a gestión, organización y capacitación de todos los entes colaboradores al convenio.

- Publicar las actividades de logística necesarias para llevar a cabo las reuniones y talleres programados, incluyendo la agenda de capacitación.
- Reconocer experiencias significativas y logros obtenidos por imágenes, noticias o artículos, a partir de la fecha y/o creación del convenio.

Resultados

En este sentido, el rediseño, ajuste, actualización e implementación del micrositio deberá responder a

los siguientes parámetros (Figura 1):

1. Análisis y diagnóstico del micrositio. Este deberá estar basado en los insumos entregados y en la situación actual del convenio.
2. Diseño de la arquitectura del micrositio. Deberá responder al diagnóstico de necesidades identificadas por las partes.
3. Diseño gráfico. Deberá ser mejorado (la explicación más adelante).



Figura 1. Ajuste y actualización del micrositio.

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Micrositio de gestión del riesgo y emergencias. <http://www.icde.org.co/web/riesgo-emergencia-2010>. Citado el 10 de Junio de 2012.

Conclusiones

Esta mecánica nos llevará a establecer una base nueva y moderna de geoportal ICDE con su sector (en este caso riesgo y emergencias), convirtiéndolo en una herramienta de expresión, de creación de ideas y debates; orientada a aumentar el avance no solo técnico, sino teórico, ideológico y filosófico del convenio, originando con ello una participación, y por ende una democratización de la información. Por lo anterior, la utilización de servicios Web 3.0 constituye un valor agregado en el portal de la ICDE y para sus micrositios, creando un canal de comunicación amplio, accesible y fácil de usar con herramientas vanguardistas que permitan la interactividad, consolidando así, una mayor participación de los usuarios, entidades y demás, permitiendo observar este servicio no solo como un conjunto de tecnologías, sino como algo mucho más eficiente en soluciones para el sector de riesgos y emergencias respecto al convenio establecido.

Por su parte, micrositios bien implementados garantizan la comunicación tanto interna como externa de los funcionarios, empleados y entidades que hacen parte de este convenio; facilitando la gestión de los proyectos a proponer, documentos, eventos, y demás actividades que se realicen.

4. Publicar las estrategias de capacitación a los servidores públicos, contratistas y demás entes del convenio.
5. Propuestas y varias estrategias de dinamización del sitio.
6. Plan de trabajo para la ejecución de cada una de las actividades.
7. Agregar iconos representativos y/o temáticos al acceso de la información documental.
8. Las herramientas colaborativas ocupan mucho espacio, se sugiere que sea un solo icono y que se pueda desglosar y actualizar.
9. Servicio de transferencia interinstitucional ocupa mucho espacio, este se podría reducir o ubicar dentro de los enlaces.
10. La sección de noticias debe llevar un icono que desglose noticias por años.

Referencia bibliográfica

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Micrositio de Gestión del Riesgo y Emergencias. <http://www.icde.org.co/web/riesgo-emergencia-2010>.

Innovación y tecnología. Una mirada a la política de investigación del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

Innovation and technology. A look at the research policy of the Geographical Institute Agustín Codazzi

Jaime Silva Herrera ¹ y Ángela María Guancha Moreno ²

“Una organización que aprende, es aquella que expande continuamente su capacidad para construir futuro. Es la integración de talentos y funciones, en una totalidad productiva”.
Peter Senge (1992).

Resumen

Dentro de los procesos misionales establecidos en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se han perfilado metas institucionales para el desarrollo de la ciencia y la tecnología que permiten visualizar la naturaleza, el flujo de los procesos y las interacciones entre los diferentes actores institucionales que conforman el sistema de investigación del IGAC, así como las relaciones con el medio externo. Esta estructura define y ubica la labor del Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF) y sus diferentes Grupos Internos de Trabajo (GIT) y particularmente la del Grupo Gestión del Conocimiento como elemento integrador de la actividad de investigación científica y tecnológica institucional.

Palabras clave

Política, investigación, innovación, TIC, desarrollo y difusión.

Abstract

Within the missional processes established in the Agustín Codazzi Geographic Institute (IGAC), the institutional goals are outlined for the development of science and technology, these goals allows visualize its character, the flow of processes and the interactions between different institutional actors that make up the IGAC research system, as well as the relations with the external environment. This structure defines and assigns the work of the Research and Development in Geographic Information Centre (CIAF) and its various internal working groups (GIT) and particularly the Group Knowledge Management as an integrator of the activity of scientific and technological research institutional.

Key words

Policy, research, innovation, information, technology and communication, development and dissemination.

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

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

Introducción

El papel de la investigación está centrado en la producción de conocimientos, transferencia y difusión, bajo las formas de investigación básica, aplicada, innovación y desarrollo tecnológico, haciendo énfasis en que los procesos de investigación deben ser articulados, participativos e interdisciplinarios. Estas categorías de investigación dependen de la existencia de colectivos formales institucionalizados que buscan desarrollar un potencial para responder a los procesos de investigación e innovación que son cada vez más complejos.

Las exigencias y la complejidad de la investigación demandan de la existencia de un sistema de gestión de la innovación y del conocimiento, que en el caso del IGAC es responsabilidad del GIT Gestión del Conocimiento como núcleo de apoyo en el proceso institucional de investigación a través de una gestión sistémica de las actividades de investigación, desarrollo y difusión³.

Este último se encarga de proporcionar herramientas de soporte para que la investigación y la innovación tecnológica se fortalezcan y se planifique con programas cuatrienales de investigación; articulando y apoyando la generación de ideas, la elaboración y sistematización de los perfiles de proyectos, el seguimiento y apoyo logístico y administrativo a la ejecución de proyectos, la coordinación de la elaboración de los planes de investigación, el apoyo metodológico a la formulación de proyectos de I+D+i, la consolidación progresiva y dirección del banco de ideas y proyectos, la coordinación del análisis de tecnologías y conocimiento generado, la coordinación del proceso de generación de patentes y su comercialización y la asesoría y apoyo logístico para la transferencia de tecnologías.

El Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, aprobado y actualmente en ejecución, contribuye al crecimiento económico y a la creación de empleo.

De dicho Plan se desprende la necesidad de construir y concertar unos lineamientos para una política de investigación e innovación en materia de cartografía, agrología, catastro, geografía y tecnologías geoespaciales para Colombia. Estos nuevos lineamientos darán lugar a los académicos, a los grupos de investigación, a actores gubernamentales y no gubernamentales la oportunidad de reflexionar acerca de los procesos, estructuras, capacidades y alcances de la producción de conocimiento, así como los retos y caminos que deben orientar su quehacer.

Así mismo proporcionará las herramientas para lograr la consolidación de los grupos de investigación como las unidades básicas, convirtiéndolos en el centro de la política de investigación del IGAC y los articuladores entre los resultados de investigación y el proceso de toma de decisiones.

La transferencia de los resultados de la investigación y la apropiación social del conocimiento, producto de la misma, están entre los principales retos que tiene que afrontar el país en la actualidad. Aunque hasta ahora se ha realizado un esfuerzo para que los planes de ciencia y tecnología se articulen con los planes de desarrollo, es necesario avanzar en la construcción de mecanismos que permitan la divulgación y uso de resultados por parte de diferentes actores que participan en los procesos de investigación: técnicos, políticos y sociales.

La regulación interna

Dentro del marco institucional, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a través del Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF) “contribuye, a

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones (2011, febrero). (TIC). Plan Vive Digital Colombia. Documento vivo del plan. Versión 1.0. [En línea], disponible en: http://vivedigital.gov.co/files/Vivo_Vive_Digital.pdf [Consulta: 14 de marzo de 2012].

partir de la interacción de sus grupos temáticos relacionados con la Geomática, a generar, actualizar, integrar, difundir, aplicar y compartir los resultados de sus proyectos; mediante la transferencia de conocimientos, la asesoría, la consultoría y la cooperación técnica; y dentro de su estructura funcional, en torno a la gestión de la información y el conocimiento, sirve como apoyo a los procesos de planificación y desarrollo integral del país y la región”⁴.

Bajo estos lineamientos se han aprovechado experiencias y avances logrados hasta ahora, al identificar las oportunidades del ambiente caracterizadas por un mayor uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), y las necesidades de uso de la información geoespacial en el contexto del desarrollo sostenible; para lo cual, la cooperación interinstitucional, los acuerdos de gestión y la estandarización de la información geográfica han sido fundamentales⁵.

De acuerdo con las funciones establecidas por el Decreto 208 de 2004, el CIAF cuenta con tres grupos temáticos en las áreas de: Sistemas de Información Geográfica y Análisis Espacial, Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas, Infraestructuras de Datos Espaciales y Gestión de la Información que a su vez, son articulados por el grupo de Gestión del Conocimiento, encargado de vincular la estructura de investigación, los nuevos modelos pedagógicos y las estructuras de difusión para contribuir a desarrollar capacidades institucionales y nacionales con la implementación de tecnologías orientadas a aplicaciones geográficas

⁴ Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Áreas estratégicas en Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica, CIAF. [En línea], disponible en: http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/AreasEstrategicas!/ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hHT3d_JydDRwN3t0BXAO_vUKMwf28PIwMzE6B8JG55T1MCur30o9Jz8pOA9oSDbMZvEkjeAAAdwNMCv39F1388jPzdVvyA3ojLYU9cRAKEQk4!/d13 [Consulta: 21 de marzo de 2012].

⁵ Ibid.

⁶ Ibid.

⁷ Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), (2010, septiembre). Manual de procedimientos. Investigación, desarrollo e innovación grupo interno de trabajo gestión del conocimiento en tecnologías geoespaciales. Versión 1.0, p5.

⁸ IGAC. Manual de procedimientos. Op.cit., p. 23.

como soporte a la toma de decisiones. El CIAF tiene la responsabilidad de colaborar para que el IGAC logre “consolidarse como la entidad gubernamental productora y proveedora de información geográfica básica digital de alta calidad necesaria para el desarrollo integral y sostenible del país” y de esta forma proveer el acceso a información geográfica básica⁶.

A través del Grupo Interno de Trabajo (GIT) Gestión del Conocimiento se pretende “establecer los procedimientos necesarios para orientar las acciones de investigación, desarrollo e innovación del IGAC y así, responder de forma efectiva a los requerimientos misionales, a las demandas de sus clientes y a las prácticas a nivel nacional e internacional”⁷.

Lo anterior se consolida en el manual de procedimientos “investigación, innovación y desarrollo” que busca su aplicación en todas las áreas del IGAC definiendo los lineamientos y políticas para realizar una investigación, que debe estar direccionada hacia los siguientes tipos:

- Investigación básica.
- Investigación aplicada.
- Investigación experimental.
- Proyecto de desarrollo tecnológico.
- Proyecto de innovación tecnológica⁸.

Métodos y procedimientos para el plan estratégico de investigación y desarrollo del IGAC

Dentro del Plan de Desarrollo del actual Gobierno a través del Ministerio de las TIC, es obligación de los organismos de orden investigativo del país buscar un esquema que se acople a las necesidades de cada área para promocionar la investigación. Para la realización de este proyecto se han definido tres formatos: el primero de ellos propone identificar los lineamientos institucionales sobre investigación, desarrollo e innovación en el marco del IGAC, cuyo contenido final se encuentra en el documento P14400-02-10V1 de 2010; el segundo,

que intenta definir un catálogo de indicadores que pueden concretarse en modelos de evaluación de las propuestas investigativas, documento P14400-02-10V1; y el tercero, proponer un mecanismo de integración de los indicadores subjetivos, a los que se hace referencia, en modelos de análisis de buenas prácticas, y que busca caracterizar los proyectos de formación, investigación y servicios virtuales que involucran las TIC y que deben abordarse desde la planificación y organización de la institución en el plan i+D+I 2012-2014, marco estratégico para el avance técnico-científico del IGAC.

El proyecto pretende construir propuestas que potencialicen la construcción de conocimiento y el trabajo colaborativo con todas las líneas y las áreas de conocimiento definidas por cada equipo, grupo o área de conocimiento del IGAC: Geografía y Cartografía (Estudios Geográficos

Básicos, Ordenamiento Territorial, Geodesia); Agrología (Laboratorio de Suelos, Clasificación de Suelos), Catastro (Avalúos), y grupos del CIAF en Sistemas de Información Geográfica y Análisis Espacial (SIG); Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas (PR), Infraestructura de Datos Espaciales (IDE); Planificación y Desarrollo Territorial, y de Gestión del Conocimiento.

A continuación se resaltan los aspectos fundamentales que sirvieron como antecedentes y/o puntos de partida para el emprendimiento de investigaciones-IGAC con el objetivo de unificar la metodología empleada por todas las áreas, además de orientar y adelantar de manera planificada las acciones y la ejecución de las actividades y trabajos de investigación, desarrollo e innovación. La puesta en marcha de la metodología parte de un diagrama de flujo (Figura 1) y de la explicación de cada una de las fases y actividades contenidas en el mismo⁹.

