



Biota Colombiana

ISSN: 0124-5376

biotacol@humboldt.org.co

Instituto de Investigación de Recursos
Biológicos "Alexander von Humboldt"
Colombia

Quiñones, Marcela; Vissers, Martin; Pacheco-Pascaza, Ana M.; Flórez, Carlos; Estupiñán
-Suárez, Lina M.; Aponte, César; Jaramillo, Úrsula; Huertas, Claudia; Hoekman, Dirk
Un enfoque ecosistémico para el análisis de una serie densa de tiempo de imágenes de
radar Alos PALSAR, para el mapeo de zonas inundadas en el territorio continental
colombiano

Biota Colombiana, vol. 17, núm. 1, julio, 2016, pp. 63-85
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos "Alexander von Humboldt"
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49148413005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Un enfoque ecosistémico para el análisis de una serie densa de tiempo de imágenes de radar Alos PALSAR, para el mapeo de zonas inundadas en el territorio continental colombiano

Time series analysis of the Alos PALSAR radar data using an ecosystem approach for the detection and mapping of flooded areas in Continental Colombia

Marcela Quiñones, Martin Vissers, Ana M. Pacheco-Pascaza, Carlos Flórez, Lina M. Estupiñán-Suárez, César Aponte, Úrsula Jaramillo, Claudia Huertas y Dirk Hoekman

Resumen

Se describe una metodología para la interpretación y procesamiento de imágenes de radar Alos PALSAR- de banda ancha (WB) y de polarización (HH), para la detección de inundaciones a 100 m de resolución. Los efectos de “sal y pimienta” o *speckle* pueden ser disminuidos con filtros y las pendientes y otras distorsiones geométricas típicas del radar deben ser corregidas apropiadamente antes de cualquier análisis o clasificación. Las interacciones físicas de las ondas de radar, de banda L, con la superficie terrestre, permiten detectar y clasificar inundaciones a cielo abierto y bajo dosel con gran precisión. El análisis de una serie de tiempo de 29 mosaicos de imágenes de radar (WB) sobre el territorio colombiano, comprendidas entre 2007 y 2011, permitió generar 29 mapas de inundación con observaciones de inundación máxima y mínima, ya que se incluye años climáticos extremos en los que se registraron los fenómenos de El Niño y La Niña, haciendo de esta ventana temporal una muestra representativa o línea base. La interpretación y el procesamiento de las imágenes se hacen utilizando una aproximación ecosistémica que implica el uso de un mapa de estructura de vegetación para la corrección de las detecciones de inundación de radar. Estos se compilan en un mapa único de frecuencias de inundación, en el que cada pixel indica el número de veces que fue detectado como inundado durante el tiempo de observación. Este mapa constituye un insumo para la delimitación de humedales y los tipos de humedales. El mapa de estructuras de vegetación utilizado se realizó también usando imágenes de radar Alos PALSAR pero de tipo fino (FB). Se utilizó una leyenda LCCS (Land Cover Classification System) de FAO para la descripción de los tipos estructurales de vegetación. Se realizó una validación para los mapas finales utilizando una aproximación estratificada al azar, en 19 ventanas de estudio repartidas en todo el territorio nacional.

Palabras clave. Inundación bajo dosel. Mapa de frecuencias de inundación. Mapas de inundación. Mapeo de tipos de humedales. Series de tiempo.

Abstract

This article describes a methodology for the interpretation and the processing of wide beam Alos PALSAR Images (WB) of HH polarization, for the detection of flooding areas at 100m resolution. Speckle has to be filter as well as other typical radar geometrical distortions need to be corrected before any classification procedures. The physical interactions between the L band radar waves and the land surface allows the detection of open sky flooding and floods under the canopy. The analysis of a time series of 29 radar (WB) mosaics, covering all the continental Colombian territory, allowed the classification of 29 flooding maps, along an observation window of 5 years from 2007 to 2011, comprising years of extreme climatic variations and consecutive El Niño la

Niña events, making of this time a good baseline for flooding studies. The interpretation and the processing of the WB radar images is done following an ecosystemic approach that includes the use of a forest structural map for the correction of the flooding detections. The resultant flooding maps are compiled in a single flood frequency map, in which every pixel indicates the number of times that the pixel was detected as flooded within the 29 flooding maps. This flood frequency map was used as an input for the evaluation of the wetland map at national level, and for the delineation of wetland ecosystems. The vegetation structural map used for the flooding analysis was also created with radar images but of the fine beam, Alos PALSAR-FB, polarizations (HV) and (HH). The LCCS (Land Cover Classification system) of the FAO was used to describe the structural vegetation types. A validation procedure was applied to both maps following a random stratification method over 19 windows distributed along the National territory.

Key words. Dense time series. Flood frequency mapping. Flood Maps. Flooding under the canopy. Mapping of wetland types.

Introducción

Los sistemas de clasificación de humedales que se usan a nivel internacional (Cowardin *et al.* 1979, Semeniuk y Semeniuk 1995, Secretaría de la Convención de Ramsar 2004) utilizan la combinación de parámetros biofísicos para la definición de los diferentes tipos de humedales tales como la geomorfología, el tipo de suelos, los regímenes de inundación y el tipo de vegetación. Colombia cuenta con cartografía de geomorfología y suelos (Igac 2014) y de vegetación (Ideam 2007); información espacial sobre la extensión y la duración de las inundaciones es un insumo espacial necesario, que hasta la fecha no ha estado disponible para el país, a nivel nacional. Para responder a este vacío de información se evaluaron diferentes tipos de sensores remotos o imágenes de satélite que podrían dar la información necesaria. Desde el punto de vista de los sensores remotos, las inundaciones a cielo abierto y los cuerpos de agua pueden ser detectados con imágenes ópticas tales como las imágenes LandSAT o las imágenes MODIS, sin embargo la detección de áreas inundadas bajo dosel de bosque son difícilmente detectadas por estos sistemas y requiere el uso de sistemas de tipo activo como los sistemas de radar. Por esta razón y considerando la capacidad del radar banda L en la detección de inundaciones tanto en bajo dosel como a cielo abierto (Hess *et al.* 1990, 2003), se analizó una serie de tiempo de imágenes de radar Alos PALSAR de la agencia espacial JAXA, de tipo de banda ancha (WB) con polarización (HH), a nivel nacional en el periodo comprendido entre 2007 y 2011.

En este artículo se presenta la metodología y los resultados del análisis de una serie de tiempo de imágenes de radar Alos PALSAR-WB, para generar un mapa de frecuencias de inundación, que provee información sobre la extensión máxima y la intensidad de las inundaciones, que responde a las necesidades de información para análisis para la definición de humedales.

Anteriormente se han generado mapas de inundación utilizando imágenes de radar (Hess *et al.* 1990, 1995, 2003, Henry *et al.* 2006, Horrit *et al.* 2001) usando diferentes aproximaciones técnicas para la interpretación y la clasificación de imágenes. Lo innovador de la metodología presentada en este artículo es la aproximación ecosistémica al análisis y clasificación de las imágenes de radar, que involucra el uso de un mapa de estructuras de vegetación, con leyenda LCCS (Land Cover Classification System) de la FAO (Di Gregorio y Jansen 2000), como apoyo a la clasificación de la inundación y a la clasificación de los tipos de humedales. Adicionalmente se hace una integración de información ecológica disponible, con respecto a las variaciones estacionales de la vegetación con los regímenes de lluvia, lo cual aporta valiosos datos sobre el comportamiento de las ondas de radar con el terreno, refinando así las clasificaciones.

Otro aspecto innovador de esta metodología es la incorporación del análisis de series de tiempo

en un periodo de estudio donde se presentan extremos climáticos, lo cual da una consistencia a las observaciones considerando que los procesos de inundación tienen ciclos supra-anales, difícilmente detectables un solo año de estudio. Para este ejercicio de mapeo se compilaron todas las imágenes Alos PALSAR-1 WB, disponibles en los archivos de la agencia espacial JAXA, gracias al convenio de investigación entre la Universidad de Wageningen y el grupo K&C de JAXA. En total se completaron 29 mosaicos Alos PALSAR WB y FB, a 100m de resolución espacial, con cobertura sobre todo el territorio nacional, en un periodo comprendido entre los años 2007 y 2011. Estos años presentaron periodos climáticos extremos, con eventos de El Niño - La Niña consecutivos. El índice de variabilidad climática ONI (Oceanic Niño Index), que indica las anomalías en la temperatura en la superficie del mar para este periodo de estudio, se excedió en los años 2009 y 2011, mostrando umbrales que sobrepasaron cinco meses consecutivos con cifras por encima de los límites estimados para años neutros. Para el año 2009 se registraron 11 meses consecutivos con valores mayores a $0,5^{\circ}\text{C}$ y para el año 2011 se registraron 11 meses con valores por debajo de $-0,5^{\circ}\text{C}$, indicando que fueron años con variaciones climáticas anómalas, es decir, años muy secos y muy húmedos y por esta razón podría considerarse como una observación de línea base de inundaciones para Colombia, para futuras acciones de monitoreo

Adicionalmente se presenta la información técnica sobre las metodologías de interpretación, corrección clasificación y análisis de las imágenes de radar Alos PALSAR -HH, para la detección de inundaciones; así mismo, los mapas finales y la estrategia de validación utilizada y las matrices de validación. Además, se discute la importancia de la aproximación ecosistémica para lograr observaciones más precisas con relación a un mapa de inundación recientemente publicado para todo el territorio amazónico.

Metodología

Principios de las imágenes de radar que permiten la detección de inundación

Los radares son sensores remotos activos que envían ondas a la superficie terrestre, con una estrategia de

observación lateral. Las ondas enviadas interactúan con los elementos del terreno y parte de la energía de la onda regresa al radar, que graba esta energía y la transforma en imagen. Hay tres aspectos geométricos que son básicos para comprender las imágenes de radar: el ángulo de incidencia, la dirección de rango y la dirección azimut. La resolución espacial en una imagen de radar se define en la dirección de rango y en la dirección azimut y la resolución radiométrica del radar se define como el número de observaciones del radar en un punto dado. Estas dos resoluciones tienen mucha influencia en la calidad de las imágenes y **tienen un efecto directo en la calidad de los productos resultantes.**

Adicionalmente hay características técnicas de radar que son importantes y que definen el tipo de elementos que pueden ser detectados y mapeados. Estos son: 1) la longitud de onda y 2) la polarización. Estos dos aspectos definen el tipo de interacción que el radar tiene con la superficie de la Tierra y con los objetos (mecanismos de interacción), y el tipo de fenómenos que pueden ser detectados. En el caso de la longitud de onda, hay diferencias en la penetración de las ondas de radar en el dosel del bosque -por ejemplo la banda C (3 cm de longitud de onda) penetra solo en las capas superiores del dosel mientras que la banda L (25 cm de longitud de onda), penetra el dosel e incluso detecta características del terreno, como la inundación-. Para el radar Alos PALSAR WB-HH (banda L) se presentan dos mecanismos de interacción de la onda de radar con el terreno que hacen posible la detección de inundaciones. La primera es el tipo de interacción de doble rebote, donde la onda entra al dosel y se refleja en el suelo (inundado) y rebota en los troncos de los árboles, devolviéndose al radar con gran cantidad de energía y generando una imagen con valor alto de retorno, de color blanco-claro. Por otro lado para la detección de cuerpos de agua, el mecanismo básico de interacción es un mecanismo de reflexión en los que la onda se refleja en el agua y no regresa nada al radar, generando un retorno bajo de color oscuro (Figura 1).

