

# Análisis multitemporal de la frontera fluvial entre Perú y Colombia mediante análisis de imágenes satelitales basado en objetos geográficos durante el período 1989-2015<sup>1</sup>

**MULTI-TEMPORAL ANALYSIS OF THE PERU-COLOMBIA FLUVIAL BORDER BY SATELLITE IMAGES ANALYSIS BASED ON GEOGRAPHICAL OBJECTS DURING THE PERIOD 1989-2015**

ANÁLISE MULTITEMPORAL DA FRONTEIRA FLUVIAL ENTRE PERÚ E A COLÔMBIA MEDIANTE ANÁLISE DE IMÁGENS SATELITAIS BASEADO EM OBJETOS GEOGRÁFICOS DURANTE O PERÍODO 1989-2015

Leidy Quiroga Olarte<sup>2</sup>  
Martha Patricia Bohórquez<sup>3</sup>  
Luis Fernando Santa Guzmán<sup>4</sup>

Para citar este artículo: Quiroga Olarte, L., Bohórquez, M., & Santa Guzmán, L. (2020). Análisis multitemporal de la frontera fluvial entre Perú y Colombia mediante análisis de imágenes satelitales basado en objetos geográficos durante el período 1989-2015. *Perspectiva Geográfica*, 25(1), 77-98. <https://doi.org/10.19053/01233769.9377>.



**Recepción:**  
26 de abril de 2019

**Evaluación:**  
05 de marzo de 2020

**Aprobación:**  
28 de abril de 2020

## Resumen

Para este trabajo se propone una metodología semiautomatizada para el estudio de la dinámica fluvial de grandes ríos mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales basado en objetos geográficos (GEOBIA). El método brinda interoperabilidad directa con los sistemas de información geográfica, permite la cuantificación de

- 1 Investigación presentada como parte del proyecto de tesis de maestría *Análisis de detección de cambios en el espacio empleando interpretación de imágenes satelitales y estadística espacial*, desarrollado en el programa de Maestría en Geomática de la Facultad de Agronomía en la Universidad Nacional de Colombia.
- 2 Magíster en Geomática de la Universidad Nacional de Colombia. Correo: llquirogao@unal.edu.co.
- 3 Ph. D. en Ciencias Estadísticas, Universidad Nacional de Colombia. Miembro del grupo de investigación Estadística Espacial Universidad Nacional de Colombia. Correo: mpbohorquezc@unal.edu.co.
- 4 Ph. D. in Information Management, Universidade Nova de Lisboa. Miembro del grupo de investigación Estadística Espacial Universidad Nacional de Colombia. Correo: Fernando.santa@novaims.unl.pt.

la variación de las formas en superficie existentes y es eficiente en tiempo de cómputo. Los resultados obtenidos con esta metodología se verifican con datos tomados en campo. La metodología se aplica a la dinámica del río Amazonas, que ha generado conflicto entre Perú y Colombia debido a que el río fue establecido como la línea limítrofe que separa estos dos países. Los resultados muestran las repercusiones en superficie en cuanto a los cambios en las islas de arena, la erosión y la dinámica en el fondo del canal durante el período 1989-2015, causada por la carga de sedimentos y el movimiento del thalweg. En la validación con el estudio de campo se encontró un 99,2% de exactitud entre lo estimado y lo existente.

**Palabras clave:** *GEOBIA, imágenes satelitales, frontera fluvial, río Amazonas.*

## Abstract

This paper proposes a semi-automated method to study the fluvial dynamics of large rivers using multi-temporal geographic object-based image analysis (GEOBIA), which provides direct interoperability with geographic information systems, allows quantifying the variation of existing landforms, and is efficient in terms of computing time. The method is applied to the dynamics of the Amazon River, which has provoked a conflict between Peru and Colombia for being the borderline that separates both countries. The results obtained show the repercussions on its surface such as changes in sand islands and erosion, as well as the dynamics at the channel bottom during the 1989–2015 period caused by the sediment load and thalweg movement. These results are verified against data collected on field, finding 99.2% accuracy between estimates and actual figures.

**Keywords:** *GEOBIA, satellite images, fluvial border, Amazon River.*

## Resumo

Uma metodologia semi-automática é proposta para fazer este trabalho para o estudo da dinâmica fluvial de grandes rios, por meio da análise multitemporal de imagens de satélite com base em objetos geográficos (GEOBIA). O método fornece interoperabilidade direta com os sistemas de informação geográfica, permite a quantificação da variação das formas em superfície existentes e é eficiente no tempo de computação. Os resultados obtidos com esta metodologia verificam-se com os dados obtidos no campo. A metodologia é aplicada à dinâmica do rio Amazonas que têm gerado conflitos entre o Peru e a Colômbia, porque o rio Amazonas foi estabelecido como a linha de fronteira que separa estes dois países. Os resultados revelam as repercussões na superfície referente às mudanças nas ilhas de areia, a erosão e a dinâmica no fundo do rio durante o período 1989-2015, causada pela carga de sedimentos e pelo movimento da *thalweg*. Na validação com o estudo de campo, achou-se uma precisão de 99,2% entre o que foi estimado e o que existia.