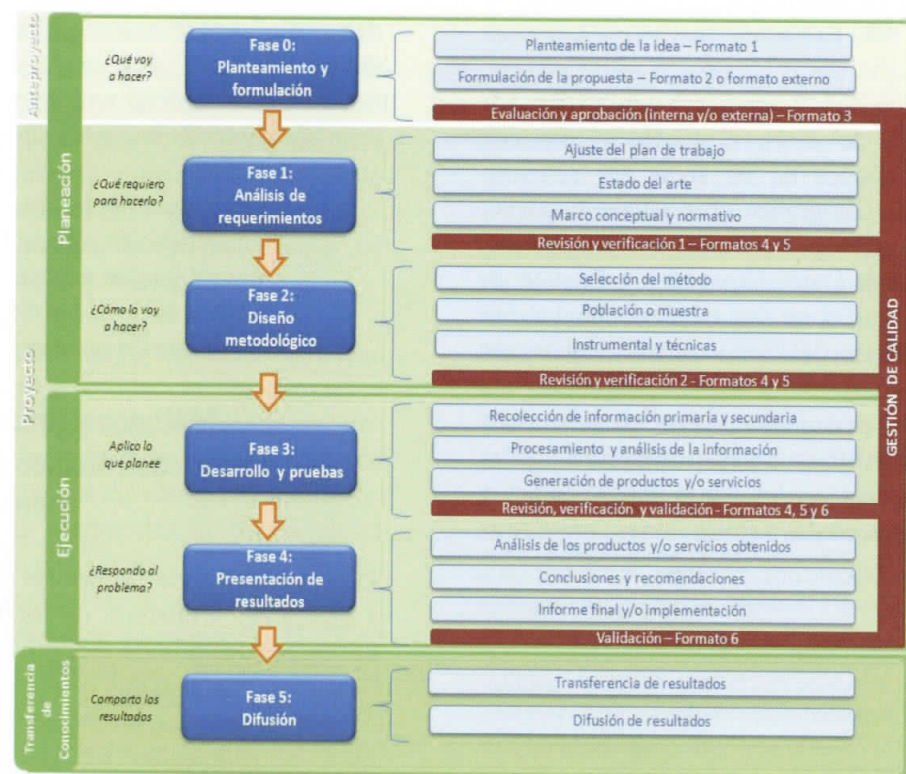


Figura 1. Fases del proyecto de investigación IGAC-2012.

Fuente: IGAC. Metodología investigación desarrollo, investigación. Código M14400-01/10. P6. Versión 1. Septiembre de 2010.

⁹ Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2010, septiembre). Metodología investigación desarrollo, investigación. Código M14400-01/10. Versión 1.0. p. 6.

Dentro de estas fases, la investigación debe ser entendida como un proceso sistemático, planificado, objetivo, original, técnico y científico que se da a través de tres etapas:

La primera, se considera la planeación, en la que se define qué se va hacer, con qué soporte conceptual se hará, qué se requiere para hacerlo y cómo se realizará. Una segunda etapa de ejecución, en la que se efectúan cada una de las actividades definidas en la planeación y se obtienen unos resultados que deben validarse a través de pruebas.

Con los productos y/o servicios generados en la etapa anterior se entra en la última etapa del proceso investigativo, la difusión; en ella, se elaboran materiales comunicativos (libros, artículos, videos, presentaciones, entre otros), y en los casos que aplique, se realiza una capacitación y/o transferencia de resultados, con el fin de difundir los conocimientos adquiridos.

Para la consecución de esta parte se deben tener en cuenta los siguientes subcontenidos que están directamente relacionados con metodología, investigación, desarrollo e innovación de 2010 Formato F12100-01/09.V6.

Elementos incluidos dentro de la investigación - IGAC

Los investigadores, los funcionarios y los contratistas deben inscribirse y actualizar permanentemente su hoja de vida en el sistema de información de Colciencias – CvLac, para así apoyar los procesos de transferencia del conocimiento basándose en las investigaciones desarrolladas, además de presentar los formatos (CvLac) dispuestos, debidamente diligenciados.

El investigador o grupo de investigadores asignados deberán mostrar un alto grado de conocimiento sobre el tema a investigar y realizar una planeación detallada sobre el desarrollo de toda la propuesta de investigación. En caso de requerirse, se podrán aplicar talleres de refuerzo en temas y metodologías de investigación para los interesados en el tema.

Se deberá seguir la metodología descrita en el presente documento, y presentar avances periódicos al desarrollo de la misma.

La redacción de los documentos deberá ser en forma clara, concisa y concreta, respetando la propiedad intelectual y considerando las normas técnicas vigentes para la presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación.

El contenido de los productos resultantes de las propuestas de investigación, desarrollo e innovación, deben cumplir con los requerimientos de la comunidad científica en general, de modo tal que puedan ser publicados en una revista indexada.

Para garantizar la calidad del proceso de investigación, desarrollo e innovación, se hace necesario que durante su desarrollo se lleven los registros que evidencien los requisitos del cliente (interno o externo), las revisiones, verificaciones y validaciones realizadas durante el proceso, así como un adecuado control de cambios.

Para evidenciar la adecuada planificación del proyecto, se deberá contar con una carpeta, análoga o digital, que debe contener la solicitud inicial del usuario.

Los elementos de entrada deben quedar registrados en el formato vigente de formulación de la propuesta de investigación, desarrollo e innovación.

Realizar sistemáticamente las revisiones según lo planificado, con el objetivo de evaluar la capacidad de los resultados para cumplir con los requisitos de seguimiento a los avances de la investigación. Su registro se hace en el formato vigente de revisión del proyecto.

Realizar las verificaciones necesarias para garantizar que los resultados en cada una de las etapas y fases de la investigación cumplan con los requisitos de los elementos de entrada. Las verificaciones se registran en el formato vigente del listado de verificación.

Validar la investigación de acuerdo con lo planificado para asegurarse de que el producto resultante es capaz de satisfacer los requisitos para su aplicación especificada o uso previsto, cuando sea conocido. Esta validación puede ser realizada tanto a nivel interno como externo, siempre y cuando sea antes de la entrega del resultado de la investigación.

Las validaciones deben quedar registradas en el formato vigente de listado de validación¹⁰.

Con base en los pasos, se considera la realización de las actividades enmarcadas en el Plan de Desarrollo 2011-2014 y las premisas contenidas en I+D+i, incrementando la actividad investigadora del IGAC en interacción con nuestro entorno socioeconómico. El documento reúne una política organizada alrededor de los siguientes aspectos:

Gestión institucional, planeamiento y gestión estratégica, fomento de la investigación, desarrollo e innovación; publicación y difusión, transferencia e innovación y financiamiento y cooperación. A esta política la acompañan sus respectivas estrategias y en su conjunto pretenden orientar el camino a seguir en el campo de la investigación durante los próximos cinco años, con el objetivo de hacer un centro de producción de conocimientos que responda a los retos del siglo XXI.

Diagnóstico de la política de fomento en investigación e innovación

En nuestro país en el siglo XX, se crea el Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas Francisco José de Caldas-Colciencias, adscrito al Ministerio de Educación. De igual forma, en este período se modernizan institutos públicos de investigación y universidades¹¹, que a su vez responden a esfuerzos internacionales en cabeza de la OEA y la UNESCO. A partir de ese momento, tuvieron lugar hechos importantes que repercutieron hacia la década de los ochenta, cuando se realiza el Foro Nacional sobre Ciencia y Tecnología organizado por Colciencias. Durante este evento, la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia propuso la elaboración de un proyecto de ley de ciencia y tecnología y se estableció la misión de ciencia y tecnología que

¹⁰ Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2010, septiembre). Metodología investigación desarrollo, investigación. Código M14400-01/10. Op. cit.

¹¹ Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas". Política I+D+i. [En línea], disponible en: http://www.madrimasd.org/Iberoamerica/Documentacion/informes/doc/COLOMBIA/Politica_I+D+i_Colombia.pdf [Consulta: 21 de marzo de 2012].

¹² Hoyos, N. y Posada E. (1996). Los estímulos a la investigación en Colombia. [En línea], disponible en: http://www.interciencia.org/v21_02/ciencia_tecnologia.html [Consulta: 28 de marzo de 2012].

inició sus actividades en 1989, que incluyó la Ley 29 y el Decreto 1767 de 1990 para el fomento de la actividad científica, y que reformó a Colciencias e inició la creación del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología. Con la Constitución Política de 1991 se establecen los artículos 70 y 71, que hacen alusión directa a la importancia de la ciencia y la tecnología para el desarrollo del país y a la obligación del Gobierno de apoyar a su desarrollo¹².

En el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010 se hace énfasis en la urgente necesidad de emprender acciones para un desarrollo social sostenido en que la pobreza, la desigualdad, la insuficiente cobertura y calidad de servicios de salud y educación, los altos índices de violencia, entre otros, se reduzcan drásticamente en los próximos años. En los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) se engloban de manera concreta estas preocupaciones incluyéndolas además como parte de un compromiso que ha hecho Colombia con la comunidad internacional. De otra parte, el esfuerzo que se haga para fomentar las actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) debe repercutir de manera contundente en el desarrollo económico del país. Por ello, el objetivo es que la CTI sea de manera efectiva la base de la Política Nacional de Competitividad, siguiendo así las recomendaciones del Consejo Nacional de Competitividad. La capacidad del sistema productivo para transformarse y enfrentar así a los competidores regionales y mundiales, depende de la innovación que se logre desplegar, generando así valor agregado en el portafolio nacional de bienes y servicios¹³.

En el año 2009 se elaboró un documento CONPES en el que se proponen seis estrategias que buscan incrementar la capacidad del país para generar y usar conocimiento científico y tecnológico a través de una política que define la financiación y la ejecución coordinada de las actividades en materia de ciencia, tecnología e innovación¹⁴. Dentro del desarrollo de

¹³ Organización para los Estados Iberoamericanos para la Educación la Ciencia y la Cultura (OEA). COLCIENCIAS. Documento base del Seminario Internacional sobre Política de Ciencia, Tecnología e Innovación. 2008. [En línea] disponible en: <http://www.oei.es/noticias/spip.php?article2367> [Consulta: 28 de marzo de 2012].

¹⁴ Departamento Nacional de Planeación (DNP). Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia (CONPES) 3582. Política nacional de ciencia, tecnología e innovación [En línea], disponible en <http://www.corpoica.org.co/sitioweb/Documento/SubAsistencia/L4.CONPES3582.pdf> [Consulta: 24 de junio de 2012].

estas estrategias se concibe la producción de nuevos conocimientos centrándose en la producción de conocimientos orientados en su aplicación y utilidad hacia la sociedad, la industria y el Gobierno con una estructura más flexible e interdisciplinaria y un interés eminentemente práctico y social. Por lo anterior, cabe resaltar que la investigación es una función sustantiva del IGAC y su importancia ha sido reconocida institucionalmente en los documentos de su misión, y en consecuencia, se establece una propuesta de la política de investigación.

¿Cómo lograr una política de investigación IGAC?

La actividad de investigación se debe organizar mediante la articulación de planes de desarrollo de la investigación, líneas de investigación, el trabajo de los grupos de investigación y el desarrollo de proyectos de investigación siguiendo el marco normativo, directrices que en materia de investigación se han establecido por el Estado colombiano a través del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – Colciencias y del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología.

Para cumplir este propósito se hace necesario planear, ejecutar, controlar y evaluar las actividades

relacionadas con la investigación en el IGAC. Por ello, desde la gestión a través del CIAF se impulsa su crecimiento como factor de desarrollo científico, tecnológico y cultural; se propende por una administración eficiente de los recursos, y se proyectan los servicios de investigación aplicada al sector social y productivo de las empresas, mediante la asociatividad y trabajo colaborativo, para lograr la visibilidad interna y externa y de impacto que demandan los actuales contextos de globalización.

La política institucional IGAC 2012, se estructura con base en tres núcleos, a saber: cultura investigativa, investigación básica aplicada y experimental, homologación con Colciencias e internacionalización de la investigación, las cuales se concretizan en seis estrategias (Figura 2). De los núcleos se entiende como los modos sujetos exclusivamente a la investigación científica ligada en principio a aspectos académicos, en cuanto a las estrategias que están soportadas hacia la consolidación de la investigación como la producción de conocimientos. Lo anterior cobija formas de investigación aplicada con énfasis en la acción que se encuentra dentro de los procesos misionales del IGAC, la capacidad de las dos formas de conocimiento no solo dependen de la competencia de los individuos sino también de las facilidades de hacerla efectiva, es decir, a través de la consolidación y puesta en marcha de las estrategias.

Política de investigación IGAC 2012

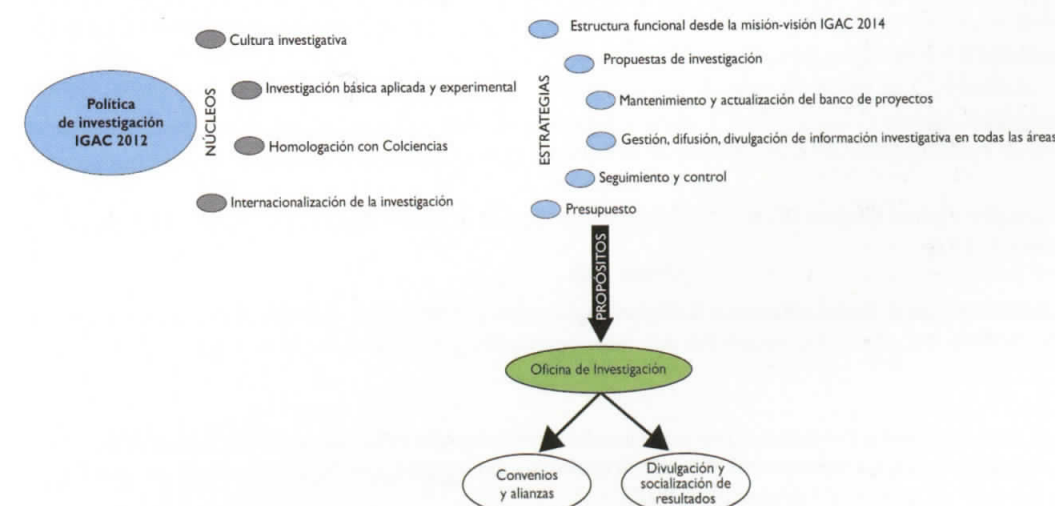


Figura 2. Política de investigación IGAC 2012. Fuente: Propia de la investigación, 2012.