Por otro lado las diferentes polarizaciones también tienen mecanismos de interacción diferentes. Por ejemplo, para el radar Alos PALSAR, las ondas de la polarización HV interactúa más a nivel de dosel en mecanismo llamados de volumen, sensibles a aspectos estructurales del bosque tales como biomasa,

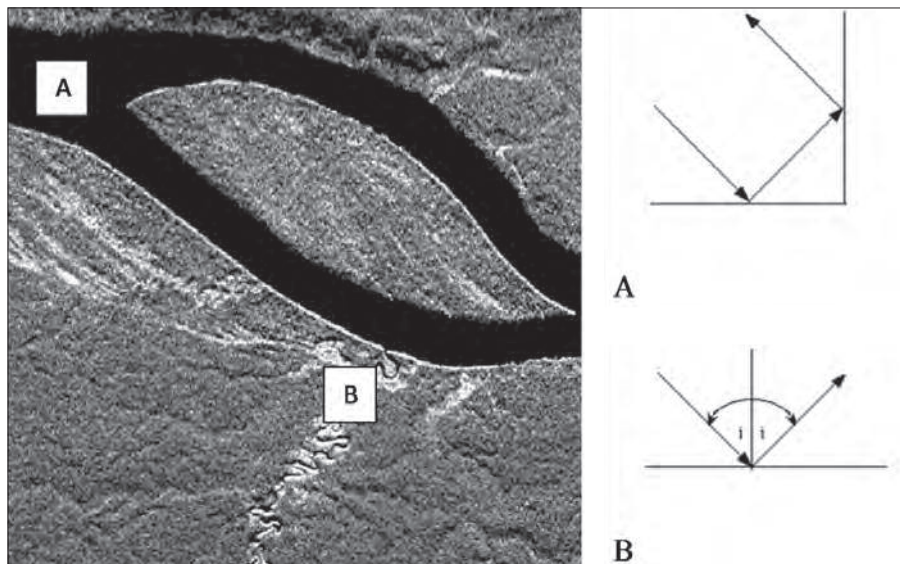


Figura 1. Imagen de radar del sistema AirSAR, Banda L, polarización HH, sobre el río Caquetá en época de inundación. Esta imagen ilustra la capacidad del radar para detectar zonas de inundación a cielo abierto (A) (río en negro) detectado por el mecanismo de reflexión de la onda de radar (mecanismo abajo) y las zonas inundadas bajo el dosel que aparece blancas-brillantes (B) detectados por el mecanismo de doble rebote de la onda de radar (mecanismo arriba).

mientras que la polarización HH tiene **mecanismos de interacción de doble rebote** que facilita la detección de inundación bajo dosel, como se explicó anteriormente (Figura 2).

Procesamiento. El procesamiento para corrección de las imágenes de radar debe realizarse antes de cualquier proceso de clasificación con el objeto de corregir efectos producidos por la geometría del radar y las condiciones radiométricas. La calidad de las correcciones afecta drásticamente la calidad de los productos finales. Al intentar clasificaciones de imágenes con errores en el pre-procesamiento, se pueden esperar distorsiones en los valores medios del retorno del radar y por ende confusiones entre las clases.

Las imágenes de radar Alos PALSAR se reciben directamente desde JAXA en un nivel de procesamiento básico en formato SLC (single look complex) 1.1. que permite la corrección de las imágenes para las diferentes distorsiones geométricas y radiométricas. El procesamiento de las imágenes se realizó utilizando el software Gamma especializado en el procesamiento de imágenes de radar (http://www.gamma-rs.ch/no_cache/software.html); adicionalmente se utilizaron software creados en

SarVision para filtrar el efecto de sal y pimienta o *speckle* y generar mosaicos, sobre plataforma de IDL-ENVI y software GDAL. Los siguientes procesos de corrección fueron aplicados a todas las imágenes (líneas de radar) utilizadas para generar los mapas:

1. Extracción y conversión de la imagen SAR y metadatos de imagen SLC (single look complex) nivel 1.1.
2. Calibración radiométrica absoluta: conversión de los datos iniciales en valores de intensidad-backscatter Gamma nought (γ^0), corrigiendo parcialmente el efecto de ángulo de incidencia.
3. Georreferenciación (proceso grueso y fino): se hace uso de datos del SRTM modelo digital de terreno (DEM); el modelo digital del terreno (DEM) del sistema SRTM, a 90 m. de resolución, fue utilizado para la corrección de ambos tipos de imágenes de radar.
4. Corrección geométrica del terreno (GTC): corrección geométrica con referencia a un mapa para la corrección de pendientes.
5. Corrección radiométrica del terreno (RTC): corrección de las diferencias en *backscatter*

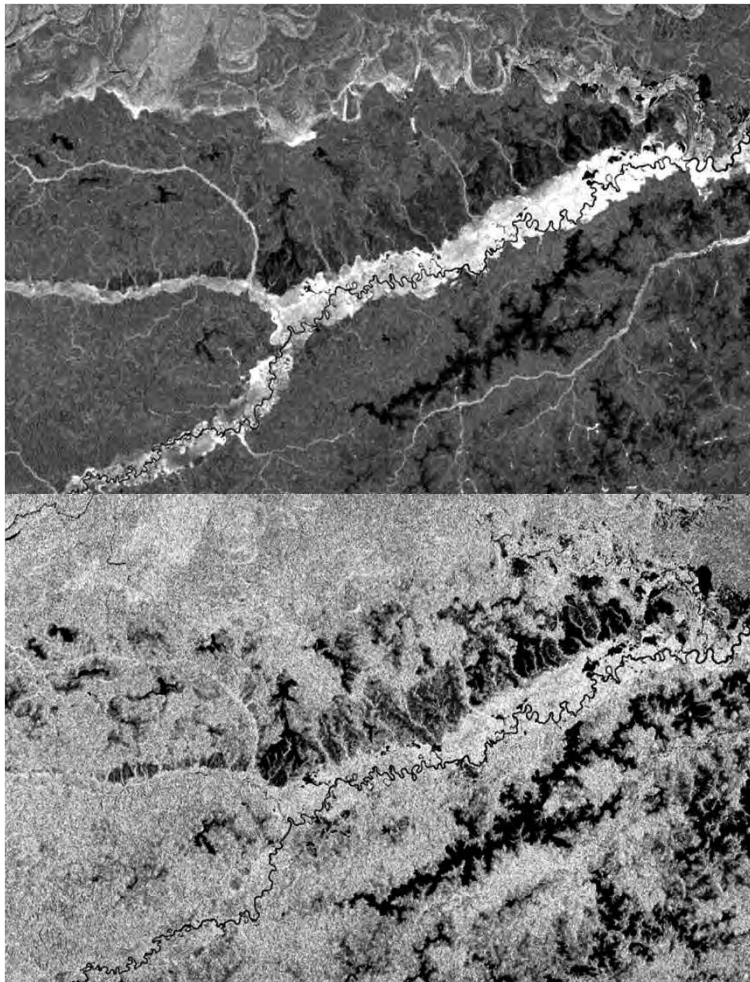


Figura 2. Imagen Alos PALSAR FBD, con dos polarizaciones HH (arriba) y HV (abajo) adquirida en julio de 2007 sobre el área de Matavén. Nótese que el área inundada bajo dosel del caño Matavén se demarca muy bien en la polarización HH, mientras que en la polarización HV no se puede ni siquiera ver (las dos imágenes son adquiridas en el mismo instante solo diferente polarización).

debidas a la pendiente; enmascarar los valores de fondo de imagen y convertir los valores de intensidad Gamma nought a escala de decibeles [dB].

6. Compilación de imágenes corregidas y co-registradas por sitio.
7. Filtrado de *speckle*.
8. Generación de mosaicos. Evaluación de calidad de calibración por mosaico.
9. Proceso de inter-calibración individual por mosaico, hasta lograr una consistencia menor a 1 dB.
10. La inter-calibración radiométrica entre las líneas de radar -que constituyen un mosaico- y entre los mosaicos, debe ser similar. Este proceso es de gran importancia para la generación de mosaicos consistentes, que servirán como base para la creación de cartografía temática.

Esto garantiza que los productos generados por las diferentes imágenes en las diferentes fechas sean comparables. La figura 3 muestra un mosaico de imágenes Alos PALSAR sobre el área central del territorio colombiano antes y después del proceso de inter-calibración.

Las correcciones en las zonas montañosas y especialmente en las zonas de pendientes empinadas, resultan en efectos visibles en las imágenes, incluso si

el DEM es de alta calidad. La figura 4 ilustra un detalle del efecto dramático de cambio sobre las imágenes de radar antes y después de una corrección de pendiente.

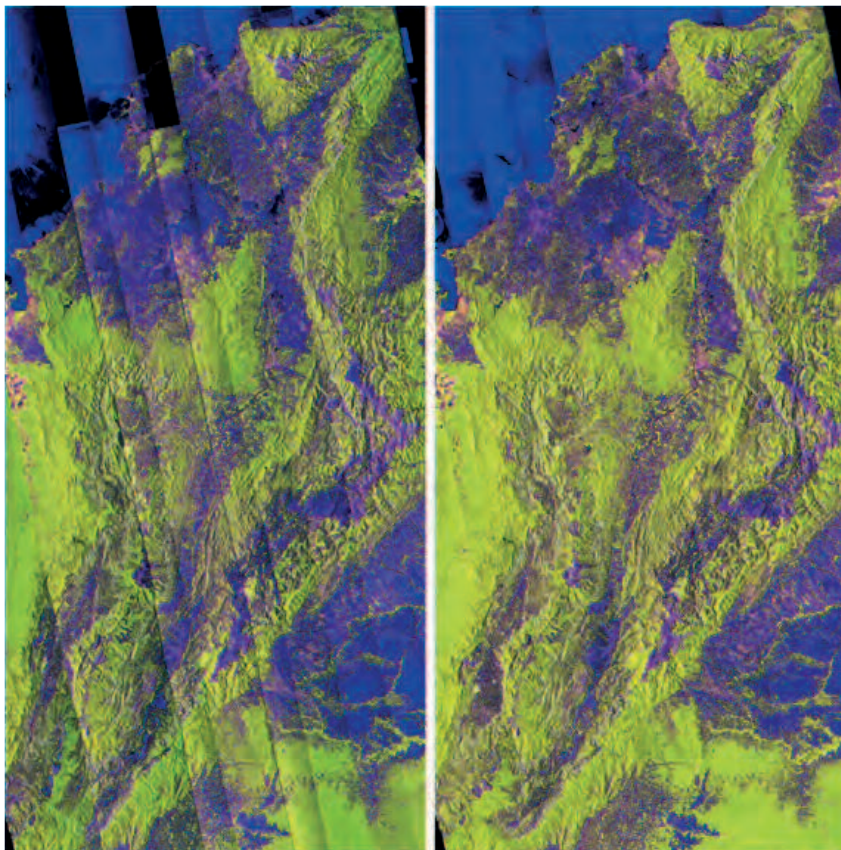


Figura 3. Imágenes Alos PALSAR para una zona en el centro de Colombia, antes y después de las correcciones radiométricas, entre las líneas de adquisición.