**Palavras-chave:** *GEOBIA, imagens de satélite, fronteira fluvial, Rio Amazonas*

## 1. Introducción

El análisis multitemporal de un objeto sobre la superficie terrestre juega un papel importante debido a su uso práctico en aplicaciones como monitoreo forestal (Hansen & Loveland, 2012), monitoreo de desastres naturales (Hedhli, Moser, Zerubia & Serpico, 2014), análisis de la cobertura del suelo urbano (Lizarazo, 2012), estudios geomorfológicos (Ariza, Roa, Serrato, Aicardo & Rincón, 2018) y análisis espaciotemporal en la dinámica de ríos (Rozo, Nogueira & Soto, 2014; Uca Avci et al., 2014; Yang et al., 2015), entre otros.

En el caso del análisis de la dinámica de los ríos, una de las necesidades de realizar estudios multitemporales se debe a que estos fueron utilizados como líneas limítrofes entre dos jurisdicciones. Con el transcurrir del tiempo, se ha generado una problemática de pertenencia entre las partes competentes al evidenciar que las fronteras fluviales no son límites estables.

Un caso particular de esta problemática se evidencia en la frontera fluvial entre Perú y Colombia. El límite fue definido por una línea no interrumpida que une los puntos más profundos del río a lo largo de su cauce, conocida como “thalweg del Amazonas”. Según el tratado de 1922 (Muñoz Vernaza, 1928), este límite no es un elemento rígido permanente en el tiempo y en el espacio y se encuentra afectado por los cambios que se presentan continuamente en el fondo del río debido a la carga de sedimentos. El Amazonas es el río más caudaloso, profundo y largo del mundo, arrastra gran cantidad de sedimentos que modifican el fondo y se evidencian en superficie mediante la formación de islas, las cuales, al transcurrir el tiempo, han sido

invadidas por habitantes peruanos debido a que los cambios en superficie han generado que el cauce del río se corra hacia la orilla peruana, ocasionando que Colombia esté perdiendo río y acceso al puerto de Leticia, mientras que Perú está ganando río, pero perdiendo territorio. Estos hechos han generado conflictos políticos, económicos y ambientales, y aunque este asunto ha sido abordado por ambas partes mediante acuerdos, la dinámica espacial y temporal del Amazonas carece de estudios técnicos que contribuyan a estos diálogos (Novak & Namihas, 2011; Salgar Antolínez, 2014; Calle, 2018).

Una de las formas de aportar estudios técnicos es mediante el análisis de los cambios en superficie generados por cambios en el thalweg haciendo uso de imágenes satelitales. Aunque la línea profunda del río no puede ser analizada directamente mediante imágenes, la conexión entre el fondo del canal y la lámina superficial se enmarca en los cambios que genera el volumen de sedimentos en el fondo, ya que allí se generan áreas que provocan erosión. Así se van formando las islas de arena, que al alcanzar cierto tamaño se manifiestan en la superficie y son identificables y medibles mediante imágenes satelitales. El uso de imágenes satelitales es una herramienta fundamental debido a su alta frecuencia temporal, su formato digital y la visión sintética que brindan de la superficie terrestre (Chen, Zhao & Powers, 2014; Wu, Bai & Chen, 2017). Este estudio usa imágenes del programa Landsat por las ventajas que tiene su resolución espectral, ya que brinda dos infrarrojos que permiten un análisis más detallado de la separación de coberturas como suelo, agua y diferentes tipos de vegetación.

El río Amazonas ha sido objeto de varias investigaciones enmarcadas en el uso de imágenes satelitales, tales como: el estudio de la heterogeneidad de la superficie (Mertes et al., 1995), el análisis dinámico entre la isla Corea y la isla Aramosa mediante técnicas no supervisadas (Rozo & Soto, 2009), y el análisis de cambios superficiales (zona Colombia) durante un periodo de veinte años (Rozo et al., 2014). Estos estudios usaron técnicas basadas en análisis de tonos y luminosidad de los niveles digitales. Se centran en los valores espectrales y en su mayoría ignoran el contexto de vecindad (Li, Zang, Zhang, Li & Wu, 2014; Uca Avci et al., 2014).