Conclusiones

La necesidad de construir y concertar unos lineamientos para una política de investigación e innovación en materia de cartografía, agrología, catastro, geografía y tecnologías geoespaciales para Colombia hace generar un valor investigativo mediante una interacción permanente con los grupos de investigación integrados por el director, los funcionarios y los contratistas; esto con el fin de buscar la efectividad en la gestión de la actividad de investigación, desarrollo e innovación y así posibilitar el acceso a fuentes de financiación y a la integración social del conocimiento que se genera en estos grupos y de esta manera contribuir al desarrollo integral del país.

Esta política ha surgido gracias a la práctica desarrollada con los grupos de investigación en los últimos años y por lo tanto, incluyen instrumentos operacionales por medio de los cuales se aplican estos. Igualmente, la producción intelectual de los miembros de los grupos, o líneas y proyectos de investigación deben alcanzar mayores niveles de calidad en la clasificación de los Grupos de Investigación del ScientiCol de Colciencias para generar mayor oferta de conocimientos que se pueden transferir a la sociedad por medio del GIT Gestión del Conocimiento.

Referencias bibliográficas

Departamento Nacional de Planeación (DNP). Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia (CONPES) 3582. Política nacional de ciencia, tecnología e innovación [En línea], disponible en: <http://www.corpoica.org.co/sitioweb/Documento/SubAsistencia/L4.CONPES3582.pdf> [Consulta: 24 de junio de 2012].

Hoyos, N. y Posada E. 1996. Los estímulos a la investigación en Colombia. [En línea] disponible en: http://www.interciencia.org/v21_02/ciencia_tecnologia.html. [Consulta: 28 de marzo de 2012].

Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" Política I+D+I. [En línea], disponible en: http://www.madrimasd.org/Iberoamerica/Documentacion/informes/doc/COLOMBIA/Politica_I+D+I_Colombia.pdf [Consulta: 21 de marzo de 2012].

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Áreas estratégicas en Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica, CIAF. [En línea], disponible en: http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/AreasEstrategicas!/ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hHT3d_JydDRwN3t0BXA0_vUKMwf28PIwMzE6B8JG55T1MCur30o9Jz8pOA9oSDbMZvEkjeAAAdwNMCv39FI388jPzdVvyA3ojLYU9cRAKEQkc4!/dl3 [Consulta: 21 de marzo de 2012].

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2010, septiembre. Manual de procedimientos. Investigación, desarrollo e innovación grupo interno de trabajo gestión del conocimiento en tecnologías geoespaciales. Versión 1.0, 21 pp.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2010, septiembre. Metodología investigación desarrollo, investigación. Código M14400-01/10. Versión 1.0. 10 pp.

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones. (TIC). 2011, febrero. Plan vive digital Colombia. Documento vivo del plan. Versión 1.0. [En línea], disponible en: http://vivedigital.gov.co/files/Vivo_Vive_Digital.pdf [Consulta: 14 de marzo de 2012].

Organización para los Estados Iberoamericanos para la educación la ciencia y la cultura (OEI). Colciencias. 2008. Documento base del Seminario Internacional sobre Política de Ciencia, Tecnología e Innovación. [En línea], disponible en: <http://www.oei.es/noticias/spip.php?article2367> [Consulta: 28 de marzo de 2012].



Metodología para elaborar y actualizar Áreas Homogéneas de Tierras con fines catastrales

Methodology to develop and update Homogeneous Areas of Land for cadastral

Napoleón Ordóñez Delgado ¹, Ana María Palacino de Walteros ² y Jorge Hernán Londoño Ramos ³

Resumen

La delimitación de unidades de tierra que presentan características similares en cuanto a condiciones climáticas, condiciones de relieve y de material de origen, pretende apoyar de una forma rápida y efectiva la formación y actualización catastral de los predios rurales. Con la metodología desarrollada desde 1986 y actualizada en diferentes oportunidades por los grupos interdisciplinarios de la Subdirección de Agrología para elaborar y actualizar Áreas Homogéneas de Tierras con fines catastrales, se ha pretendido que muchos predios homogéneos en los parámetros previamente determinados puedan ser formados o actualizados de una forma eficiente y fácil, a partir de los levantamientos de suelos que a diferentes escalas existen en el país.

Palabras clave

Formación catastral, Áreas Homogéneas de Tierras.

Abstract

The delineation of land units with similar characteristics in terms of climate, topography and condition of the source material, is intended to support, in a fast and effective training and update cadastral rural properties. With the methodology developed in 1986 and updated in different opportunities for interdisciplinary work-groups from Agrology Department to develop and update Homogeneous Areas Land cadastral purposes, we have tried many homogeneous properties with previously determined parameters, can be formed or updated efficiently and easily from soil surveys at different scales existing in Colombia.

Key words

Cadastral formation, Land Homogeneous Zones.

¹ Subdirección de Agrología, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá (Colombia), nordonez@igac.gov.co - nordonez@unal.edu.co

² Subdirección de Agrología, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá (Colombia).

³ Subdirección de Agrología, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá (Colombia).

Introducción

La Subdirección de Agrología, encargada de hacer los inventarios de suelos de todo el país, desarrolló la metodología relacionada con la calidad de las tierras y la puso a prueba durante los años 1984 a 1986. Para ello fue necesario confrontar objetivamente los métodos utilizados hasta la fecha, mediante un procedimiento de análisis y selección de las variables a utilizar. Estos métodos fueron el método del Valor Potencial (VP) y el método del Índice de Productividad.

El método del Valor Potencial (VP) fue elaborado por Lafaurie (1946) y ha sido actualizado de acuerdo con los avances metodológicos y técnicos de los estudios de suelos. En la metodología (1986) se propuso que el valor potencial se utilizara únicamente como indicador de calidad en la clasificación de tierras con fines catastrales y no como factor de precio en la valorización de los predios rurales.

El método del Índice de Productividad fue elaborado por Ellis G. Knox (1976) y a pesar de estar fundamentado técnicamente, presentó dificultades en su aplicación por lo que hubo necesidad de establecer en 1986 una nueva metodología, la cual se ha venido perfeccionando de acuerdo a los avances tecnológicos y las experiencias de campo. La metodología pretende: Establecer los criterios para la revisión de las Áreas Homogéneas de Tierras con fines catastrales (AHT), involucrando los sistemas de información geográfica; lograr que las unidades de tierras delimitadas en cartas de cartografía básica a escalas apropiadas, generalmente 1:25.000, sirvan para la formación catastral y para posteriores actualizaciones del catastro y suministrar una herramienta que permita efectuar avalúos en forma masiva y rápida, de manera estandarizada y fácil, garantizando un buen grado de precisión.

Los avalúos en forma masiva y rápida solo son posibles si se delimitan espacios amplios de la superficie terrestre que involucren muchos predios pero que sean homogéneos en los parámetros previamente determinados y que estén relacionados con los factores del medio natural: clima, relieve y material litológico y/o depósitos superficiales. La interacción de estos parámetros debe dar como resultado, suelos similares en sus características y/o propiedades, las que se pueden cuantificar con valores numéricos.

Generalidades

La actualización de las áreas homogéneas de tierras con fines catastrales debe hacerse en los siguientes casos:

- Cuando se disponga de estudios recientes y exista desactualización de la simbología de acuerdo a la metodología presente.
- Al existir incumplimiento de alguno de los parámetros y/o variables de la presente metodología.
- Por solicitud expresa de las direcciones territoriales.
- Eventos excepcionales de la naturaleza tales como erupciones volcánicas, fallas y microfallas geológicas, erosión por movimientos en masa, cambio de curso de los ríos, inundaciones por época invernal, entre otros eventos que se generen por el cambio climático. En este caso se deben utilizar productos de sensores remotos (aerofotografías e imágenes de satélite) de fecha reciente.

Desarrollo

Parámetros para elaborar y actualizar áreas homogéneas de tierras

Los parámetros y variables de las condiciones climáticas, relieve y material litológico o depósitos superficiales y de las características y/o cualidades de los suelos que se tienen en cuenta para elaborar y actualizar áreas homogéneas de tierras con fines catastrales se presentan a continuación:

Condiciones climáticas

Como indicadores de las condiciones climáticas se seleccionaron la temperatura, la precipitación pluvial promedio anual y la distribución de las lluvias.

Pisos térmicos

En la región tropical la temperatura varía en función de la altitud, lo cual permite zonificar el país en pisos térmicos. Para la presente metodología se toma la clasificación de los pisos térmicos de la zonificación agroecológica: cálido, medio, frío, muy frío, extremadamente frío, subnival y nival (IGAC, 1985).

Por razones prácticas y con base en los trabajos de campo se hace una modificación en los climas frío y muy frío respecto a la zonificación IGAC 1985, sobre todo para las zonas próximas a la línea ecuatorial o que presentan condiciones orográficas especiales.

Zonas de vida

Se incluyen los principales elementos del clima como la temperatura, la precipitación y la humedad, por lo tanto estas se pueden utilizar como guía en la delimitación de las áreas homogéneas de tierras, interrelacionándolas con los pisos térmicos.

Constituyen un sistema de clasificación ecológica basado en la biotemperatura (°C), la precipitación total anual (mm) y la relación de evapotranspiración potencial (Espinal, 1977). Según la carta ecológica (Espinal, 1977) en Colombia se encuentran seis provincias de humedad y veinticuatro zonas de vida.

Las transiciones de zonas de vida se tienen en cuenta para el piso térmico y/o altitud del área homogénea de tierra a evaluar; para una mayor precisión se debe hacer uso de la información de las estaciones meteorológicas existentes en el área.

Unidades climáticas

Las unidades climáticas pueden abarcar una o más zonas de vida con características similares de humedad en consideración a que el uso y el manejo de los suelos son similares. Las condiciones de humedad en este caso se indican con las letras mayúsculas A (árido), M (muy seco), S (seco), H (húmedo), U (muy húmedo) y P (pluvial) precedidas de la letra o letras del piso térmico respectivo (Tabla 1).

En una unidad climática pueden presentarse variaciones locales en cuanto al uso de las tierras debido a la disminución o aumento de la humedad y la temperatura, ocasionando diferencias en la valoración de los predios con relación a la unidad principal. La cartografía de estas zonas transicionales se representan con la letra t minúscula, por ejemplo clima medio seco transicional al frío húmedo (MS t FH).

Estas transiciones se presentan por condiciones altitudinales o por fenómenos orográficos. Otro ejemplo de estas transiciones son el clima medio hacia el cálido o del medio hacia el frío, como en algunas zonas de la región cafetera, entre los 1.200 y 1.000 m. s. n. m. (MH t CS) o entre los 1.800 y 2.100 m. s. n. m. (MH t FH), (MU t FU). Los fenómenos orográficos se presentan en áreas de topografías bajas rodeadas de relieves altos que dan lugar a microclimas o áreas bioclimáticas especiales, ejemplo (MS t FH), (MH t FH).

Condiciones de relieve

En las Áreas Homogéneas de Tierras el relieve se evalúa por sus formas y por el grado de la pendiente, expresado en porcentaje. Su evaluación se relaciona con la facilidad o dificultad que se presentan en la mecanización o labores de las tierras.

En la mayoría de los estudios de suelos realizados antes de 1985, las delimitaciones cartográficas por pendiente se hacían en rangos compuestos

Tabla 1. Unidades climáticas

Pisos Térmicos Altitud Temperatura °C	Zonas de vida (Símbolo)	Precipitación Promedio anual mm	Unidad Climática	Símbolo
Cálido 0 - 1000 m. s. n. m. >24 °C	Matorral desértico Subtropical (md - ST) Monte espinoso Subtropical (me - ST)	< 500	Cálido árido	CA
	Bosque muy seco Tropical (bms - T) Bosque seco Subtropical (bs - ST)	500 - 1.000	Cálido muy seco	CM
	Bosque seco Tropical (bs - T)	1.000 - 2.000	Cálido seco	CS
	Bosque húmedo Tropical (bh - T)	2.000 - 4.000	Cálido húmedo	CH
	Bosque muy húmedo Tropical (bmh - T)	4.000 - 8.000	Cálido muy húmedo	CU
	Bosque pluvial Tropical (bp - T)	> 8.000	Cálido pluvial	CP
	Medio(**Templado) 1.0 - 2.000 m. s. n. m. 24 - 18 °C	Monte espinoso Premontano (me - PM)	250 - 500	Medio muy seco
Bosque seco Premontano (bs - PM)		500 - 1.000	Medio Seco	MS
Bosque húmedo Premontano (bh - PM)		1.000 - 2.000	Medio húmedo	MH
Bosque muy húmedo premontano (bmh - PM)		2.000 - 4.000	Medio muy húmedo	MU
Bosque pluvial Premontano(bp - PM)		> 4.000	Medio Pluvial	MP
Frio 2.000 - 3.000 m. s. n. m. *3.200 m. s. n. m. 18 - 11 °C	Bosque seco Montano Bajo(bs - MB)	500 - 1.000	Frio seco	FS
	Bosque húmedo Montano Bajo(bh - MB)	1.000 - 2.000	Frio húmedo	FH
	Bosque muy húmedo Montano Bajo(bmh - MB)	2.000 - 4.000	Frio muy húmedo	FU
	Bosque pluvial Montano bajo (bp - MB)	> 4.000	Frio Pluvial	FP
Muy frío (Páramo bajo) 3.000 - 3.600 *3.200 - 3.600 m. s. n. m. 11 - 8°C	Bosque húmedo Montano (bh - M)	500 - 1.000	Muy frío húmedo	mFH
	Bosque muy húmedo Montano (bmh - M)	1.000 - 2.000	Muy frío muy húmedo	mFU
	Bosque Pluvial Montano(bp - M)	> 2.000	Muy frío pluvial	mFP
Extremadamente frío (Páramo alto) 3.600 - 4.200 m. s. n. m. 8 - 4 °C	Tundra Pluvial Alpina (tp-A)	< 500	Extremadamente frío, húmedo	EFH
	Páramo Subalpino (p - SA)	500 - 1000	Extremadamente frío, muy húmedo	EFU
	Páramo pluvial Subalpino (pp - SA)	> 1.000	Extremadamente frío, pluvial	EFP
SUBNIVAL Y NIVAL > 4.200 m. s. n. m. - < 4 °C	Nival(N)		NIVAL	N

* La altitud varía localmente en las zonas próximas a la línea ecuatorial o por condiciones orográficas.