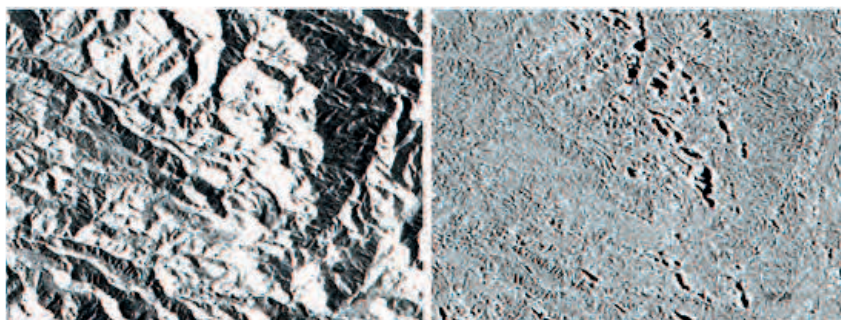


Figura 4. Detalle en una escena de una de las imágenes Alos PALSAR para ilustrar el efecto de la corrección radiométrica del terreno. Las imágenes a la derecha y a la izquierda corresponden a la misma área y tienen la misma escala. Imágenes antes (izquierda) y después de la corrección geométrica y radiométrica (derecha).

Teoría de sensores remotos de radar para el mapeo de los humedales: una aproximación ecosistémica

Desde el punto de vista ecológico la definición de los diferentes tipos de humedales y de ecosistema acuáticos está ligada a los niveles de agua, niveles freáticos, zonas de saturación de agua y sus variaciones, la vegetación y el tipo de suelo. Tanto los regímenes de inundación y el tipo de vegetación asociada tienen una influencia importante en la definición de los tipos de humedales. Los regímenes de inundación pueden variar desde permanentemente inundado (p.e. pantanos, lagos, esteros), ocasionalmente/estacionalmente inundado (p.e. várzeas) y raramente inundado (p.e. sabanas), y los tipos de vegetación pueden variar desde un bosque con dosel cerrado hasta áreas con pastos o incluso zonas sin vegetación. Por estas razones, para el soporte en la delineación de los diferentes tipos de humedales con imágenes de sensores remotos, es necesario contar con insumos que den información sobre la vegetación y las frecuencias de inundación. Las imágenes de radar son sensibles a estos dos aspectos y son unos buenos candidatos para la definición de por lo menos algunos tipos de humedales. Por ejemplo, para la delineación de un paisaje de planicie inundable en

zonas de bosque, es preciso contar con imágenes de sensores remotos adquiridas en épocas lluviosas y secas, donde se puedan apreciar las variaciones en las duraciones de las inundaciones y se puedan detectar áreas que permanezcan inundadas, incluso en épocas secas (Figura 5).

Por otro lado, al respecto de la delineación de humedales en zonas de poca vegetación como sabanas, es necesario saber las variaciones de biomasa y fenología, ya que en zonas de poca vegetación el radar puede sobreestimar la detección de inundación, porque el mecanismo de interacción de las ondas de radar con un terreno plano y seco es del mismo tipo que la interacción con el agua a cielo abierto (mecanismo de reflexión). Por ejemplo, en el caso de la altillanura colombiana de la vertiente del Orinoco, la vegetación es de sabana y muy escasa en la época de verano, por lo cual si no se hacen las correcciones necesarias incluyendo la información de la vegetación, puede producir una misma clasificación con zonas inundadas, justo cuando estas sabanas están secas completamente.

Por estas dos razones se propone una aproximación ecosistémica para el análisis de las imágenes de radar Alos PALSAR HH, que integren la información de

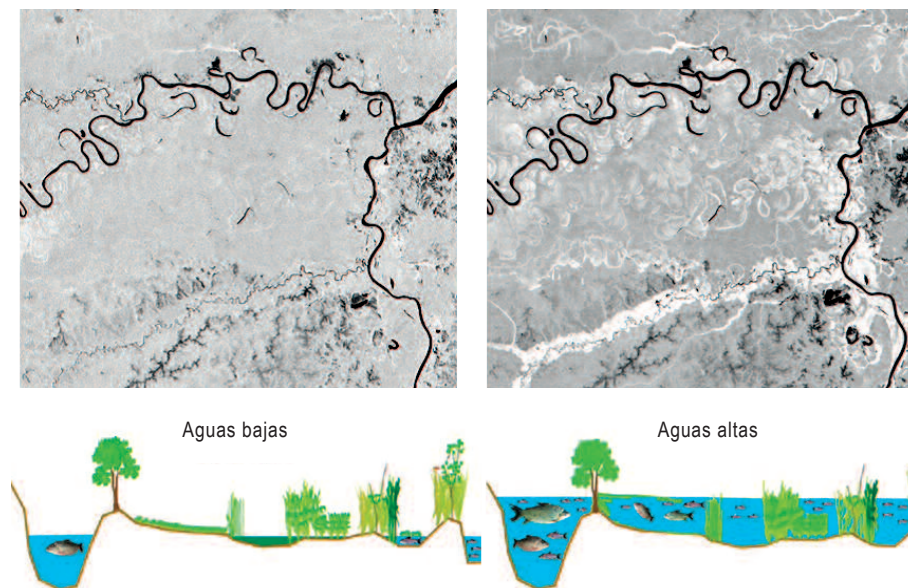


Figura 5. Imágenes de radar Alos PALSAR WB HH adquiridas en el área del Inírida-Guaviare, en época seca (izquierda) y época lluviosa (derecha). Se observa que la zona de la várzea del río Guaviare se detecta mucho más brillante en la época de lluvia. Esta zona corresponde a la planicie de inundación.

estructura de vegetación en el análisis de inundación y en la definición de los tipos de humedales. En este sentido se propuso generar dos productos (mapas) finales que fueran complementarios: uno de tipos estructurales de vegetación y otro de frecuencias de inundación, que compile la información.

Mapa de tipos estructurales de vegetación y definición de la leyenda

Para generar un mapa de tipos estructurales de vegetación se escogieron las polarizaciones con la información relevante. Para este tipo de mapas es indispensable incluir imágenes de las polarizaciones HH y HV, que son sensibles a la estructura de la vegetación, los

niveles de biomasa y las inundaciones. Estos aspectos son los más relevantes en la definición de una leyenda estructural de la vegetación basada en lo que el “radar puede ver”. En el caso de este producto específicamente se evaluaron las ocho polarizaciones e imágenes disponibles y se decidió hacer la clasificación con tres bandas:

Banda 1: FBD-HV promedio 2007-2008

Banda 2: FBD-HV promedio 2009-2010

Banda 3: FBD-HH promedio 2009-2010

El compuesto de color generado con estas tres bandas se puede ver en la figura 6.

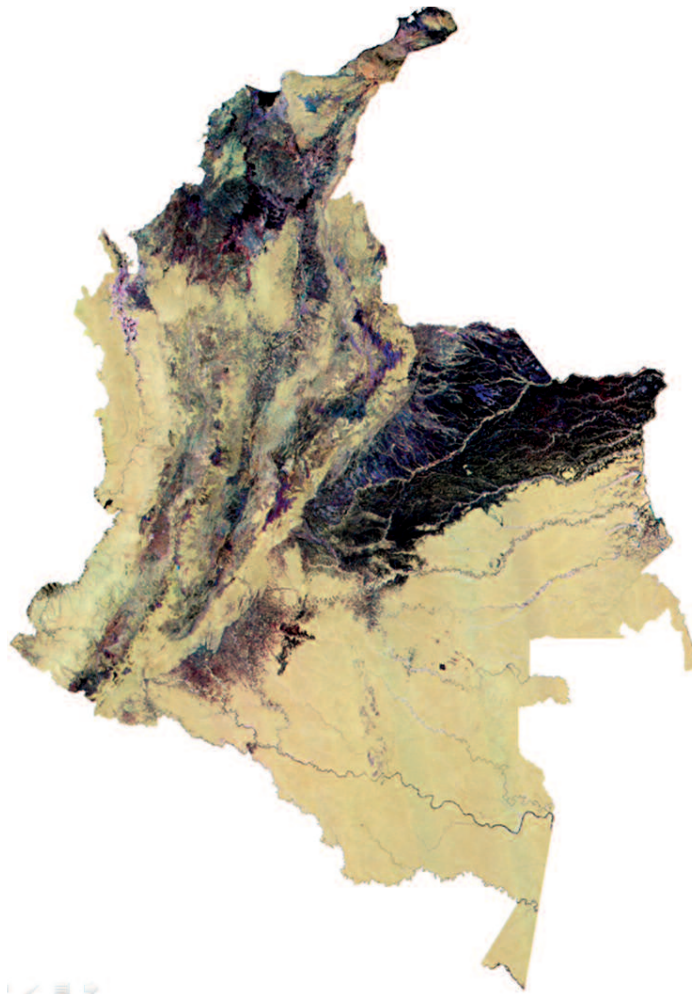


Figura 6. Compuesto de color de las tres bandas Alos FBD HV/HV/HH utilizadas en la clasificación de los tipos estructurales de vegetación en Colombia. Puede observarse que el mosaico no presenta diferencias radiométricas drásticas entre las líneas de adquisición del radar.

El proceso de clasificación de las imágenes de radar fue una combinación de un proceso no supervisado y supervisado, utilizando un algoritmo desarrollado especialmente para clasificación de imágenes de radar, que integra un proceso de clasificación de ML (maximum likelihood) con un análisis de filtrado usando Markov-random fields (Hoekman *et al.* 2010). El proceso de clasificación de las imágenes incluye varios procesos: 1) Interpretación visual de las imágenes en relación con la información disponibles (mapas, imágenes de alta resolución, fotografías e imágenes ópticas). 2) Definición de clases estructurales a clasificar. 3) Clasificación no supervisada de ventanas seccionadas sobre el mosaico en áreas donde se conoce la vegetación. 4) Selección de clases por clasificar, rotuladas con un tipo de vegetación preliminar y extracción de estadísticos de matriz de covarianza y 5) Clasificación supervisada.