** El término "templado" se homologa al clima medio, no obstante, en la simbología y sistema de información se utiliza el símbolo "M" entre 1.000 - 2.000 metros de altura sobre el nivel del mar (m. s. n. m.).



Figura 1. Paisaje con diferentes pendientes, río de la Magdalena; departamento del Huila, límite entre los municipios de Elías y Salado blanco. Fuente: Archivo IGAC.

expresados por dos letras minúsculas, por ejemplo: ef, significa que se encuentran pendientes desde 25 hasta 75 %. En la presente metodología la pendiente se evalúa en rangos simples y las formas de relieve en simples y compuestas. Así mismo, cada rango de pendiente se constituye en un área homogénea diferente (Tabla 2). Un ejemplo de variación en la pendiente se observa en la Figura 1.

Tabla 2. Formas del relieve y grados de la pendiente

Formas simples	Formas compuestas	Gradiente pendiente en %	Símbolos
Ligeramente plano	Ninguna	Inferiores al 3	a
Ligeramente inclinada	Ligeramente ondulada	3 -7	b
Moderadamente inclinada	Ondulada o ligeramente quebrada	7 - 12	c
Fuertemente inclinada	Fuertemente ondulada o moderadamente quebrada	12 -25	d
Ligeramente escarpada	Fuertemente quebrada	25 - 50	e
Moderadamente escarpada	Moderadamente empinada	50 - 75	f
Fuertemente escarpada	Fuertemente empinada	> 75	g

Fuente: IGAC, 1996 (Modificado para AHT).

Condiciones del material litológico y/o depósitos superficiales

El material litológico superficial o de los depósitos superficiales alterados, constituye el material parental de los suelos del cual heredan la mayoría de las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas. Por lo tanto, en la conformación de las Áreas Homogéneas de Tierras se deben tener en cuenta su origen, su composición mineralógica y textura.

El origen de los materiales indica si los suelos se han desarrollado de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias o de materiales orgánicos o depósitos superficiales no consolidados (Figura 2) y de acuerdo con la clasificación de estas en subclases, grupos y tipos de rocas, se hace un análisis en interrelación con el clima y el relieve a fin de delimitar unidades de tierra con características similares.

En la actualidad, la Subdirección de Agrología del IGAC ha establecido para los estudios de suelos una clasificación jerarquizada de los materiales litológicos y depósitos superficiales que se tienen en cuenta en la delimitación cartográfica de suelos; se debe analizar esta información para utilizarla en la elaboración y actualización de las Áreas Homogéneas de Tierras con fines catastrales (Tabla 3).

Características y/o cualidades internas de los suelos y cálculo del Valor Potencial

De la interacción de las condiciones climáticas, relieve y material parental resultan las características y cualidades internas de los suelos tales como: textura de la capa arable, apreciación textural

del perfil, profundidad efectiva, drenaje natural y nivel de fertilidad, denominadas condiciones agronómicas.

Estas tienen que ver con la calidad de las tierras y por ende con el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas. Las condiciones agronómicas junto con las condiciones climáticas y de relieve expresan la capacidad productiva de las tierras, la cual se califica por medio del Valor Potencial (VP).

El Valor Potencial (VP) es un índice numérico utilizado para la valoración de las tierras con fines catastrales que procura representar su capacidad productiva con base en las características y propiedades agronómicas de los suelos, el clima y el relieve, este valor se calcula mediante la sumatoria de los puntajes establecidos para cada uno de los componentes de las condiciones agronómicas, relieve y climáticas, establecidos inicialmente por Lafaurie (1946) y que fueron modificados por la Subdirección de Agrología (1968). Al resultado se le restan puntos cuando algunas características y/o cualidades constituyen limitantes severos.



Figura 2. Material consolidado que constituye el material de origen de los suelos. Departamento del Huila, municipio Gigante.
Fuente: Archivo IGAC.

Puntajes relacionados con las condiciones agronómicas, de relieve y climáticas

Los puntajes fueron ajustados y adaptados con los indicadores que se presentan en esta metodología (Tabla 4).

Textura de la capa arable

Se hace por grupo textural y se determina para los primeros 25 centímetros de espesor. Si dentro de este espacio se encuentra más de un horizonte con diferente clase textural el puntaje será la sumatoria del resultado de la ponderación de la clase textural según el grosor de cada horizonte presente (Tabla 5).

Apreciación textural del perfil

La apreciación textural del perfil consiste en la ponderación de las clases texturales de todos los horizontes del perfil del suelo desde los 25 hasta los 100 centímetros de profundidad o hasta la roca, capas de fragmentos de roca o coraza petroférica (Tabla 5).

La evaluación de las clases texturales se hace en los estudios de suelos con el triángulo de clases texturales de los suelos (Figura 3).

Para la calificación de puntaje en los horizontes orgánicos, en lugar de las clases texturales, se tiene en cuenta el grado de descomposición del material orgánico y se hace su apreciación ponderada según la profundidad con los mismos parámetros de los suelos minerales (Tabla 6).

Profundidad efectiva del perfil

Está relacionada con restricciones para el crecimiento; se entiende como la máxima profundidad de enraizamiento. Se trabaja arbitrariamente desde la superficie hasta máximo 150 cm de profundidad. Todo impedimento físico y/o químico que se ubique entre estos límites, disminuirá tanto la capacidad de

Tabla 3. Material litológico o parental y depósitos superficiales

Clase	Subclase	Grupo	Tipo
ROCAS ÍGNEAS	PLUTÓNICAS	Félsicas con cuarzo >10 % y feldespatos	Granito alcalino (potásico) Granito Cuarzomonzonita Granodiorita
		Félsicas con cuarzo <10 % y feldespatos	Tonalita (Cuarzodiorita) Sienita alcalina (potásica) Sienita
		Intermedias con cuarzo < 10 % y feldespatos	Monzonita Diorita (Na) Gabro (Ca)
		Ultramáficas con cuarzo < 10 %	Peridotita
		Con cuarzo < 10 % y SIN feldespato	Dunita
	VOLCÁNICAS	Félsicas con cuarzo >10 % y feldespatos	Riolita (Ignimbrita) Cuarzolatita Riódacita Dacita
		Félsicas con cuarzo < 10 % y Feldespatos	Traquita
		Intermedias con cuarzo < 10 % y Feldespatos	Latita Andesita (Na)
		Máficas con cuarzo < 10 % y Feldespatos	Basalto (Ca) Diabasa
		Piroclásticas consolidadas	Tobas Aglomerados y brechas
ROCAS SEDIMENTARIAS	CLÁSTICAS (Detriticas)	Conglomeráticas	Ortoconglomerados Paraconglomerados Brecha Tilita
		Arenosas	Areniscas
		Limo - arcillosas	Limolitas Lutitas Shale Arcillolita Lodolitas Margas
	QUÍMICAS	CARBONATADAS	Caliza Dolomita
		Silíceas	Chert o lítica Diatomita Pedernal
		Fosfáticas	N.A.
		DINAMOTERMALES (Regional)	De bajo grado Pizarras Filitas Esquitos
ROCAS METAMÓRFICAS	DE CONTACTO	De Mediano grado Neis Anfibolita Serpentina	
		De alto grado Granulita Eclogita Migmatita	
		De bajo y alto grado Cuarzitas Mármoles Corneanas	
	DINÁMICAS	Sin flujo Microbrecha Cataclasita	
		Con flujo Milonita Filonita	
DEPÓSITOS SUPERFICIALES	ORGÁNICOS	Turba	N.A.
	CLÁSTICOS HIDROGÉNICOS	Cantos y gravas Arenas Limos Arcillas Mixtos	N.A.
	CLÁSTICOS GRAVIGÉNICOS E HIDROGRAVIGÉNICOS	Coluviones Lodos Lahares	N.A.
	CLÁSTICOS GLACIOGÉNICOS	Till Drift	N.A.
	CLÁSTICOS ANEMOGÉNICOS	Loess Arenas eólicas	N.A.
	PIROCLÁSTICOS NO CONSOLIDADOS	Cenizas Arenas Lapilli	N.A.

Tabla 4. Condiciones de las tierras y su puntuación máxima

Condiciones	Variables	Puntuación Máxima
Agronómicas	Textura de la capa arable	10
	Apreciación textural de perfil	15
	Profundidad efectiva del perfil	15
	Drenaje natural	10
	Nivel de fertilidad química	10
Subtotal		60
Relieve	Pendiente (< 3 %)	10
Climáticas	Precipitación, temperatura, distribución de las lluvias en las unidades climáticas	30
	Total	100

Tabla 5. Grupos texturales y puntajes para la capa arable y apreciación textural del perfil de suelos

Grupos texturales	Clases texturales	Puntos capa arable	Puntos apreciación textural
Texturas Gruesas	Arenosa y Arenosa Franca (A y AF)	2	3
Texturas Moderadamente Gruesas	Franco Arenosa (FA)	6	9
Texturas Medias	Franca, Franco Limosa (F,FL)	10	15
	Limosa (L)	3	5
Texturas Medianamente Finas	Franco arcillosa, Franco-arcillo-arenosa y Franco arcillo-limosa (FAr, FArA, FArL)	8	12
Texturas Finas	Arcillosa, Arcillo-arenosa y Arcillo-limosa (Ar, ArA, ArL)	7	10
Texturas Muy Finas	Arcillosa muy fina (Armf)	4	6

crecimiento como de almacenamiento de humedad en forma proporcional al espesor efectivo del suelo (Tabla 7).

Tabla 6. Puntajes para la capa arable y a través del perfil de suelos para los horizontes orgánicos según su grado de descomposición

Grado de descomposición del material orgánico	Puntaje capa arable	Puntaje a través del perfil (25 A 100 cm Profundidad)
Material sin diferenciar su estado de descomposición (O)	3	5
Oi	6	9
Oe	7	10
Oa	8	12

Oi: Material vegetal fibroso que a) Contiene ¼ o más de fibras por volumen, después de frotarlas y sin fragmentos gruesos, o b) Contiene 2/5 o más de fibras por volumen, después de frotarlas y sin fragmentos gruesos, y producen en una pasta saturada con pirofosfato de sodio sobre papel filtro un valor /croma 7/1, 7/2, 8/1, 8/2 o 8/3.

Oe: Material hémico que tiene un grado intermedio de descomposición y comprende los valores intermedios entre los materiales fibrosos y los sápricos.

Oa: Material de suelo que tiene muy pocas fibras, mayor densidad, menor contenido de agua, color gris oscuro o negro, y a) contienen 1/6 menos de fibras por volumen, después de frotarlas y sin fragmentos gruesos, b) producen en una pasta saturada con pirofosfato de sodio sobre papel filtro un valor /croma 6/2, 7/3.

Tabla 7. Clases de profundidad efectiva y puntajes

Clases	Profundidad en cm	Puntos
Muy Superficial	Menor de 25	2
Superficial	25 - 50	4
Moderadamente superficial	50 - 75	6
Moderadamente Profunda	75 - 100	9
Profunda	100 - 150	12
Muy Profunda	Mayor de 150	15

La profundidad efectiva puede estar limitada por:

- Horizontes o capas endurecidas.
- Coraza de hierro.
- Horizontes con acumulación de arcilla compactada.
- Capa cálcica.
- Nivel freático fluctuante.
- Fragmentos gruesos.

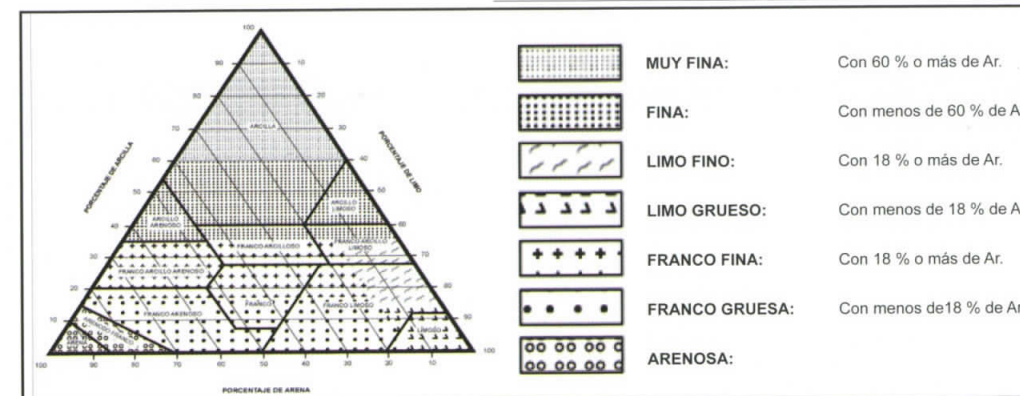


Figura 3. Clases texturales

- Presencia de sales.
- Presencia de sodio.
- Cambios abruptos de textura entre dos horizontes
- Elementos tóxicos (Aluminio >60 % o Selenio).

Drenaje natural

El drenaje natural se ha definido y clasificado con base en la rapidez o permanencia del agua en el suelo como resultado de la velocidad del drenaje externo e interno, indica el estado de saturación del suelo, total o parcialmente con agua. Este estado lleva asociado la existencia de condiciones de óxido-reducción, por lo tanto se califica por medio de estas huellas que aparecen en el perfil del suelo (colores grises y gley) producidas por el nivel freático fluctuante o por encharcamiento (Tabla 8).

Fertilidad química

Dentro de las condiciones agronómicas del suelo, la fertilidad química es una cualidad que permite evaluar la capacidad que tiene el suelo para suministrar elementos nutritivos a las plantas y se cuantifica en función de las características químicas pH, saturación de aluminio, capacidad catiónica de cambio, porcentaje de saturación de bases, bases totales, carbón orgánico (según el clima), fósforo disponible, potasio y cantidad de sales y/o sodio. La fertilidad se calcula por ponderación en los primeros 50 centímetros de profundidad del suelo. Los primeros 25 centímetros tienen un valor del 70 % y los segundos 25 centímetros el 30 %. Se

califica según la Tabla 9 y 9a, la apreciación de la fertilidad según la Tabla 10.

Cálculo de la fertilidad

1.- Fertilidad en suelos normales:

$$FT = (0.7F1 + 0.3F2)k$$

2.- Fertilidad en suelos salinos y/o sódicos:

$$FT = 0.7(F1K-X1) + 0.3(F2K-X2)$$

Donde:

FT: Fertilidad Total; F1: Fertilidad 0-25 cm; F2: Fertilidad 25-50 cm; K: 0.285; X1: Salinidad y/o sodio 0-25 cm; X2 Salinidad y/o sodio 25-50 cm.

Puntajes relacionados con las condiciones del relieve

En la Tabla 4 de puntuaciones máximas, al relieve con pendientes inferiores al 3 % se le asignan 10 puntos y en la Tabla 2 sobre las formas de relieve y grados de pendiente, la apreciación de esta se hace de acuerdo a los rangos. El cálculo del valor potencial se realiza utilizando la Tabla 23.

Puntajes relacionados con las condiciones climáticas

Los 30 puntos asignados en la tabla de puntuación general, se distribuyen en las unidades climáticas de acuerdo con la temperatura, la precipitación y la distribución de lluvias (Tabla 11).

Tabla 8. Clases de drenaje natural y puntajes

Clases	Características	Puntos
Excesivamente drenados o moderadamente excesivo	El agua se elimina del suelo muy rápidamente. Generalmente son suelos de texturas gruesas o muy gruesas, tienen alta conductividad hidráulica o muy superficiales, limitados por la presencia de roca y en pendientes fuertes pueden tener una combinación de las características citadas.	1
Bien drenados	El agua se elimina del suelo con facilidad, pero no con rapidez. El nivel freático es profundo o muy profundo, aunque puede permanecer dentro de los 100 cm de profundidad por periodos cortos de tiempo. Los suelos se encuentran libres de rasgos redoxi-mórficos. En regiones húmedas el agua está disponible durante toda la fase de crecimiento de los cultivos.	10
Moderadamente bien drenados	El suelo permanece húmedo por periodos cortos durante el año. Generalmente tiene una capa lentamente permeable, un nivel freático moderadamente superficial, fluctuante; recibe aguas de infiltración o presenta una combinación de estas condiciones.	8
Imperfectamente drenados	Los suelos permanecen húmedos por periodos prolongados durante la fase de crecimiento de los cultivos. Los colores grises y/o moteados ocurren entre los 50 y los 75 cm de profundidad. Los suelos generalmente tienen una capa poco permeable, un nivel freático alto, reciben agua adicional por infiltración o presentan una combinación de estas condiciones. Los cultivos mesofíticos están restringidos, a menos que se establezcan sistemas de drenaje.	2
Pobremente drenados	El suelo permanece húmedo desde la superficie, durante una gran parte del período de crecimiento de los cultivos que impiden su normal desarrollo. Hay colores grises y/o moteados entre los 25 y los 50 cm de profundidad. Esta clase de drenaje se debe a un nivel freático alto, la presencia de una capa poco permeable, la conductividad hidráulica lenta o a la combinación de estas condiciones.	0
Muy pobremente drenados	El agua se elimina tan lentamente del suelo, que permanece en la superficie o muy cerca de ella por largos periodos, en sectores de relieve cóncavo. Los rasgos redoxi-mórficos (predominio de colores grises en la matriz del suelo y/o de moteados) comienzan desde la superficie del suelo. En algunos sectores puede ocurrir vegetación hidrófita. La humedad excesiva impide el desarrollo de cultivos mesofíticos (aquellos que se desarrollan en ambientes intermedios entre seco y ácuico).	0

El cálculo del puntaje de la condición climática para las zonas transicionales se realiza con el valor promedio de las dos unidades climáticas involucradas.

Puntajes a restar

Cuando las unidades de tierra delimitadas como áreas homogéneas, presentan limitantes que

dificultan el uso normal de los suelos se califican con puntos negativos. Estos limitantes pueden afectar toda la unidad cartográfica como son: la pedregosidad y/o rocosidad superficiales, la erosión, la remoción en masa y las inundaciones o algunos de los componentes de la unidad como son los fragmentos gruesos en el perfil del suelo, y las sales y/o sodio.

Tabla 9. Tabla de la fertilidad

pH Agua 1:1	Rango	≤4.5; ≥8.5	4.6-5.0; 7.9-8.4	5.1-5.5; 7.4-7.8	5.6-6.0	6.1-7.3	
	Puntaje	1	2	3	4	5	
Saturación de Aluminio %	Rango	>60	60 - 30	29 - 15	14 - 5	<5	
	Puntaje	1	2	3	4	5	
Capacidad de cambio me/100g Ac NH 4 IN pH7	Rango	<5	05 - 10	11 - 15	16 - 20	>20	
	Puntaje	1	2	3	4	5	
Bases	Porcentaje Saturación	Rango	<10	10 - 35	36 - 50	51 - 70	>70
		Puntaje	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
	Totales meq/100g	Rango	<4	4 - 8	8.1 - 12	12.1-16	>16
		Puntaje	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Clima Frío	Rango	≤1.3	1.4-2.6; >10	2.7-4.0; 8.1-10	4.1-5.2; 8.0-6.6	5.3-6.5	
	Puntaje	1	2	3	4	5	
% Carbón Orgánico	Clima Medio	Rango	≤0.5	0.6-1.7 > 7.6	1.8-2.9; 6.5-7.6	3.0-4.1; 5.4-6.5	4.2-5.3
		Puntaje	1	2	3	4	5
Clima Cálido	Rango	<0.2	0.2-0.5	0.51-1.7	1.71-2.9	≥3.0	
	Puntaje	1	2	3	4	5	
Fósforo ppm BRAY II	Rango	<10	10 -20	21-30	31-40	>40	
	Puntaje	1	2	3	4	5	
Potasio meq/100g	Rango	<0.1	0.1-0.2	0.21-0.3	0.31-0.4	>0.4	
	Puntaje	1	2	3	4	5	

Tabla 9a. Sales y/o sodio para el cálculo de la fertilidad

dS/m = CE mmhos/cm a 25 °C	Saturación de sodio %	Clase	Puntos Negativo	
			0-25 cm (A)	25-50 cm (B)
<4	<15	N	0	0
4-8	<15	S1	1	0.6
8-16	<15	S2	2	1.4
>16	<15	S3	3	2
<4	>15	Na	5	4
4-8	>15	S1Na	4	3
8-16	>15	S2Na	5	5
>16	>15	S3Na	5	5

Tabla 10. Apreciación de la fertilidad y puntajes

Valores	Calificación	Puntaje
>8.4	Muy alta	10
8.3-6.8	Alta	8
6.7-5.2	Moderada	6
5.1-3.6	Baja	4
<3.6	Muy baja	2

Tabla 11. Unidades climáticas según la precipitación, la distribución de las lluvias y la temperatura

Unidad Climática	Símbolo	Zonas de Vida	Régimen pluviométrico, distribución de lluvias y temperatura	Puntos
Cálido árido	CA	(md- ST) (me-ST)	Monomodal. Deficiente durante todo el año, las temperaturas alcanzan con frecuencia más de 30 °C. No permite cultivos.	-15
Cálido muy seco	CM	(bms-T) (bs-ST)	Monomodal. Deficientes en los 2 semestres, las temperaturas alcanzan con frecuencia más de 30 °C. Permite ciertos cultivos.	-5
Cálido seco	CS	(bs-T)	Bimodal. Suficientes en un semestre y deficientes en el otro. Temperatura media alrededor de 27 °C	20
			Monomodal. Deficientes y/o escasas en el año. Temperatura media alrededor de 27 °C.	15
Cálido húmedo	CH	(bh-T)	Bimodal. Suficientes en los dos semestres. Temperatura media alrededor de 28 °C. Permite cultivos continuados.	30
			Monomodal. Suficientes un semestre y deficiente en el otro.	20
Cálido muy húmedo	CU	(bmh-T)	Monomodal. Excesivas en los 2 semestres. Temperatura media alrededor de 25 °C. Permite ciertos cultivos específicos.	10
Cálido Pluvial	CP	(bp-T)	Monomodal. Muy excesivas en los 2 semestres. Temperatura media alrededor de 25 °C. No permite cultivos.	-5
Medio Muy seco	MM	(me-PM)	Monomodal. Deficientes y/o escasas en el año.	10
Medio Seco	MS	(bs-PM)	Bimodal. Suficientes en un semestre y deficientes en el otro. Temperatura media alrededor de 20 °C	20
Medio húmedo	MH	(bh - PM)o	Bimodal. Suficientes en los dos semestres. Temperatura media alrededor de 21 °C. Permite cultivos continuos	30
Medio Muy Húmedo	MU	(bmh-PM)	Bimodal. Suficientes en los dos semestres. Temperatura media alrededor de 21 °C. Permite cultivos continuos	20
Medio Pluvial	MP	(bp- PM)	Bimodal. Excesivas en los dos semestres. Temperatura media alrededor de 22 °C. Permite ciertos cultivos continuados.	10
Frio Seco	FS	(bs- MB)	Bimodal. Suficientes en un semestre y deficientes en el otro. Temperatura media alrededor de 15 °C.	15
Frio Húmedo	FH	(bh - MB)	Bimodal. Suficientes en los dos semestres. Temperatura media alrededor de 16 °C. Permite cultivos continuados.	25
Frio Muy Húmedo	FU	(bmh- MB)	Bimodal. Suficientes en un semestre y excesivas en el otro. Temperatura media alrededor de 15 °C. Permite ciertos cultivos.	15
Frio Pluvial	FP	(bp- MB)	Bimodal. Excesivos en los dos semestres. No permite cultivos. Su uso es para regiones protectoras.	5
Muy Frio Húmedo	mFH	(bh - M)	Bimodal. Suficientes en los dos semestres. Temperatura media alrededor de 9 °C no permiten sino una siembra al año. Frecuentes heladas.	10
Muy Frio Muy Húmedo	mFU	(bmh- M)	Bimodal. Suficientes en un semestre y excesivas en el otro. Temperaturas alrededor de 9 °C. No permite cultivos.	5
Muy Frio Pluvial	mFP	(bp - M)	Monomodal. Excesivas en los dos semestres. Temperatura media alrededor de 9 °C. Permite ciertos cultivos específicos.	2
Extremadamente Frio Húmedo	EFH	(tp - A)	Monomodal. Excesivas todo el año. Temperaturas muy bajas inferiores a 8 °C. No admite cultivos.	-10
Extremadamente Frio Muy Húmedo	EFU	(p-SA)	Monomodal. Excesivas todo el año. Temperaturas muy bajas inferiores a 8 °C. No admite cultivos.	-10
Extremadamente Frio Pluvial	EFP	(pp- SA)	Monomodal. Excesivas todo el año. Temperaturas muy bajas inferiores a 8 °C. No admite cultivos.	-10

• Fragmentos gruesos

Los fragmentos gruesos están formados por pedazos rocosos de tamaño mayor a 2 milímetros denominados gravilla, cascajo, piedra, pedregones y lajas (Tabla 12). Estos se evalúan según la cantidad en porcentaje y por volumen como se indica en la Tabla 13, los puntos se suman cuando afectan todo el perfil hasta los 100 cm de profundidad.

Cuando no esté en el perfil del suelo el porcentaje, se tiene en cuenta la Tabla 14 de soporte en términos y rangos del manual de levantamiento de suelos del IGAC, según el modificador que describa el perfil.