La selección de áreas homogéneas de las clases por clasificar y la rotulación de polígonos para cada tipo de vegetación, es un ejercicio de gran importancia ya que dentro de cada clase de vegetación los polígonos de muestra no deben diferir significativamente a nivel estadístico y deben ser a la vez representativos de la clase. La clasificación no supervisada ayuda en la definición de las clases y da las pautas para la selección y la delineación de los polígonos. Se debe hacer un muestreo de los diferentes tipos de vegetación a lo largo y ancho de la imagen para asegurar que la clase quede bien representada. Para el conjunto de polígonos de cada clase se extraen los estadísticos necesarios para la clasificación. La media y la desviación estándar y la distribución de los píxeles se utilizan para evaluar la variabilidad en la clase: si la desviación estándar es mayor a 1 dB y la distribución de píxeles se aleja de una distribución normal, la clase debe ser remuestreada. Una vez definida la clase se extrae la matriz de covarianza que se usa como *input* para la clasificación. Estos valores estadísticos son la base para la clasificación supervisada en la que ocurre un agrupamiento de los píxeles dentro de una rutina de filtros definidos con anterioridad, bajo un análisis de campos aleatorios de Markov. Información más detallada del proceso de clasificación puede encontrarse en Hoekman *et al.* (2010). El resultado es una imagen clasificada con un número de clases de acuerdo a las

clases definidas estadísticamente y con distancias estadísticas que varían entre clases. Después de la clasificación hay un proceso de post-procesamiento que permite remover efectos adicionales, tales como el efecto de las pendientes.

Para la definición de la leyenda se hizo una interpretación de las imágenes basada en los valores del radar, el modelo digital del terreno y la interpretación sobre la vegetación de la zona interpretada sobre *Google Earth* y mapas existentes disponibles. La estratificación de los paisajes y la estructura de la vegetación es muy simple y se hace siguiendo la clasificación del sistema LCCS (Land Cover Classification System) de la FAO, descrita en Di Gregorio y Jansen (2000).

Los principales paisajes muestreados fueron: 1) paisaje de montañas, 2) paisaje en tierras bajas y 3) paisajes de tierras húmedas. Para cada uno de estos paisajes se hace una estratificación en los tipos de vegetación. La estratificación se hace utilizando una clasificación fisonómica y de formas de vida.

Algunas definiciones de vegetación utilizadas en la leyenda son:

- Bosque: cobertura de árboles > 30 %, áreas >1 ha, árboles usualmente >20 m de altura.
- Arboledas: vegetación con cobertura de árboles < 30 %.
- Matorrales: vegetación leñosa de matorrales con cobertura > 10 %.
- Herbazales: vegetación de pastos y gramíneas con cobertura de matorrales < 10 %.

Estos tipos de vegetación se encuentran sujetos a diferentes regímenes hídricos y humedad en suelos. La leyenda final se genera combinando la información de paisaje, vegetación y humedad en suelo.

Mapa de inundación y de frecuencias de inundación

Para el estudio de los pulsos de inundaciones en un territorio extenso es necesario hacer mapeo de inundaciones en un lapso de tiempo suficientemente largo que permita incluir estaciones secas y lluviosas,

y también que incluya eventos extremos tanto de lluvia como de sequía. Desde el punto de vista de los sensores remotos se hace necesario el uso de series de tiempo de imágenes que cubran un periodo significativo de tiempo. En este trabajo se utilizó una serie densa de imágenes Alos PALSAR WB y FB, disponibles para Colombia en los archivos de SarVision, gracias a la colaboración con JAXA, NASA e INPE a través del convenio Carbon and Kioto (K&C) entre la Universidad de Wageningen y JAXA. Se realizó un estudio detallado de las fechas de adquisición y de la calidad de las imágenes disponibles. Se hizo una escogencia de las imágenes con fechas más cercanas para utilizarlas en la creación de mosaicos con cubrimiento sobre todo el país. En total se completaron 22 mosaicos a 100m basados en el sistema Alos PALSAR WB con cubrimiento completo. Adicionalmente, para completar la serie densa de tiempo se realizaron siete mosaicos con imágenes de los modos *FBD-HH* y *FBS-HH*, originalmente a 50 m de resolución, remuestreados a 100 m. Estas imágenes fueron co-registradas a las imágenes *WB*.

En total se analizaron 29 mosaicos de radar polarización HH en el periodo 2007-2011. Sobre cada mosaico se realizó una clasificación para la detección de inundación a cielo abierto e inundación bajo dosel. Básicamente los pasos de análisis pueden ser resumidos en varios puntos:

- Para cada imagen de radar se definieron unos valores máximos y mínimos para las inundaciones abiertas y las inundaciones bajo dosel. Esos valores dependen de las estadísticas de cada mosaico. Se realiza una clasificación supervisada para cada mosaico y se toma esa clasificación como la base del análisis. Los valores mínimos, máximos y medios de *backscatter* fueron extraídos solamente en las áreas planas del área de estudio, para así evitar el efecto de los valores de las pendientes en las estadísticas finales.
- En caso de que se detectaran diferencias radiométricas mayores a 1 dB entre las líneas de órbitas componiendo un mosaico, y que no hubiera sido posible corregir esta diferencia, entonces se hizo la clasificación sobre cada línea de órbita radar. De esta forma cada línea mostró valores de clasificación ligeramente diferente de acuerdo a las estadísticas

calculadas para cada imagen. En general, para la inundación a cielo abierto se definió un rango entre -30 dB y -18 dB y para la inundación bajo dosel se definió un rango entre -5 dB y 9 dB. Esta clasificación se estratificó por regiones, ya que se encontró que diferencias estacionales entre el norte y sur del país causaban diferencias en estos rangos.

- Las áreas detectadas como inundadas en zonas de pendientes mayores al 5,5 % fueron filtradas al igual que las áreas correspondientes a ciudades y áreas construidas (Archivo Shape disponible). En ambos casos el mecanismo de interacción entre las ondas de radar y el terreno, llamado de ‘doble rebote’, es responsable de valores altos de retorno y genera confusión con la detección de agua bajo dosel. Por esta razón deben ser filtrados del mapa de inundación.
- Adicionalmente se hizo un análisis de los valores de retorno del radar para cada uno de los tipos de vegetación, generado con radar. La idea de este análisis es saber qué tipos de vegetación sufren de un cambio brusco en la señal de radar a lo largo del periodo de observación, en la polarización HH, y que por ende puedan estar afectadas por cambio en la humedad en el suelo o inundación o por los cambios fenológicos a niveles de biomasa de la vegetación. Por ejemplo, los valores de retorno de radar, de las áreas abiertas y las zonas de sabana con poca vegetación fueron muy bajos consistentemente, excepto para los meses de lluvia en los que los valores de HH son más altos que para los meses secos. Mientras que bosques de galería y bosques inundables en Amazonia y Chocó mostraron variaciones importantes en *el retorno a lo largo* del periodo de estudio. Estas clases de vegetación se utilizan como máscara para la definición final de las zonas de inundación.
- Además se utilizó el mapa de vegetación y el mapa de regiones para filtrar algunas clases adicionales siguiendo un enfoque ecosistémico. Por ejemplo, en la altillanura y en La Guajira hay muchas zonas planas con poca/ninguna vegetación, especialmente en la época seca, estas zonas deben ser filtradas ya que por el efecto de reflexión de la onda de radar, se genera muy poco retorno de radar y se confunde con inundación a cielo abierto.

La información contenida en los 29 mapas de inundación creados con las imágenes de los 29 mosaicos, se compiló en el mapa de frecuencias de inundación. Cada pixel de este mapa da información sobre cuántas veces este pixel fue detectado inundado en el **periodo de tiempo muestreado para los dos tipos de inundación**. De esta manera el mapa de frecuencias de inundación tiene dos clases principales. Inundación a cielo abierto e inundación bajo dosel. Y cada **uno de esas clases puede ocurrir de uno hasta un máximo de 29 veces**.

Resultados

Mosaicos de radar

En total se procesaron y corrigieron 1750 imágenes de radar Alos PALSAR-WB a 100 m de resolución y 4000 imágenes Alos PALSAR FBD a 50 y 25 m de resolución; con estas imágenes geométrica y radiométricamente balanceadas se realizaron los mosaicos de radar con cobertura sobre todo el país. La tabla 1 muestra la lista de los mosaicos Alos PALSAR con polarización HH que se realizaron con todas las imágenes disponibles. A 100 m de resolución se completaron 29 mosaicos con cobertura sobre todo el país, contando los provenientes del sistema WB (22) y los provenientes del sistema FB (7), remuestreados a 100 m. La tabla muestra las fechas aproximadas que cubre cada mosaico así como su resolución y cobertura sobre todo el país: completo (C) e Incompleto (I).

La figura 7 muestra un ejemplo de los mosaicos terminados. Tanto el mosaico HH y los mosaicos HV quedaron para uso de los Institutos Humboldt y del Ideam y formarán parte del banco de imágenes de ambas instituciones.

Mapa de vegetación

El mapa final de estructura de vegetación (Figura 8), resultado de la clasificación de las imágenes de radar, tiene cubrimiento sobre todo el territorio continental colombiano y aunque fue realizado con información combinada de 2007-2008-2009-2010, el mapa incluye la cobertura de vegetación correspondiente al año 2010. El mapa muestra consistencia en los tipos estructurales de vegetación de norte-sur y este-oeste y corresponde a los tipos de vegetación reportados en

otros mapas (Ideam, 2007). Debido a la alta calidad de la inter-calibración de las imágenes, los efectos de ángulo de incidencia son poco visibles en la clasificación final. El mapa está en formato raster Tiff, a una resolución de 50 m por pixel.

La leyenda de este mapa sigue los parámetros de descripción estructural de la vegetación que pudieron ser identificadas por el radar. En total se definieron 17 tipos estructurales de vegetación, una clase de agua y una clase de infraestructura (ciudades y zonas construidas). La leyenda se calculó para el sistema LCCS utilizando el software de FAO disponible en la publicación (Di Gregorio y Jansen 2000), para 11 de las clases. Este software permite el cálculo del código LCCS, código numérico que incluye la información que se entra en el programa. Al final el programa entrega una leyenda con una descripción estructural de la vegetación y un código alfanumérico.

La información para la definición de la leyenda se basó en información y descripciones de vegetación según observaciones en imágenes ópticas de alta resolución para diferentes zonas del país y las imágenes disponibles en *Google Earth*. Para cada clase descrita, el código LCCS incluye información del tipo estructural de vegetación, la humedad de suelo y la localización en el paisaje y el clima. La leyenda final se presenta en la tabla 2. En la última versión del mapa, en junio de 2015, se hizo un pos procesamiento al mapa de vegetación, para incluir las clases de mangles. Para este proceso se utilizó el archivo de mangles provisto por el Instituto Humboldt, y se reclasificaron las clases pertenecientes a bosques. Estas clases de mangle deberían ser controladas en campo para una mayor descripción estructural y así mismo para lograr la suficiente información para el cálculo del código LCCS correspondiente. Hasta ahora no se tiene código para esta vegetación.

El Ideam llevó a cabo un proceso de validación de las clases húmedas del mapa de vegetación utilizando el Mapa Corine Land Cover (Ideam 2007) e imágenes de alta resolución y otras fuentes de información, como fotos georreferenciadas provenientes de otros proyectos. Esta validación sigue el proceso descrito en Oloffson *et al.* (2010), en el que hay una selección de puntos al azar en ventanas escogidas estratégicamente y estratificado y proporcional al área ocupada por cada clase.

Tabla 1. Fechas aproximadas de adquisición y estado de cada uno de los mosaicos generados para la generación de una serie densa e mapas de inundación. Base del Mapa de frecuencias de inundación.

Sistema	Nombre	Estado	Año	Mes	Resolución		
					100 m	50 m	25 m
WB	C02	C	2006	Dic	x		
WB	C03	C	2007	Feb	x		
WB	C04	C	2007	Mar	x		
WB	C05	C	2007	May	x		
WB	C06	C	2007	Jul	x		
WB	C07	C	2007	Ago	x		
WB	C08	C	2007	Sep	x		
WB	C09	C	2007	Oct	x		
WB	C10	C	2007	Nov	x		
WB	C11	C	2008	Dic	x		
WB	C13	C	2008	Abr	x		
WB	C16	C	2008	Ago	x		
WB	C17	C	2008	Oct	x		
WB	C18	C	2008	Nov	x		
WB	C19	C	2009	Ene	x		
WB	C27	C	2010	Mar	x		
WB	C28	C	2010	Abr	x		
WB	C29	C	2010	Jul	x		
WB	C30	C	2010	Sep	x		
WB	C31	C	2010	Oct	x		
WB	C33	C	2011	Ene	x	x	x
WB	C34	C	2011	Mar	x	x	x
FBD		C	2007	Jul	x	x	
FBD		C	2008	Jun	x	x	
FBD		C	2009	Sep	x	x	
FBD		C	2010	Sep	x	x	
FBS		C	2010	Dec	x	x	
FBS		C	2011	Feb	x	x	
WB	C01	I	2006	Nov	xx		
WB	C12	I	2008	Feb	xx		
WB	C15	I	2008	Jun	x		
WB	C20	I	2009	Feb	x		
WB	C21	I	2009	Abr	x		
WB	C22	I	2009	Jul	x		
WB	C23	I	2009	Ago	x		
WB	C24	I	2009	Oct	x		
WB	C25	I	2009	Nov	x		
WB	C26	I	2010	Ene	x		
WB	C14	I	2008	May	x		
WB	C32	I	2010	Dic	x		

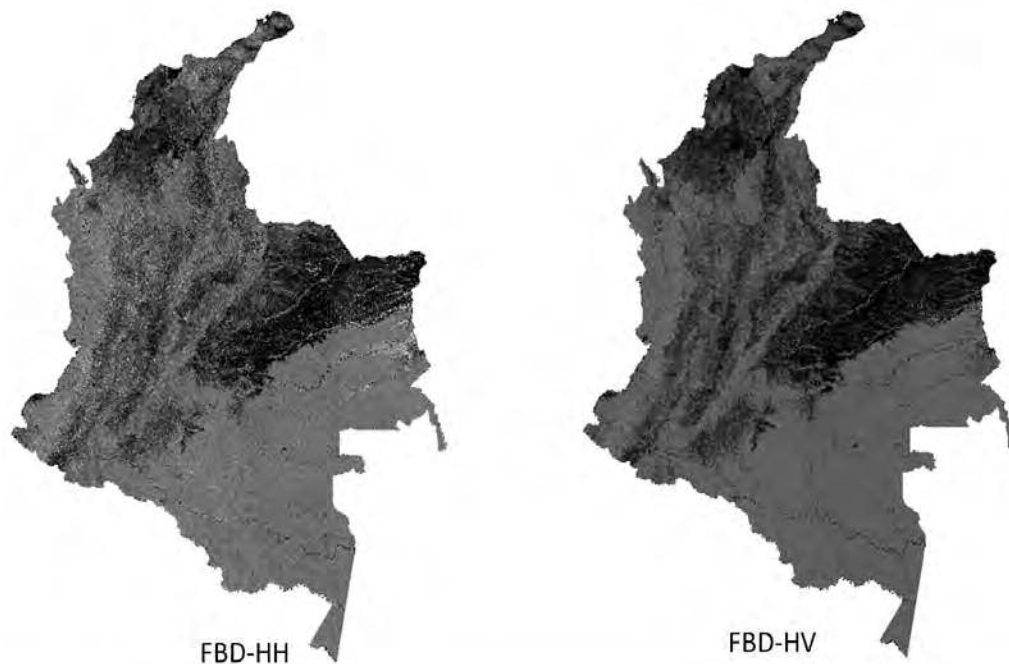


Figura 7. Ejemplo de los mosaicos de imágenes de radar FBD Polarizaciones HH y HV para el año 2008.

En este proceso se escogieron las clases de vegetación con descripción en la leyenda de inundado bajo dosel e inundado a cielo abierto y no-inundado y se validaron con las correspondientes clases en el mapa de vegetación del Ideam (2007); los resultados se pueden observar en la tabla 3. Esta matriz muestra que la precisión general es de un 92,44 % y que la clase con más errores de omisión y comisión es la clase de inundado bajo dosel. Esta relativa baja precisión en la clasificación de esta clase se puede explicar con que para el mapa de Corine Land Cover el polígono es sólido para todo el plano de inundación mientras que en los mapas derivados de SAR dentro del mismo plano de inundación, se detectan zonas inundadas y zonas no inundadas (diques). Es muy probable que los puntos analizados estén dentro del plano de inundación que no se inunda o dique.

Mapas de inundación

Para cada uno de los mosaicos de la serie densa de tiempo se realizó la clasificación de inundación según la metodología descrita anteriormente. Se generaron 29 mapas de inundación, a 100 m de resolución, con píxeles pertenecientes a tres clases: a) no inundado

(gris), b) inundados en zonas abiertas (azul) e c) inundado bajo dosel (verde). La figura 9 muestra un ejemplo de estos mapas de solo tres clases.

Mapa de frecuencias de inundación

En el mapa de frecuencias de inundación cada píxel tiene información de cuántas veces este píxel fue detectado como inundado a cielo abierto o como inundado bajo dosel, a lo largo de la serie densa de 29 mapas de inundación, clasificados para el periodo comprendido entre 2007-2011. Cada clase contiene subclases donde cada píxel tiene un valor que indica el número de veces que fue detectado como inundado; estos números van de 0 a 29. La gama de colores asignada a cada frecuencia para cada una de las clases es de azules para las inundaciones a cielo abierto y verde-roja-café para las inundaciones bajo dosel. A mayor frecuencia de inundación, más oscuro el tono. La figura 10 muestra el mapa de frecuencias de inundación final. Este mapa se encuentra en formato raster GeoTify, y sirvió de insumo para la creación del mapa de humedales. El mapa es consistente a lo largo del territorio, indicando que para cada píxel hubo información en los 29 mapas. Es decir no hay zonas con huecos de información.

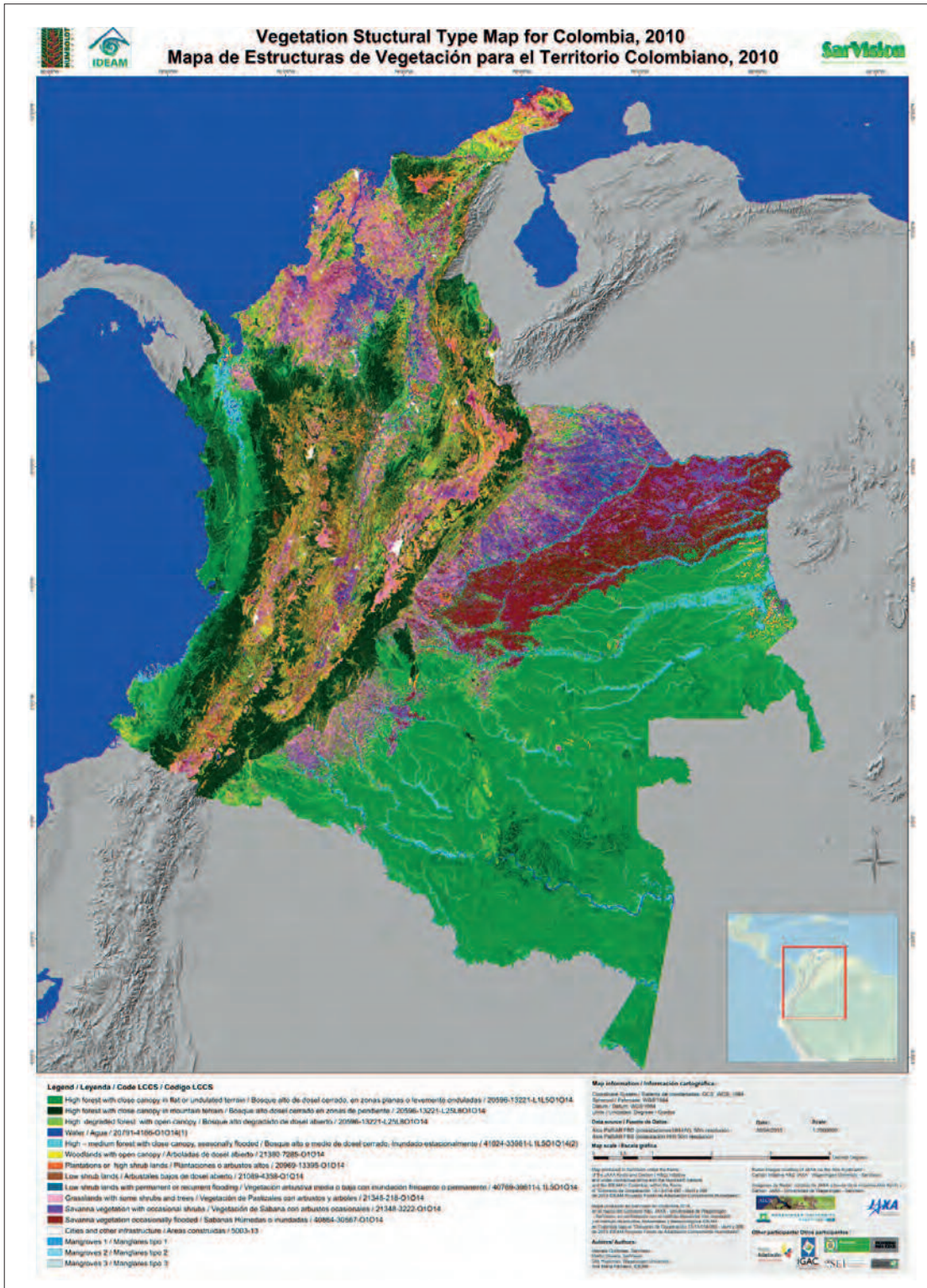


Figura 8. Mapa Final de tipos estructurales de vegetación resultado de la clasificación de la combinación de las imágenes Alos PALSAR FBD/ HV-HH.

Tabla 2. Leyenda LCCS (Land Cover Classification System), FAO. Calculada para el mapa de tipos estructurales de Colombia.