Si la unidad cartográfica es una consociación, los puntos negativos se restan del puntaje total. En el caso de cualquiera otra unidad cartográfica tan solo afecta al suelo que contiene los fragmentos gruesos, si es difícil su separación como unidad de suelos o por fase.

Pedregosidad y/o rocosidad superficiales

La presencia de piedras (2 y 20 cm) o rocas (piedras mayores de 60 cm o lajas mayores de 38 cm) en la superficie dificulta el laboreo de las tierras de acuerdo al porcentaje de área cubierta. Las clases de pedregosidad o rocosidad y sus puntajes se presentan en las Tablas 15 y 16 y, afectan a toda la unidad cartográfica.

Erosión hídrica o eólica y remoción en masa

La erosión se valora en sentido vertical calificando la pérdida o adelgazamiento de la capa superficial del suelo y en sentido espacial mediante la apreciación, en porcentaje, del área que afecta la unidad de tierra. De las cuatro clases de erosión utilizadas en los levantamientos de suelos ligera (1), moderada (2), severa (3) y muy severa (4), únicamente se asignan puntajes negativos a las

clases ligera, moderada y severa, y la (4) se delimita como tierras Misceláneas Erosionadas (ME). Los puntajes se presentan en las Tablas 17, 18, 19, y afectan toda la unidad cartográfica.

Inundaciones y/o encharcamientos

En algunos tipos de relieve las inundaciones y encharcamientos frecuentemente dejan su huella o “firma” en forma de anomalías de humedad del suelo: zonas embalsadas, suelos removidos, vegetación perturbada, vegetación acuática y otros indicadores del área inundada, durante días o semanas después de que las aguas de inundación hubieren bajado. Este estado permanente o temporal de saturación de agua en el suelo que lleva asociado la existencia de condiciones de óxido-reducción afecta la capacidad productiva de las tierras y los puntajes a restar se presentan en la Tabla 20.

Además, la duración de estas inundaciones se tiene en cuenta porque perjudican el desarrollo de los cultivos. Las unidades se afectan con puntaje negativo (Tabla 21).

Tabla 12. Tipos y tamaños de los fragmentos gruesos

Tipo	Formas Irregulares (diámetro en cm)	Formas Planas (diámetro en cm)
Gravilla fina a media	0.2 – 2	N. A.
Gravilla gruesa	2 – 7.5	N. A.
Cascajo	7.5 – 25	N. A.
Piedra	25 – 60	38 – 60
Pedregón	> 60	> 60
Laja pequeña	N. A.	0.2 – 15
Laja grande	N. A.	15 – 38

Tabla 13. Clases de fragmentos gruesos en los primeros 25 cm y en el resto del perfil y puntajes

Contenidos en Fragmentos	Características	Puntos (Σ A+B)	
		0-25 cm (A)	>25 cm (B)
Muy favorable 15-35 % (gravilla, cascajo) 18-35 % escorias, lapilli y pumitas	Favorecen la aireación y la infiltración del agua a través del perfil en suelos que presentan grupos o familias texturales muy finas y finas (Ar, ArA, ArL) y, medias como la clase limosa (L).	7	7
Favorable < 15 % (gravilla, cascajo) <18 % escorias, lapilli, pumitas	Favorecen la aireación y la infiltración del agua a través del perfil en suelos que presentan grupos o familias texturales medianamente finas como FArL, FAr, FArA.	5	5
Desfavorable < 15 % (guijarros, piedras, pedregones y lajas)	Disminuyen el volumen efectivo de suelo para almacenar agua, nutrientes y para ser explorado por las raíces. Pueden dificultar el laboreo del suelo y el desarrollo de cultivos de raíz, tubérculo o bulbo.	5	4
Desfavorable 15-35 % (gravilla, cascajo, guijarros) 18-35 % escorias, lapilli y pumitas	Aumenta la velocidad de infiltración del agua a través del perfil; disminuyen el volumen de suelo efectivo, afectando la fertilidad y la retención de humedad. Pueden dificultar el laboreo del suelo y el desarrollo de cultivos de raíz, tubérculo o bulbo, en aquellos suelos que presentan grupos o familias texturales F, FL, FA, A, AF.	-8	-7
Desfavorable 35-60 %	Disminuyen el volumen efectivo de suelo para almacenar agua, nutrientes y para ser explorado por las raíces. Pueden dificultar el laboreo del suelo y el desarrollo de cultivos de raíz, tubérculo o bulbo.	-12	-7
Muy desfavorable >60 %		-15	-10

Tabla 14. Contenido de fragmentos en porcentaje y su término modificador de la textura

Clase	Por modificador de la textura	Contenido de fragmentos en % por volumen
Frecuente	Gravillosa, cascajosa, guijarrosa, lajosa, pedregosa.	15 - 35
Abundante	Muy gravillosa, muy cascajosa, muy guijarrosa, muy lajosa, muy pedregosa.	35 - 60
Extremadamente abundante	Extremadamente gravillosa, extremadamente cascajosa, extremadamente guijarrosa, extremadamente lajosa, extremadamente pedregosa piroclástica.	Mayor de 60

Tabla 16. Clases de rocosidad superficiales y puntajes

Clase	Área afectada	Puntos
Piedras y pedregones > 60 cm y lajas > 38 cm		
Sin problema aparente	<3%	0
Permisible	3-15%	-7
Desfavorable	15-35%	-30
Muy desfavorable	>35%	MR*

*MR: Misceláneo Rocoso.

Tabla 15. Clases de pedregosidad superficiales y puntajes

Clase	Puntos
NO PEDREGOSO Sin piedras, o con muy pocas piedras que no interfieren con el cultivo. Las piedras cubren <5 % del área.	0
LIGERAMENTE PEDREGOSO Piedras suficientes para interferir, pero no imposibilitar las labores requeridas para cultivos de arrancar. La pedregosidad cubre entre 5-15 % del área.	-7
MODERADAMENTE PEDREGOSO Piedras suficientes para imposibilitar las labores requeridas por los cultivos de arrancar, pero el suelo puede prepararse para siembra de cultivos permanentes o semipermanentes, forrajes o pastos mejorados. Las piedras cubren entre 15-35 % del área.	-10
PEDREGOSO El uso de maquinaria pesada es impedido por la presencia de piedras que imposibilitan las labores requeridas por los cultivos, pero el suelo puede prepararse para siembra de cultivos permanentes o semipermanentes, forrajes o pastos mejorados. Las piedras cubren entre 35-50 % del área.	-15
MUY PEDREGOSO El uso de toda maquinaria está imposibilitado. Puede utilizarse para pastos de corte o bosques. Las piedras cubren entre 50-75 % del área.	-30
EXCESIVAMENTE PEDREGOSO Superficie prácticamente pavimentada de piedras de difícil remoción. Las piedras cubren > 75 % del área.	MR*

*MR: Misceláneo Rocoso.

Tabla 17. Grados de erosión hídrica y puntajes

Clase	Características	Puntos
Erosión hídrica ligera	El suelo se va perdiendo casi en forma imperceptible. Se presenta como erosión de poca profundidad en erosión laminar, terracetos o pequeños surcos. Estos tipos de erosión o una combinación de estas, se encuentran presentes en menos del 25 % del área.	-7
Erosión hídrica moderada	Desprendimiento gradual de la(s) capa(s) más superficial(es) de suelo en un sistema de erosión que se profundiza. El suelo se va perdiendo en forma perceptible a simple vista o de fácil identificación en imágenes de percepción remota, son fácilmente separables en un mapa; pueden presentarse como erosión laminar profunda, pequeños surcos continuos o ramificados y en surcos más profundos asociados a zanjas o cárcavas, notoria presencia de terracetos o alguna combinación de estos tipos de erosión que afectan entre el 25-50 % del área y admite adicionalmente alguna remoción masal localizada y más pequeña que el área mínima de mapeo.	-15
Erosión hídrica severa	Desprendimiento evidente de la(s) capa(s) más superficial(es) de suelo en un sistema de erosión profundo. El suelo se ha perdido en forma perceptible a simple vista o de fácil identificación en imágenes de percepción remota, son fácilmente separables en un mapa; pueden presentarse como erosión laminar profunda o en gran extensión, pequeños surcos continuos o ramificados y en surcos grandes asociados a zanjas o cárcavas que afectan entre el 50-75 % del área y admite adicionalmente alguna remoción masal localizada y más pequeña que el área mínima de mapeo.	-30
Erosión hídrica muy severa o Misceláneo erosionado	Pueden presentarse como erosión laminar profunda y en gran extensión, surcos continuos o ramificados y en surcos profundos asociados a zanjas o cárcavas. Cualquiera de estos tipos de erosión o una combinación de éstas, se encuentran presentes en más del 75 % del área, y admite adicionalmente alguna remoción masal localizada y más pequeña que el área mínima de mapeo.	Son clase 13 (ME)

Tabla 18. Grados de erosión eólica y puntajes

Clase	Características	Puntos
Erosión Eólica ligera:	Cuando afecta menos del 25 % del área.	-7
Erosión Eólica moderada:	Cuando afecta entre el 25-50 % del área.	-15
Erosión Eólica severa:	Cuando afecta entre el 50-75 % del área.	-30
Erosión Eólica muy severa o Misceláneo erosionado:	Cuando afecta más del 75 % del área.	Son clase 13 (ME)

Tabla 19. Grados de Erosión por Remoción en Masa y puntaje

Clase	Características	Puntos
Ligera	Cualquiera de los tipos de erosión por remoción en masa (deslizamientos desplomes, desprendimientos, derrumbes, movimientos por deformaciones) o una combinación de estas en forma localizada o se encuentran presentes en menos del 25 % del área.	-10
Moderada	Cualquiera de los tipos de erosión por remoción en masa (deslizamientos desplomes, desprendimientos, derrumbes, movimientos por deformaciones) o una combinación de estas, se encuentran presentes entre el 25-50 % del área.	-18
Severa	Cualquiera de los tipos de erosión por remoción en masa (deslizamientos desplomes, desprendimientos, derrumbes, movimientos por deformaciones) o una combinación de estas, se encuentran presentes entre el 50-75 % del área.	-35
Muy severa o Misceláneo erosionado	Cualquiera de los tipos de erosión por remoción en masa (deslizamientos desplomes, desprendimientos, derrumbes, movimientos por deformaciones) o una combinación de estas se encuentran presentes en más del 75 % del área.	Son clase 13 (ME)

Tabla 20. Tipos de Relieve con susceptibilidad a encharcamiento y/o inundación

Tipos de relieve	Condiciones de saturación de agua del perfil del suelo (0 – 100 cm de profundidad)	Puntos
<ul style="list-style-type: none"> Abanicos Abanico deltaico Aplanamientos Campo de arena Campo de depresiones Campo de médanos Campo de lava Campo morrénico Colada de geliflujión Cumbre de artesas Cubeta sinclinal Delta Depresiones cársticas Estuario Glacis de acumulación 	<p>A nivel de Subgrupo</p> <p>Aquandic, Aqualfic, Aqueptic, Aquentic, Aquertic, Aquic, Fluventic, Fluvaquentic, Oxiaquic</p>	-7
<ul style="list-style-type: none"> Mesas, mesetas Llanura fluvio deltaica o Plano de desborde Plano de inundación Plano deltaico fluvio marino Plano de marea Plataforma costera lacustre Plataforma costera marina Playas Terraza Vallecitos Vallecito coluvial Vallecito coluvio aluvial Vegas 	<p>A nivel de Gran Grupo</p> <p>Con Episaturación o Saturación ántrica</p>	-12
	<p>A nivel de Gran Grupo</p> <p>Con Endosaturación</p>	-15

Tabla 21. Clase por duración de las inundaciones y/o encharcamientos y puntajes a restar

Clases	Características	Puntos
Corta	De dos (2) a siete (7) días	-3
Larga	De siete (7) a treinta (30) días	-5
Muy larga	De treinta (30) a noventa (90) días	-10
Extremadamente larga	De noventa (90) a ciento ochenta (180) días	-20
	Mayor a ciento ochenta (180) días	-25

Salinidad y sodicidad

Cuando los contenidos de las sales y/o sodio se encuentran reportados y delimitados en los estudios de suelos, se afecta el valor potencial con puntos negativos. El grado de afectación y su puntaje se presentan en la Tabla 22.

Cálculo del Valor Potencial inicial (VPi)

El Valor Potencial inicial (VPi) de cada suelo es igual a la suma de las puntuaciones correspondientes a las condiciones agronómicas y climáticas más 10

puntos por condiciones de relieve, considerando siempre el suelo con un relieve plano (pendientes menores del 3 %), menos la suma de los puntos negativos. Este valor se pondera según el porcentaje que ocupa en la unidad cartográfica obteniendo el valor potencial inicial definitivo.

Para obtener el Valor Potencial (VP) de los suelos en unidades de tierra con pendientes mayores del 3 % se hará uso de los valores de la constante K, que es la relación de un triángulo rectángulo de la altura (l) sobre la hipotenusa (h), (valor del seno) (IGAC, 1986).