Código	LCCS Cod	Descripción
1	20596 - 13221 - L1L5O1O14	Bosque alto de dosel cerrado, estratificado, que ocurre en zonas tropicales húmedas, bajas, planas o levemente onduladas.
2	20596 - 13221 - L25L8O1O14	Bosque alto de dosel cerrado, estratificado, que ocurre en zonas tropicales, en montañas y es zonas con pendientes
3	20791 - 4186 O1O14 (1)	Bosque alto de dosel abierto, ocurriendo en zonas tropicales planas y montañosas.
4		Ríos, lagunas, ciénagas y áreas inundadas temporalmente, de vegetación abierta.
5	41024 - 33981 - L1L5O1O14 (2)	Bosque alto o medio de dosel cerrado, inundado estacionalmente, ocurriendo en zonas tropicales planas.
6	21380 - 7285 - O1O14	Arboladas de altura media, de dosel abierto, ocurriendo en zonas tropicales planas o en montaña.
7	20969 - 13395 - O1O14	Arbustales altos de dosel cerrado o plantaciones de diverso tipo, ocurriendo en zonas tropicales planas o de montaña.
8	21089 - 4358 - O1O14	Arbustales de dosel abierto, ocurriendo en zonas tropicales planas o de montaña.
9	40789 - 39611 - L1L5O1O14	Vegetación arbustiva media-baja, abierta, permanentemente inundada o inundada frecuentemente, ocurriendo en zonas tropicales planas.
10	21348 - 218 - O1O14	Vegetación densa de gramíneas con arbustos ocasionales, ocurriendo en zonas tropicales planas o de montaña.
11	21348 - 3222 - O1O14	Vegetación de sabana con arbustos bajos esparcidos, ocurriendo en zonas tropicales planas o de montaña.
12	40864 - 30667 - O1O14	Vegetación de sabana con arbustos bajos ocasionales, sometida a inundaciones estacionales y ocurriendo en zonas tropicales, bajas o de montaña.
14	5003 - 13	Ciudades

Tabla 3. Matriz de confusión para la validación del mapa de tipos de vegetación. La confiabilidad del mapa es de un 92,44 % en general y la precisión para todas las clases, excepto inundación bajo dosel, es mayor de 90 %.

MATRIZ DE ERROR		Referencia			Total	Fiabilidad %	Comisión %
		Inundación a cielo abierto	Inundación bajo dosel	No inundado			
Mapa	Inundación a cielo abierto	1704	12	67	1783	95,57	4,43
	Inundación bajo dosel	2	1326	455	1783	74,37	25,63
	No inundado	31	288	7422	7741	95,88	4,12
Total		1737	1626	7944	11307		
Precisión %		98,10	81,55	93,43		92,44	
Omisión %		1,90	18,45	6,57			

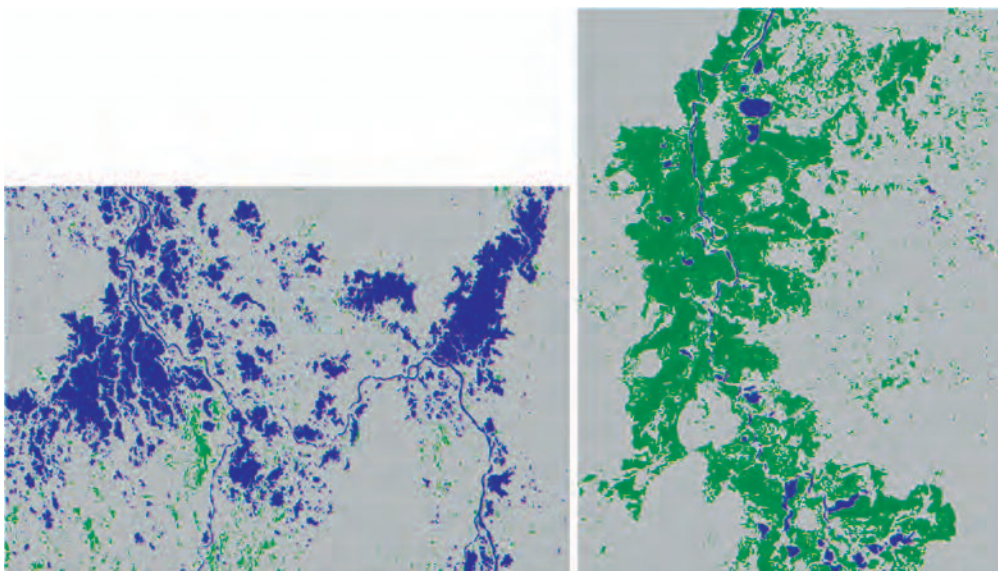


Figura 9. Ejemplos de mapas de inundación: la figura de la izquierda muestra la detección de inundación abierta (azul) detectada en área de la Mojana en Junio 2007, mientras que la figura de la derecha muestra la detección de inundación bajo dosel en el área del Atrato, para la misma fecha. Lo no inundado aparece como gris.

El mapa de frecuencias de inundación a 100 m fue validado por el grupo del Ideam (Pacheco *et al.* 2014), siguiendo el procedimiento descrito en Olofsson *et al.* (2014); la validación se realizó para 19 ventanas escogidas, de común acuerdo en diferentes zonas del país, y en total se validaron 9195 puntos. Los píxeles fueron escogidos de una manera aleatoria y estratificada en las clases de inundado, no inundado e inundado bajo dosel. Como base para la validación se utilizó el mapa de Corine Land Cover del Ideam. La precisión total calculada es de 89,35%. La clase con mayores errores de clasificación es la clase de inundación bajo dosel. Estos errores nuevamente pueden estar relacionados con la selección al azar de puntos dentro de la planicie de inundación que no se inundan, pero que en el mapa usado para la validación aparecen como un polígono sólido. Es decir en el mapa Corine Land Cover en el plano de inundación no se hace diferencia entre las áreas que se inundan y las que no se inundan, por ejemplo los diques. Adicionalmente esta validación mostro que las inundaciones a cielo abierto presentan más de un 10 % de errores de comisión. Este aspecto fue revisado más en detalle y se observó que muchos ríos en Amazonia y Orinoquia no estaban clasificados como inundados en su total extensión, y esto se debe

a la resolución de las imágenes utilizadas, que en este caso es de 100 m. En muchos casos los ríos son menos anchos que esta resolución y no aparecen en las imágenes; es también común que debido a los sedimentos en los ríos amazónicos, los valores del radar sean muy altos y así el agua a cielo abierto pueda clasificarse como algún tipo de playa o sabana. Esta información se utilizó para refinar los valores de clasificación de inundación en estas áreas y se concluyó que en la mayoría de los casos las clasificaciones deben hacerse por región.

Discusión y conclusiones

Importancia de la aproximación ecosistémica en la clasificación de las inundaciones

El aporte de esta aproximación ecosistémica para el análisis de definición de las inundaciones con imágenes de radar es de gran importancia, ya que muchos territorios aparecerían inundados si no se corrigieran adecuadamente con el mapa de vegetación. Uno de los efectos más comunes, a corregir, se presenta en las zonas planas de poca vegetación -como desiertos o sabanas- en épocas de sequía o zonas de afloramientos rocosos de poca pendiente.

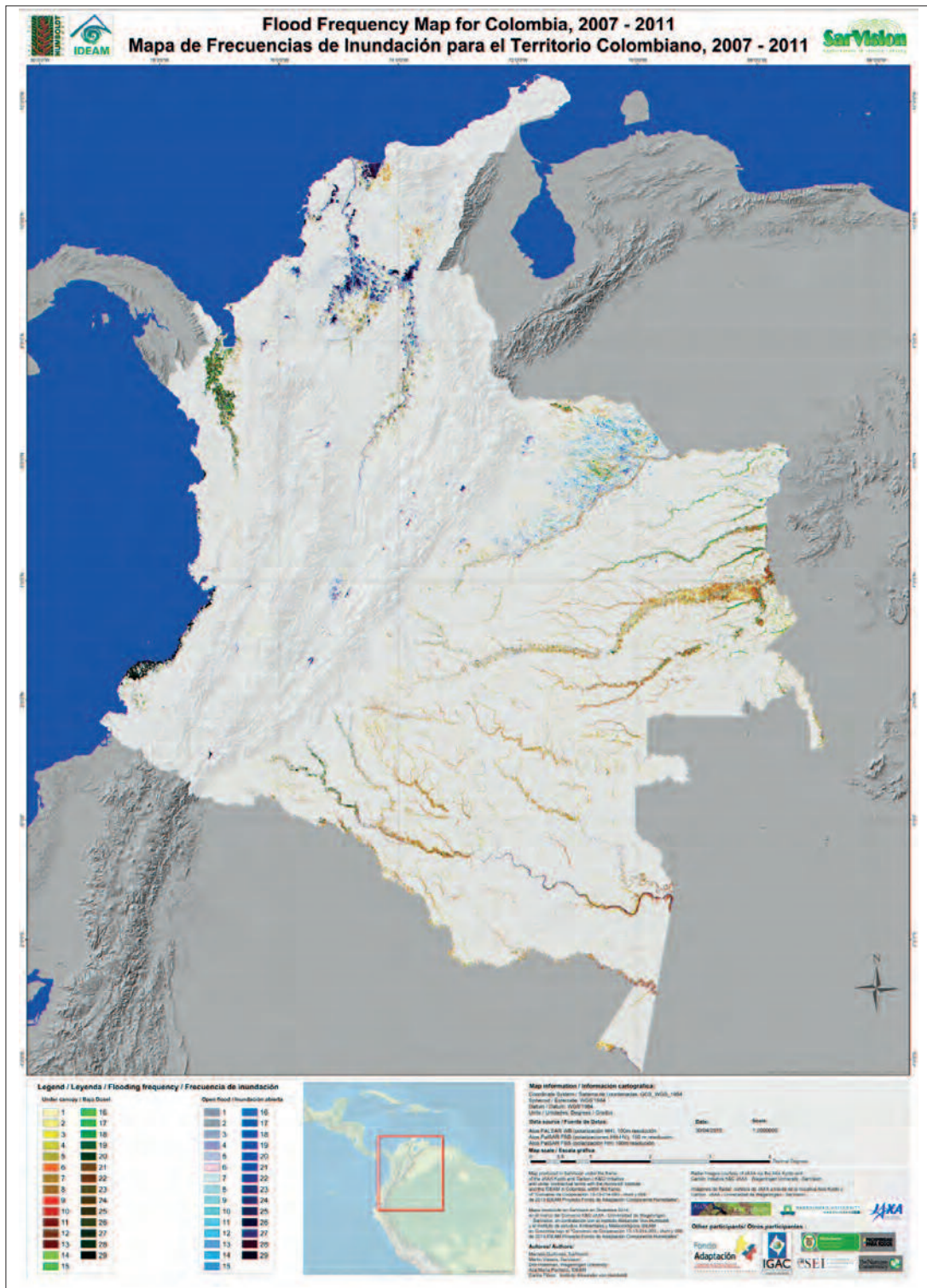


Figura 10. Mapa final de frecuencias de inundación. Se muestra en la leyenda el número de veces que un pixel fue detectado como inundado en la serie densa de tiempo de mapas de inundación, para las clases a cielo abierto (azul) y Bajo dosel (amarillo-verde-rojo).