Tabla 22. Grado de afectación por sales y/o sodio y puntajes

Clase	C.E.* mmhos/cm = dS/m	PSI* %	RAS* mmol/dm3	Características	Puntos
N	<4	<7	13	Suelos que no presentan ningún efecto salino y/o sódico sobre el crecimiento de las plantas.	0
S1	4 a 8	<15	<13	Suelos con leve efecto salino sobre el crecimiento de plantas, se puede identificar con la presencia del endopodón cálcico, sálico y por reconocimiento de horizontes Bk, Ck, Bkm, Ckm y Bzm; además presentan costras blancas en superficie.	-7
S2	8 a 16	<15	<13	Suelos con moderado efecto salino sobre crecimiento de plantas. Se pueden identificar con la presencia del endopodón cálcico, sálico y por reconocimiento de horizontes Bk, Ck, Bkm, Ckm y Bzm. Además presentan costras blancas en superficie.	-12
S3	>16	<15	<13	Suelos con alto efecto salino que causan disminución en el rendimiento de cultivos. Se pueden identificar con la presencia del endopodón cálcico, sálico y por reconocimiento de horizontes Bk, Ck, Bkm, Ckm y Bzm. Además presentan costras blancas en superficie.	-21
Ligeramente sódico	<4	7 a 15	>13	Suelos con leves efectos sódicos en los rendimientos de los cultivos.	-14
Na	<4	>15	>13	Suelos con altos contenidos de sodio, que causan degradación de estructura y dificultan el movimiento del agua. La dispersión de la materia orgánica en campo forman costras negras características.	-25
S1Na	4 a 8	>15	>13	Suelos con leve efecto salino y sódico sobre los cultivos.	-28
S2Na	8 a 16	>15	>13	Suelos con moderado efecto salino y sódico sobre crecimiento de cultivos.	-31
S3Na	>16	>15	>13	Suelos con alto efecto de sales que al lavarse se pueden convertir en Sódicos pocos cultivos rinden satisfactoriamente.	-35

*CE, Conductividad eléctrica; PSI, Porcentaje de Sodio Intercambiable; RAS, Razón de Adsorción de Sodio.

$$K = l/h$$

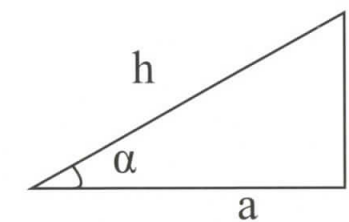
$$\text{Si, } l = 5, y, a = 100$$

El valor de h será:

$$h = \sqrt{a^2 + l^2}$$

$$h = \sqrt{100^2 + 5^2} = 100,12$$

$$\text{por lo tanto: } \text{seno } (\alpha) = 5 / 100,12 = K$$



que corresponde a una pendiente del 5 %. En la Tabla 23 se indican los valores de K para diferentes pendientes, el subíndice se refiere a la pendiente en porcentaje.

Tabla 23. Valores de K para el grado de pendiente (%)

K 3	=	0.03
K 7	=	0.07
K 12	=	0.12
K 25	=	0.24
K 40	=	0.37

Procedimiento

Para obtener el Valor Potencial de un suelo con pendiente conocida dentro de los rangos propuestos se procede en la siguiente forma: Al Valor Potencial inicial calculado (VPi), que siempre corresponde a un suelo con pendiente menor del 3 % (es decir, un terreno plano), se le resta el producto de VPi por el valor de K en la pendiente buscada.

El resultado corresponde al VP del suelo con dicha pendiente, es decir:

$$VP = VPi - (VPi \times K).$$

CLASES DE TIERRAS CON FINES CATASTRALES SEGÚN EL VALOR POTENCIAL

Las clases de tierras para catastro son grupos de unidades cartográficas que tienen el mismo rango de Valor Potencial (VP). En el intervalo de 1 a 100 puntos de valor potencial se han definido 13 clases de tierras (Tabla 24).

Tabla 24. Clases de tierras según el Valor Potencial (VP)

Clase símbolo	Rangos (VP) sobre 100 puntos	No. para expresar el rango	No. de color asignado (Leyenda)	Color asignado (digital)		
				Rojo	Verde	Azul
01	85-100	92	909	0	180	0
02	77-84	80	911	109	136	10
03	70-76	73	912	175	175	5
04	64-69	67	915	235	235	5
05	59-63	61	917	245	195	33
06	53-58	55	918	255	149	43
07	47-52	49	921	255	79	79
08	41-46	44	903	0	178	220
09	35-40	38	905	54	195	202
10	27-34	30	913	171	232	0
11	19-26	23	910	127	227	167
12	11-18	17	928	255	201	228
13	<11	6	956	223	191	255

Valor Potencial

Con el Valor Potencial obtenido de las condiciones climáticas, del grado de la pendiente (en %), de las condiciones agronómicas y de otros limitantes relacionados con el uso y manejo de los suelos (Figura 4), se obtienen las clases y subclases de tierras con fines catastrales.

SUBCLASES DE TIERRAS CON FINES CATASTRALES

Las subclases son divisiones dentro de las clases realizadas con base en las condiciones de clima, pendientes y limitaciones específicas para el uso y manejo de las tierras.

Subclase por clima

Son divisiones dentro de las clases de tierras de acuerdo con las condiciones climáticas, por ejemplo: CH = Cálido húmedo.

Además, si las unidades climáticas presentan variaciones importantes de humedad o temperatura que marcan diferencias en las cualidades de las tierras, se separan como zonas transicionales y se constituyen en subclases por clima, por ejemplo:

medio húmedo, transicional al frío húmedo (MH t FH).

Subclase por pendiente

Hace relación a la división de las clases según el rango de las pendientes: 0- 3, 3- 7, 7- 12, 12- 25, 25-50, 50- 75 y mayores del 75 % indicados con las letras a, b, c, d, e, f y g, respectivamente. Las formas de pendientes simples o compuestas se describen en la leyenda.

Subclase por erosión hídrica, erosión eólica y/o remoción en masa

Se refiere a divisiones de la clase según la actividad de los procesos de erosión y remoción en masa, característica que es necesario delimitar como una subclase, expresando el grado de afectación con las letras minúsculas (Ver Tablas 17, 18 y 19).

Subclase por limitantes específicos

Son subdivisiones de las clases de acuerdo con limitantes que influyen en el uso, manejo y degradación de los suelos; se consideran las siguientes variables y el orden de importancia y símbolo cartográfico se presenta en la Tabla 25.

Figura 4. Parámetros a tener en cuenta en el cálculo del Valor Potencial

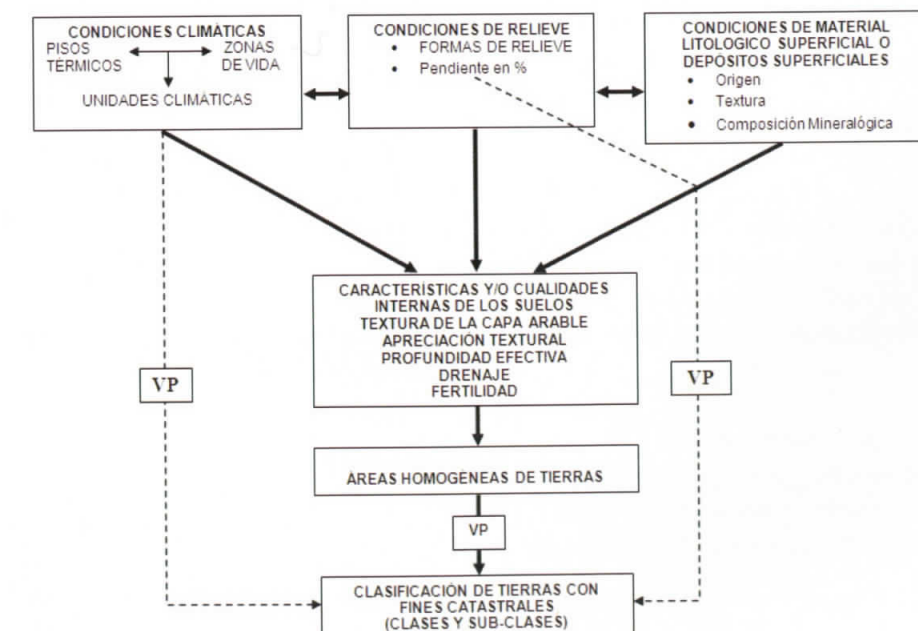


Tabla 25. Limitantes específicos

Descripción	Símbolo
Por erosión hídrica (moderada)	2
Por erosión hídrica (severa)	3
Por erosión eólica (moderada)	k2
Por erosión eólica (severa)	k3
Por remoción en masa (moderada)	m ²
Por remoción en masa (severa)	m ³
Por inundaciones	i
Por encharcamiento	E
Por fluctuación del nivel freático	h
Por profundidad efectiva (excepto por h, n y d)	s
Por profundidad efectiva limitada por horizontes denses	D
Por fragmentos gruesos en el perfil del suelo	q
Por pedregosidad superficial	p
Por rocosidad	r
Por sodicidad	n
Por salinidad	z
Por acumulación de yeso (CaSO ₄ 2H ₂ O)	y

Subclase por limitaciones de inundación

Las áreas sujetas a inundaciones o encharcamientos prolongados se ven reflejadas en el símbolo con el sufijo "ih" o "iE" o "E", ejemplo: 13CHaih6.

Observaciones

Cuando se conozca el nombre taxonómico de las inclusiones de las UCS, pero no se disponga del perfil modal, se califican los valores para su capacidad productiva de acuerdo con la clasificación taxonómica.

Los porcentajes de participación de los componentes taxonómicos y/o tierras misceláneas, varían cuando se separen nuevas delineaciones de áreas homogéneas de tierra en el proceso de fotointerpretación.

SÍMBOLOS UTILIZADOS PARA ELABORAR Y ACTUALIZAR LAS ÁREAS HOMOGÉNEAS DE TIERRAS CON FINES CATASTRALES

En los mapas, cada símbolo que identifica la unidad de tierra o Área Homogénea está conformada por números arábigos (01 - 13) que representan las clases, letras mayúsculas que indican la unidad climática, seguidas de letras minúsculas o números que señalan en primer lugar la pendiente y luego cualquiera de los limitantes específicos mencionados. El número de subíndices no debe ser más de cuatro.

Los símbolos utilizados para unidades climáticas transicionales se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26. Símbolos para unidades climáticas transicionales

Símbolo	Descripción
(CA t CM)	Cálido-árido transicional al cálido-muy seco
(CA t CS)	Cálido-árido transicional al cálido-seco
(CA t MM)	Cálido-árido transicional al medio-muy seco
(CA t MS)	Cálido-árido transicional al medio-seco
(CM t CS)	Cálido-muy seco transicional al cálido-seco
(CM t MM)	Cálido-muy seco transicional al medio-muy seco
(CM t MS)	Cálido-muy seco transicional al medio-seco
(CM t MH)	Cálido-muy seco transicional al medio-húmedo
(CS t MM)	Cálido-seco transicional al medio-muy seco
(CS t MS)	Cálido-seco transicional al medio-seco
(CS t CH)	Cálido-seco transicional al cálido-húmedo
(CS t MH)	Cálido-seco transicional al medio-húmedo
(CS t MU)	Cálido-seco transicional al medio-muy húmedo
(CH t CU)	Cálido-húmedo transicional al cálido-muy húmedo
(CH t MH)	Cálido-húmedo transicional al medio-húmedo
(CH t MS)	Cálido-húmedo transicional al medio-seco
(CH t MU)	Cálido-húmedo transicional al medio-muy húmedo
(CH t MP)	Cálido-húmedo transicional al medio-pluvial
(CU t MH)	Cálido-muy húmedo transicional al medio húmedo
(CU t MU)	Cálido-muy húmedo transicional al medio-muy húmedo
(CU t MP)	Cálido-muy húmedo transicional al medio-pluvial
(CP t MP)	Cálido-pluvial transicional al medio pluvial
(MM t MS)	Medio-muy seco transicional al medio-seco
(MM t MH)	Medio-muy seco transicional al medio-húmedo
(MM t FS)	Medio-muy seco transicional al frío-seco
(MS t MH)	Medio-seco transicional al medio-húmedo
(MS t MU)	Medio-seco transicional al medio-muy húmedo

Tabla 26. (Continuación)

Símbolo	Descripción
(MS t FS)	Medio-seco transicional al frío-seco
(MS t FH)	Medio-seco transicional al frío-húmedo
(MH t MU)	Medio-húmedo transicional al medio-muy húmedo
(MH t MP)	Medio-húmedo transicional al medio-pluvial
(MH t FS)	Medio-húmedo transicional al frío-seco
(MH t FH)	Medio-húmedo transicional al frío-húmedo
(MH t FU)	Medio-húmedo transicional al frío-muy húmedo
(MH t FP)	Medio-húmedo transicional al frío-pluvial
(MU t MP)	Medio-muy húmedo transicional al medio-pluvial
(MU t FS)	Medio-muy húmedo transicional al frío-seco
(MU t FH)	Medio-muy húmedo transicional al frío-húmedo
(MU t FU)	Medio-muy húmedo transicional al frío-muy húmedo
(MU t FP)	Medio-muy húmedo transicional al frío pluvial
(MP t FP)	Medio-pluvial transicional al frío pluvial
(FS t FH)	Frió-seco transicional al frío-húmedo
(FS t FU)	Frió-seco transicional al frío-muy húmedo
(FS t FP)	Frió-seco transicional al frío-pluvial
(FS t mFH)	Frió-seco transicional al muy frío-húmedo
(FS t mFU)	Frió-seco transicional al muy frío-muy húmedo
(FH t FU)	Frió-húmedo transicional al frío-muy húmedo
(FH t FP)	Frió-húmedo transicional al frío-pluvial
(FH t mFH)	Frió-húmedo transicional al muy frío-húmedo
(FH t mFU)	Frió-húmedo transicional al muy frío-muy húmedo
(FU t FP)	Frió-muy húmedo transicional al frío-pluvial
(FU t mFH)	Frió-muy húmedo transicional al muy frío-húmedo
(FU t mFU)	Frió-muy húmedo transicional al muy frío-muy húmedo
(mFH t EFH)	Muy frío-húmedo transicional al extremadamente frío-húmedo
(mFH t EFU)	Muy frío-húmedo transicional al extremadamente frío-muy húmedo
(mFH t EFP)	Muy frío-húmedo transicional al extremadamente frío-pluvial
(mFU t EFH)	Muy frío-muy húmedo transicional al extremadamente frío-húmedo
(mFU t EFU)	Muy frío-muy húmedo transicional al extremadamente frío-muy húmedo
(mFU t EFP)	Muy frío-muy húmedo transicional al extremadamente frío-pluvial

Otros símbolos, precedidos por el clima y la pendiente

Símbolo	Descripción
BA	Bancos de arena
BP	Bancos de playa
SL	Saladares
MN	Manglares
ME	Misceláneo erosionado
MR	Misceláneo rocoso
ZM	Zona minera a cielo abierto

Símbolo	Descripción
PN	Pantanos
FM	Fosas mineras
CL	Canteras/ladrilleras
RS	Rellenos sanitarios
EP	Explotación petrolera

Otros símbolos sin clima y pendiente

Símbolo	Descripción
ZU	Zona urbana
CA	Cuerpos de agua

LEYENDA

La leyenda definitiva se establece en el orden ascendente de las clases según el Valor Potencial de 01 a 13. La descripción se inicia con la localización del clima, luego del relieve indicando el rango de pendiente en porcentaje y en seguida las afectaciones por erosión, inundaciones o encharcamientos, pedregosidad o rocosidad, si las hay, luego se describen el material de origen de los suelos, las características agronómicas y los limitantes específicos.