Tabla 4. Matriz de confusión calculada en el proceso de validación llevado a cabo por el grupo de validación del Ideam. Resultados de validación del mapa de frecuencias de inundación a 100m. Los valores en el interior de la tabla representan el número de píxeles mientras que los valores de fiabilidad y precisión están dados en porcentaje.

MATRIZ DE ERROR		Referencia			Total	Fiabilidad %	Comisión %
		Inundación a cielo abierto	Inundación bajo dosel	No inundado			
Mapa	Inundación a cielo abierto	1487	35	139	1661	89,52	4,43
	Inundación bajo dosel	166	1148	355	1669	68,78	25,63
	No inundado	117	288	5581	5865	95,16	4,12
Total		1770	1350	6075	9195		
Precisión %		84,01	85,04	91,87		89,35	
Omisión %		15,99	14,96	8,13			

En estas áreas la interacción de las ondas de radar con el terreno es de tipo de reflexión, generando el mismo efecto que las ondas de radar en el agua, detectando así el terreno seco como si estuviera inundado. Sin hacer la corrección de este efecto es muy fácil clasificar erróneamente grandes territorios tales como la Orinoquia, (especialmente la altillanura) o regiones amplias en La Guajira y La Tatacoa, como si estuvieran inundadas, cuando en la realidad son terrenos secos y sin vegetación.

En un mapa recientemente publicado por científicos de la NASA (Chapman *et al.* 2015) se clasifica a la Orinoquia en el departamento del Meta, la zona de la altillanura, como “vegetación inundada” en épocas de máxima inundación, que según ellos ocurre entre enero y marzo, época que es bien sabido que hay sequía en la Orinoquia y que solo se encuentran sabanas, secas y casi sin vegetación. Esta sobreestimación de la inundación es básicamente debido a la falta de análisis de la inundación en conjunto con la vegetación, ignorando los procesos de variaciones fenológicas y de niveles de biomasa de la vegetación en las diferentes estaciones, y el conocimiento de los regímenes de lluvia local. Cuando la vegetación de sabana en la época seca es casi ausente y el suelo está casi desnudo, justo en esos momentos el efecto de

reflexión de las ondas de radar es más pronunciado y así mismo la sobreestimación de la inundación con el radar. Es indispensable que los mosaicos clasificados en épocas secas se corrijan para este efecto usando el mapa de vegetación. En este caso la clase de vegetación de sabana se utiliza como un filtro para la detección de la clasificación. Una comparación entre los dos mapas puede observarse en la figura 11.

Si se comparan los mapas con detenimiento también es claro que muchos de los bosques inundados de la Amazonia están mejor demarcados en el mapa de frecuencias de inundación y esto es debido al uso de series de tiempo (en este caso 29 observaciones), que capturan en parte las inundaciones ocurridas a lo largo de cinco años, es decir se está muestreando el terreno a lo largo de un tiempo, lo que ayuda a la detección de zonas inundadas que ocurren en diferentes épocas y con ciclos supra anuales. Vale la pena anotar que ambos mapas utilizaron la información de imágenes Alos PALSAR-1 WB en el mismo periodo de tiempo.

Otra observación interesante es que el mapa de frecuencias de inundación producido en este ejercicio puede servir de línea base para estudios de cambio climático en un futuro. Si se monitorean

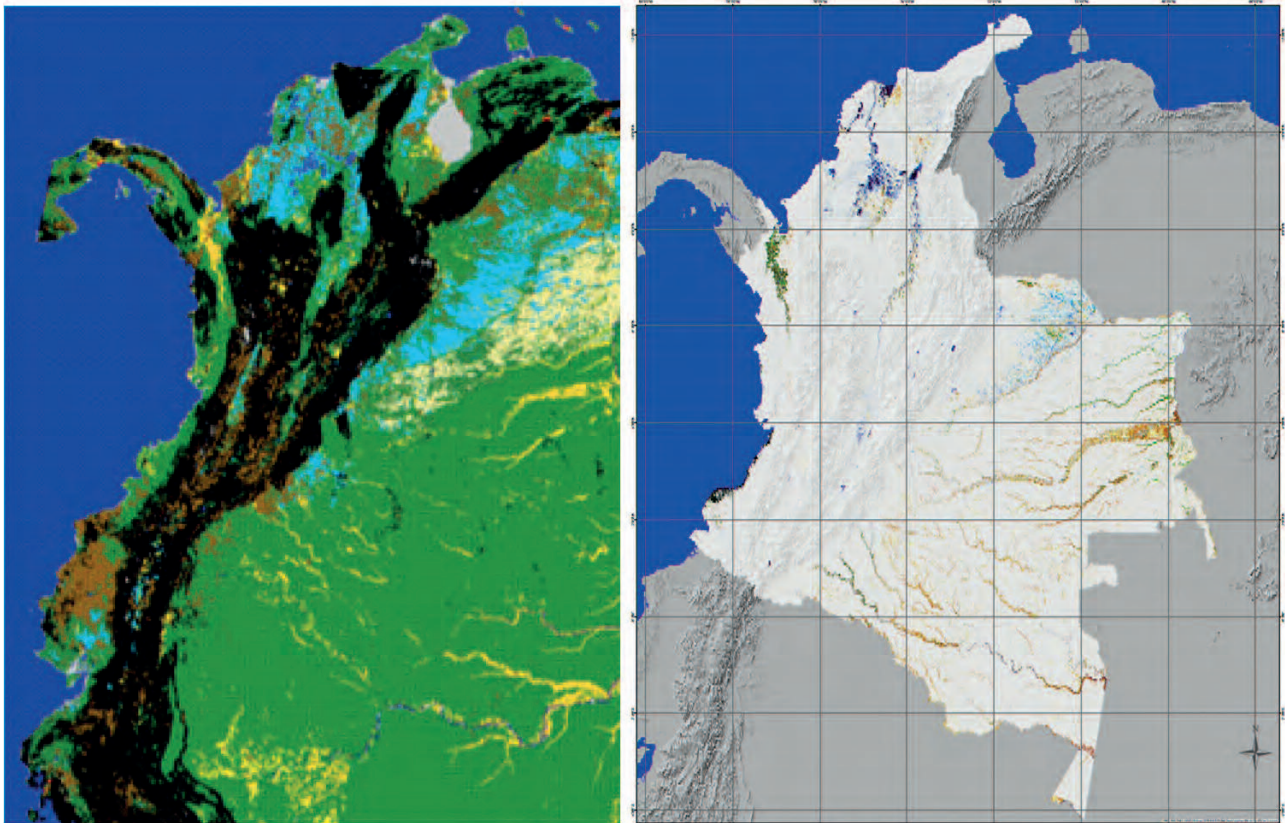


Figura 11. Comparación entre los mapas de inundación máxima (izquierda) (NASA, Chapman *et al.* 2015) y de frecuencias de inundación (derecha, este trabajo). Para el mapa de la izquierda: gris: no clasificado, azul oscuro inundación abierta; azul claro: agua abierta cuando hay máxima; verde: no inundado; amarillo: vegetación inundada; amarillo claro: vegetación inundada en época máxima, café: agricultura. El el mapa de frecuencias de inundación a la derecha, los tonos de azul corresponden áreas inundadas a cielo abierto y los tonos de amarillo-verde a las zonas inundadas bajo dosel.

las extensiones de las inundaciones a largo plazo, es posible detectar cambios en la disponibilidad y la locación del agua en zonas como la Amazonia y la Orinoquia, extensas como la del río Guaviare, pueden servir de indicador de cambio climático al evaluar cantidades de agua y sus variaciones en el tiempo, a largo plazo.

Una conclusión que surge a partir del análisis de los resultados de validación en diferentes regiones es que las clasificaciones de inundación deben hacerse por regiones geográficas con regímenes hídricos semejantes. Es decir es muy probable que los valores de clasificación de la clase de inundación a cielo abierto para la Amazonia y para la zona Atlántico difieran.

Uso de los mapas de vegetación y frecuencias de inundación para la definición de áreas inundadas y la definición de los tipos de humedales

Otro aspecto interesante en la aproximación ecosistémica es el análisis en conjunto de los mapas de vegetación y los mapas de frecuencias de inundación para el análisis de los tipos de humedales. Como se explicó anteriormente, en la definición de humedales hay un componente que tiene que ver directamente con el tiempo que un terreno está inundado y el otro aspecto es el tipo estructural de plantas que cubren el terreno. La figura 12 ilustra un detalle del mapa de vegetación y del mapa de frecuencias de inundación en la zona del Atrato en Chocó. En este detalle es evidente como la zona de bosque inundado (azul-cian)

tiene diferentes patrones en la frecuencia de inundación y de esta manera se pueden esperar diferentes tipos de vegetación o de asociaciones florísticas. Se distinguen áreas infrecuentemente inundadas (verde claras) y áreas permanentemente inundadas (café) y otras que se inundan con alguna regularidad (rojo). Igualmente hay zonas inundadas donde la vegetación es más baja (azul-cian oscuro) y que están permanentemente inundados, que corresponderían a zonas pantanosas de vegetación baja.

Desde este punto de vista, se propone una división en los diferentes tipos de humedales combinando los dos mapas; un ejemplo simple se muestra en la figura 13 (a y b). La figura a muestra una región en el

Casanare donde hay esteros, zonas de lagunas, sabanas temporalmente inundadas, ríos y bosques riparios, además de sabanas secas. La figura b muestra un área en el Atrato (Chocó), donde se distinguen zonas de bosques permanentemente inundados o bosques estacionalmente inundados, lagunas y ríos inundados permanentemente y zonas de pantanos de vegetación baja y media, los arracachales y pantanos de pastos.

Para un ejercicio más juicioso en la delimitación de los tipos de humedales se propone hacer una estratificación por zonas geográficas y por paisajes, en los que se puedan estudiar detalladamente los tipos de vegetación, la geomorfología y los regímenes de inundación.