El orden de descripción de las subclases va así:

- Del clima más cálido al clima más frío.
- De clima seco a lo más húmedo.
- De lo más plano (pendiente a) a lo más empinado o escarpado (pendiente g).
- Los limitantes específicos en el orden establecido.
- Ejemplo de descripción de las subclases se presenta a continuación:

LEYENDA
CUNDINAMARCA (MUNICIPIO DE UBALÁ)
ÁREAS HOMOGÉNEAS DE TIERRAS
CON FINES CATASTRALES

917

TIERRAS DE CLASE 05
SUBCLASE 05 FHa-61

Tierras localizadas en clima frío húmedo de relieve ligeramente plano, con pendientes inferiores al 3 %. Los suelos se han desarrollado a partir de cenizas volcánicas, depósitos sobre sedimentos aluviales y son: de texturas moderadamente gruesas y medias (FA, F), sobre medianamente finas (FAr, FArL), profundos, bien drenados y fertilidad química baja a moderada.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología, Grupo Interno de Trabajo Metodología para la Clasificación de las Tierras por su Capacidad de Uso (Clases Agrológicas). Levantamiento de Suelos. Bogotá. 2010.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología, Grupo Interno de Trabajo Levantamiento de Suelos. Metodología para los Levantamientos de Suelos. Bogotá. 2010.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Distribución geográfica de las sales solubles, sodio intercambiable y carbonato de calcio. Atlas de Suelos de la Región Caribe. Bogotá 1997.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Métodos y especificaciones para los estudios de suelos, evaluación de tierras y aguas. Jerarquización Geomorfológica. Bogotá 1993.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Tabla de fertilidad VP-02. Bogotá 1985.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi e Instituto Colombiano Agropecuario. Zonificación Agroecológica de Colombia. Bogotá 1985.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Metodología para la definición y avalúo de Zonas Homogéneas físicas. Subdirección Nacional de Catastro. Bogotá 1984.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Factores Zonas de vida o Formaciones Vegetales en Colombia. Bogotá 1977. 238 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Salinidad de suelos y calidad de aguas para riego. Bogotá 1979.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Índice de productividad de los suelos para valoración catastral. Bogotá 1976.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Tablas de clasificación de tierras y puntuaciones del valor potencial (VP) para estudios detallados y generales. Bogotá 1968.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Clasificación y valoración de tierras. Bogotá 1946.

903

TIERRAS DE CLASE 08
SUBCLASE 08 CUBq-44

Tierras localizadas en clima cálido muy húmedo, de relieve ligeramente ondulado con pendientes de 3 a 7 %, presentan fragmentos de roca en el perfil del suelo. Los suelos se han desarrollado a partir de depósitos clásticos hidrogravigénicos y son de texturas medianamente finas y finas (FAr, Ar), bien a moderadamente bien drenados, moderadamente profundos y superficiales limitados por pedregosidad superficial por sectores; la fertilidad química es alta a baja.

Referencias bibliográficas

NORMAS EDITORIALES

REVISTA *ANÁLISIS GEOGRÁFICOS*

La Revista es una publicación técnico-científica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, cuyos objetivos son:

1. Presentar los resultados de trabajos de investigación del IGAC y de diferentes entidades públicas, privadas, académicas y, en general, de aquellas relacionadas con el sector de la información básica, en su calidad de productoras y usuarias de los datos geospaciales del país.

2. Difundir los avances en proyectos de innovación y transferencia tecnológica de impacto institucional, nacional e internacional, con el fin de compartir experiencias y promover la generación de nuevo conocimiento sobre la producción y el acceso a la información geográfica como soporte a la toma de decisiones y el desarrollo sostenible.

La Revista *ANÁLISIS GEOGRÁFICOS* tratará temas relacionados con las siguientes disciplinas:

- Fotogrametría digital y producción de cartografía básica y temática.
- Geodesia y posicionamiento satelital.
- Agrología.
- Catastro, planificación urbana y regional.
- Geografía.
- Ordenamiento territorial.
- Restitución de tierras.
- Aplicaciones de la percepción remota.
- Gestión de información geográfica.
- Infraestructuras de datos espaciales.
- Estándares de información geográfica.
- Implementación de sistemas de información geográfica, análisis y modelamiento espacial.
- Desarrollo de aplicaciones SIG y servicios de web.
- Gestión ambiental basada en el uso de tecnologías geospaciales.
- Cambio climático.
- Nuevas tecnologías y nuevas aplicaciones.

Para ser incluidos en la Revista *ANÁLISIS GEOGRÁFICOS*, los artículos deben cumplir con los siguientes requisitos:

1. El texto debe entregarse en formato digital, utilizando tipo de letra Times New Roman, de 12 puntos, interlineado a espacio de 1,5 y en papel tamaño carta.

2. El número máximo de páginas de cada artículo es 30 para investigaciones científicas y tecnológicas; es de 20 cuando se trate de artículos de revisión, artículos de reflexión y avances de investigación. En ambos casos, el número máximo de páginas incluye tablas, figuras, fotografías, bibliografía, etc.

3. El texto debe ser organizado en la siguiente forma:

- **Título:** Debe reflejar el contenido en forma clara y concisa y no exceder las 15 palabras.
- **Nombre completo del autor y los coautores:** Incluyendo su dirección, entidad a la que pertenece y su correo electrónico. Con excepción de los nombres, toda la información adicional irá al pie de la primera página.
- **Resumen:** Debe describir brevemente los objetivos, métodos y los resultados más relevantes y no debe exceder de 250 palabras escritas en un único párrafo, sin punto y aparte.
- **Abstract:** El resumen traducido al inglés es copia fiel, idéntica del español, enunciado por enunciado.
- **Palabras clave (keywords):** Indicando los temas más relevantes que son tratados en el artículo. Esto facilita su clasificación y divulgación.
- **Introducción:** Debe contener la situación actual del problema, la revisión de los trabajos previos relacionados con él y los objetivos que orientan la investigación.
- **Contenido del artículo:** Los artículos que son producto de investigaciones deben incluir en esta sección los siguientes elementos:

- **Materiales y métodos:** Se deben describir de forma clara y concisa los materiales utilizados en el desarrollo del trabajo, además de las metodologías y procedimientos empleados en el tratamiento de los datos, de tal forma que otros investigadores puedan reproducir los resultados. Para clasificar los temas tratados se deben utilizar preferiblemente subtítulos para separar las subsecciones.

• **Resultados y discusión:** Se presentan los resultados siguiendo una secuencia lógica, con el apoyo de tablas y figuras, las cuales deben ser fáciles de leer e interpretar. Así mismo, deben citarse siempre en el texto. La discusión de resultados debe resaltar los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastándolos con los obtenidos en la literatura más actual correspondiente.

Los artículos que tratan sobre revisiones bibliográficas, ensayos, avances de investigación, etc., deben desarrollar los diferentes temas, utilizando subtítulos que permitan su clasificación e identificación.

• **Conclusiones:** En esta sección se mencionan los hallazgos más concluyentes de la investigación, además de un direccionamiento sobre futuras investigaciones.

• **Agradecimientos:** Si se considera necesario, se agradecen aquellas contribuciones determinantes en la concepción, financiación o realización de la investigación.

• **Referencias bibliográficas:** Se debe utilizar el estándar del ICONTEC para las citas y referencias bibliográficas.

4. Cuando se utilizan abreviaturas, el significado de ellas debe citarse en su totalidad en el momento de mencionarlas por primera vez en el artículo.

5. Las ecuaciones y fórmulas deberán presentarse en forma clara y nítida, de tal manera que no ofrezcan dificultad para su reproducción.

6. Las figuras (diagramas, dibujos, mapas), las fotografías convencionales y las imágenes de sensores remotos se deben entregar en archivos separados, especificando el formato (preferiblemente JPG o TIF), los aplicativos utilizados en su procesamiento y visualización. Todos los elementos mencionados serán numerados según el orden de aparición en el texto (Figura 1... Figura n). No se aceptarán más de dos figuras a color por artículo. En el caso de reducciones deberá tomarse en cuenta el tamaño de las letras y demás componentes (líneas, etc.), a fin de que sean legibles. Preferiblemente se sugiere utilizar escalas gráficas en vez de escalas numéricas.

7. Las tablas se entregarán en formato digital, indicando el formato y el aplicativo utilizado para su visualización. Su numeración debe realizarse

según el orden de aparición en el texto (Tabla 1... Tabla n). No se recomienda presentar los datos de forma tabular y gráfica a la vez.

Se recomienda a los autores prestar especial atención a la revisión gramatical y ortográfica, así como a la presentación, considerando que estas cualidades le dan categoría intelectual y seriedad académica a los artículos, denotando, además, equilibrio entre el contenido y la forma.

Otras consideraciones

- El idioma oficial de la revista es el castellano.
- Únicamente serán aceptados para publicación los artículos originales que no hayan sido ni vayan a ser publicados en otros órganos divulgativos, sin importar cuál sea su idioma.
- Es responsabilidad del autor obtener el permiso escrito para reproducir material que haya aparecido en otras publicaciones o que considere información restringida.
- Las opiniones expresadas en los artículos son de responsabilidad exclusiva de los respectivos autores.
- La Oficina CIAF es la dependencia del IGAC encargada de realizar las convocatorias de artículos para la revista *ANÁLISIS GEOGRÁFICOS*, lo cual no limita la iniciativa de otras áreas e instituciones interesadas en formular sugerencias y propuestas sobre temas relacionados con los objetivos de la misma.
- Los artículos para la revista *ANÁLISIS GEOGRÁFICOS* deben ser enviados a la jefatura de la Oficina CIAF, carrera 30 No. 48-51, Bogotá D. C., Colombia.
- Cada documento será sometido a un proceso de evaluación. El Comité Editorial del IGAC se reserva el derecho de sugerir modificaciones a los artículos y de establecer cuáles serán publicados.
- El Comité Editorial de la revista *ANÁLISIS GEOGRÁFICOS* acusará recibo de los originales e informará al autor sobre su aceptación y gestiones para la publicación.

De los artículos aceptados en la Revista *ANÁLISIS GEOGRÁFICOS*, se entenderá que su autor o autores le ceden a esta los derechos patrimoniales para su publicación en cualquier forma o medio (análogo y/o digital).

Conozca nuestros Productos

• Mayores informes en: www.igac.gov.co

• Contacto: comercializacion@igac.gov.co

Publicaciones Especiales



Mapa de Ruta Argollado

2009



Mapa de Ruta Hojas Individuales

2009



Geografía de Colombia

2011



Los Cañones Colombianos: Una Síntesis Geográfica

2007



Geografía para Niños

2005



Conceptos Básicos sobre SIG y Aplicaciones en Latinoamérica

1995



Los Ingenieros y la Geografía

2009



Geografía para Niños CD-Room

2009



Nombres Geográficos de Colombia Departamentos y Ciudades Capitales

2010



Modelo de Datos Urbano CS 2000

1996



Suelo para Niños

2008



Fundamentos Físicos de Teledecepción

2007



Análisis Geográficos

Varias Ediciones

Diccionarios



Diccionario de Topónimos y Términos Costeros de Colombia

1998



Diccionario de Gentilicios de Colombia

2008



Mapa de Fronteras Terrestres y Marítimas

2009



Mapa de Suelos de Colombia

2003



Mapa Departamentales de Colombia

2011

Planos Digitales de Bogotá



Planos Digitales

2003

Estudios de Suelos Departamentales



Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento Cauca

2009



Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento Guajira

2010



Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento Atlántico

2007

Mapas de Colombia



Mapa Físico Político de Colombia

2011



Mapa de Entidades Territoriales

2011

Revistas