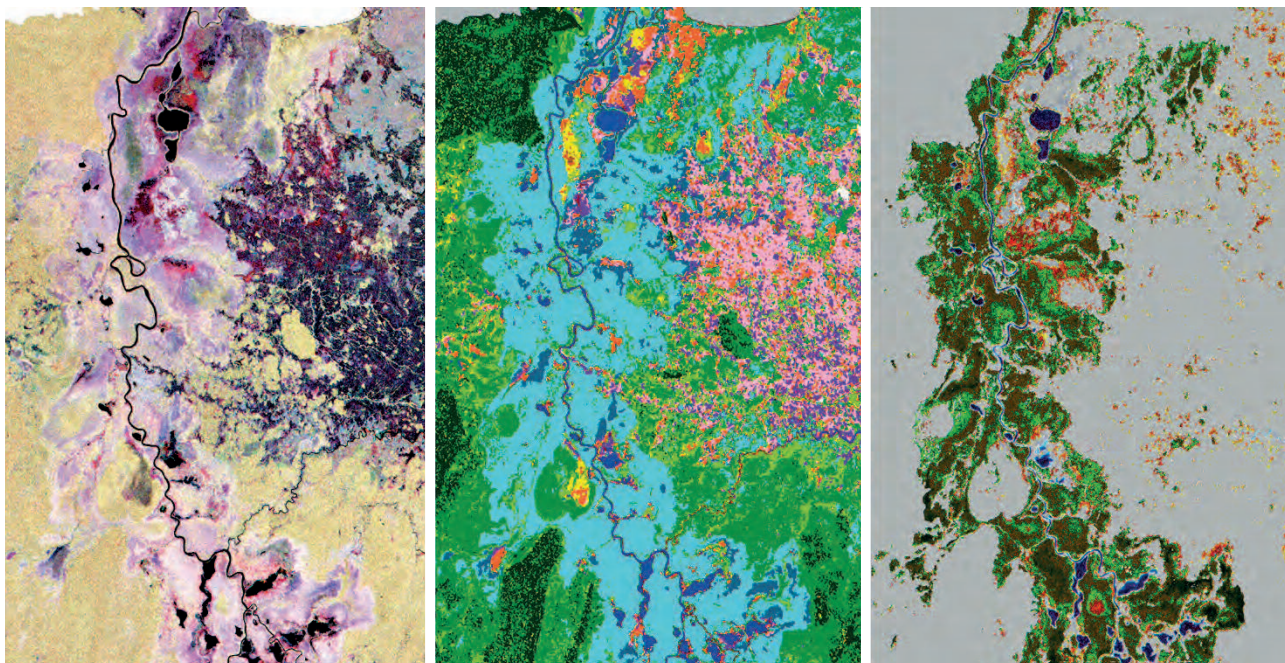


Figura 12. Ejemplo-detalle de los mapas de vegetación y el mapa de frecuencias de inundación en la región del Atrato, Chocó. Mapa de vegetación sigue la leyenda de la tabla 2 y mapa de frecuencias de inundación tonos de azul: inundación abierta (más oscuro inundado más veces); tonos amarillo-verde-rojo inundación bajo dosel (hacia rojo/café inundado más veces “pantanos”).

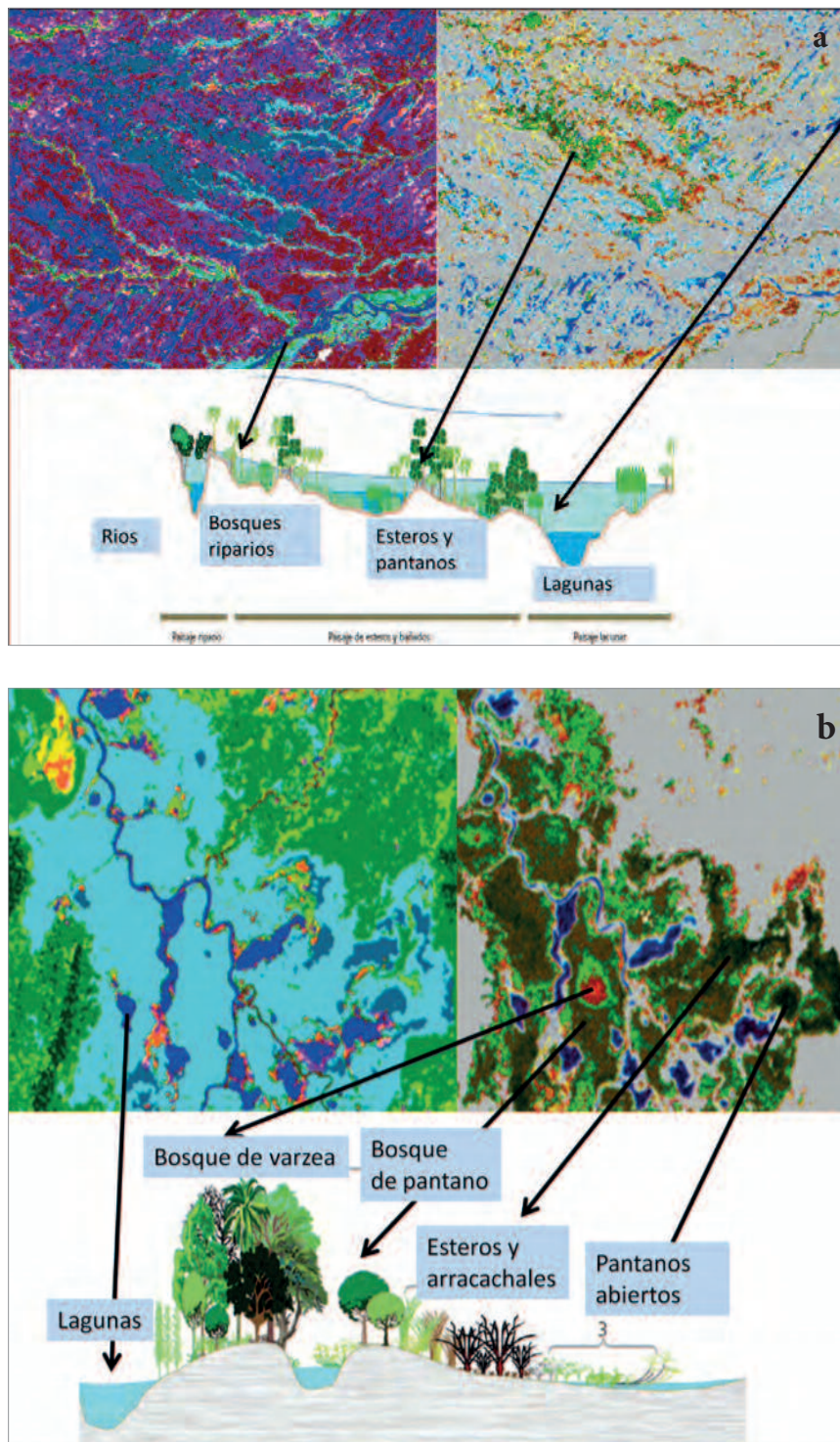


Figura 13 (a y b). Detalles de los mapas de vegetación y de frecuencias de inundación generados con radar Alos PALSAR. La combinación de la información de vegetación y la información de frecuencias de inundación ayuda a la definición de los tipos de humedales. Por ejemplo. Áreas permanentemente inundadas son zonas de pantano que pueden estar cubiertas de bosques, de palmas (esteros), o de Aráceas (arracachales) o por pastos y gramíneas.

Agradecimientos

Se agradece a JAXA a través del convenio K&C-Universidad de Wageningen y a Dirk H. Hoekman por las imágenes de radar proporcionadas para este trabajo. Este trabajo se realizó en el marco del contrato Instituto Humboldt-Ideam-SarVision 1313014368PS realizado dentro del convenio de cooperación No. 13-13-014-093CE-IAVH-(008 de 2013) entre el Ideam y el Instituto Humboldt, y el marco inter-administrativo No.13-014 (FA.005 de 2013) entre el Fondo Adaptación y el Instituto Humboldt.

Bibliografía

- Chapman, B., K. McDonald, M. Shimada, A. Rosenqvist, R. Schroeder y L. Hess. 2015. Mapping Regional Inundation with Spaceborne L-Band SAR. *Remote Sensing* 7: 5440-5470.
- Cowardin, L. M., V. Carter, F. C. Golet y T. E. LaRoe. 1979. Classification of Wetlands and deepwater habitats of the United States. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS:79/31.
- Di Gregorio y L. J. M. Jansen. 2000. Land cover classification system (LCCS): Classification Concepts and user Manual, FAO. 179 pp.
- Hess, L. L., J. M. Melack, E. M. Novo, C. C. F. Barbosa y M. Gastil. 2003. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon region. *Remote Sensing of Environment* 87: 404-428.
- Hess, L. L., J. M. Melack, D. y S. Simonett. 1990. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: A review. *International Journal of Remote Sensing* 11: 1313-1325.
- Hess, L. L., J. M. Melack, S. Filoso y Y. Wang. 1995. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 33: 896-904.
- Henry J. B., P. Chastanet, K. Fellah y Y. L. Desnos. 2006. ENVISAT multi-polarised ASAR data for flood-mapping. *International Journal of Remote Sensing* 27: 1921-1929.
- Hoekman D. H., M. Vissers y T. Tran. 2010. Unsupervised full-polarimetric SAR data segmentation as a tool for classification of agricultural areas" *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)* 3 (4): 605-617.
- Horritt, M. S., D. C. Mason y A. J. Luckman. 2001. Flood boundary delineation from synthetic aperture radar imagery using a statistical active contour model. *International Journal of Remote Sensing* 27: 1921-1929.
- Ideam. 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C. 72 pp.
- Olofsson, P., G. M. Foote, M. Herold, S. V. Stehman, C. E. Woodcock y M. A. Wulder. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment* 148: 42-57.
- Semeniuk, C. A. y V. Semeniuk. 1995. A geomorphic approach to global wetland classification". *Vegetation* 118: 103-124.
- Secretaría de la Convención de Ramsar. 2004. Manual Ramsar para el uso racional de los humedales, Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza). 124 pp.

Marcela Quiñones
Sarvision
Holanda
quinones@sarvision.nl

Martin Vissers
Sarvision
Holanda
vissers@sarvision.nl

Ana María Pacheco-Pascaza
Universidad de Leicester
Leicester, Inglaterra
ampp2@leicester.ac.uk

Carlos Flórez
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt
Bogotá, Colombia
carlos.florez@gmail.com

Lina M. Estupiñán-Suárez
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt
Bogotá, Colombia
lestupinan@humboldt.org.co

César Aponte
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt
Bogotá, Colombia
caponte@humboldt.org.co

Úrsula Jaramillo Villa
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt
Bogotá, Colombia
ujaramillo@humboldt.org.co

Claudia Huertas
Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis
Bogotá, Colombia
clauhuertas@gmail.com

Dirk Hoekman
Universidad de Wageningen
Wageningen, Holanda
dirk.hoekman@wur.nl

Un enfoque ecosistémico para el análisis de una serie densa de tiempo de imágenes de radar Alos PALSAR, para el mapeo de zonas inundadas en el territorio continental colombiano

Citación del artículo. Quiñones, M., M. Vissers, A. M. Pacheco-Pascaza, C. Flórez, L. M. Estupiñán-Suárez, C. Aponte, U. Jaramillo, C. Huertas y D. Hoekman. 2016. Un enfoque ecosistémico para el análisis de una serie densa de tiempo de imágenes de radar Alos PALSAR, para el mapeo de zonas inundadas en el territorio continental colombiano. *Biota Colombiana* 17 (Suplemento 1 - Humedales): 63-85. DOI: 10.21068/c2016s01a04

Recibido: 24 de junio de 2015
Aprobado: 17 de marzo de 2016