Autores como Rozo et al. (2014) indican que la exactitud de la estimación temática depende de la técnica utilizada. Así, nuestra propuesta es desarrollar una metodología de análisis de imágenes satelitales basado en objetos geográficos (GEOBIA) para el estudio multitemporal de la dinámica de cuerpos de agua que contribuya a esclarecer los conflictos fronterizos.

Específicamente, esta metodología se centra en el análisis superficial de grandes ríos que presentan cambios en planta causados por la carga de sedimentos que se evidencian en la superficie a través del aumento de área de las islas de arena existentes, así como de la aparición de islas nuevas. Las metodologías utilizadas para la caracterización morfológica se han realizado mediante la estimación del comportamiento de un río usando modelos hidráulicos, los cuales pueden ser matemáticos, físicos e híbridos (Ramírez, Bocanegra & Sandoval, 2006). Estos modelos pueden sobreestimar las tasas de migración real, ya que asumen los parámetros hidráulicos como constantes, lo que en la realidad no sucede y alteraría los resultados obtenidos (Abad

& Garcia, 2006; Baar, Boechat Albernaz, van Dijk & Kleinans, 2019).

La literatura revisada evidencia estudios que implementan diferentes técnicas para evaluar la dinámica activa presente en la evolución morfológica del río (Davies & Robins, 2017). Sin embargo, los métodos encontrados no presentan la exactitud temática y las mayores desventajas hacen referencia a los fuertes eventos climáticos que generan pérdida de información en los aspectos morfológicos en el tiempo, lo cual crea la necesidad de realizar control de campo y en ocasiones el acceso a los sitios de estudio no es fácil. El uso de imágenes satelitales permite conocer muchos aspectos de la evolución de la movilidad del canal a lo largo de la historia, así como estimar las tasas de erosión en las bancas (López, 2011).

El método de GEOBIA integra parámetros geométricos, espectrales y de vecindad alrededor de un objeto formado por un grupo de píxeles que contienen información homogénea. Este método permite modelar la superficie terrestre mediante el análisis espacial, topológico y jerárquico de los datos. Su principal diferencia con los métodos espectrales hace referencia al cambio en la estructura de los datos a procesar, ya que su unidad de medida no es un píxel, sino una agrupación de píxeles que genera regiones que representan el paisaje (Uca Avci et al., 2014; Ma et al., 2017).

Hasta ahora, el enfoque principal de GEOBIA ha sido en imágenes de alta resolución espacial. Sin embargo, en este estudio se implementó sobre imágenes de resolución media como las del programa Landsat, ya que el uso de la clasificación de imágenes en un entorno de GEOBIA permite mejorar la precisión en la exactitud temática (Aguirre, Seijmonsbergen & Duivenvoorden, 2012).

El GEOBIA puede realizarse mediante varias opciones de clasificación, como reglas difusas, máquinas de soporte de vectores (SVM), clasificador bayesiano y clasificador de árboles aleatorios, entre otros. El sistema clasificador difuso ha recibido particular atención porque permite realizar un análisis semántico que involucra la forma como la mente humana toma decisiones (Aksoy & Ercanoglu, 2012; Shah & Vayada, 2014; Ojaghi, Ahmadi & Ebadi, 2016).

Este sistema es de utilidad en el análisis de la superficie de los ríos, ya que la forma tradicional de analizar las formas en planta de un río y su entorno es por medio de métodos manuales mediante la interpretación de fotografías aéreas; esta aproximación consume tiempo y los análisis dependen de las decisiones del intérprete, lo cual induce subjetividad en los resultados (Drăguț & Blaschke, 2006; Saadat et al., 2008; Roza et al., 2014). En consecuencia, para darle mejor uso a los insumos satelitales de resolución media y para optimizar los procesos de interpretación, el objetivo principal de este trabajo consistió en la implementación de la metodología GEOBIA para el análisis multitemporal de fronteras fluviales. Específicamente, se aplicó a la frontera fluvial entre Perú y Colombia. La reconstrucción del comportamiento del río se realizó cada diez años en un periodo de 26 años comprendidos entre 1989 y 2015. Expertos en geomorfología fluvial especifican que en una década se evidencian cambios significativos causados por la acción del agua y recomiendan que el periodo de estudio de la dinámica de un río sea de aproximadamente 30 años, ya que en este tiempo es posible determinar la movilidad y la estabilidad de un cauce teniendo en cuenta la variación del nivel de agua (Vargas, 2012).

## 2. Metodología

El desarrollo metodológico se llevó a cabo en cinco etapas. En la primera etapa se realizó la descripción de la zona de estudio y la segunda se refiere a la adquisición, la descripción de las imágenes satelitales y la forma como fueron elegidas de acuerdo con las particularidades de la zona de estudio. En la tercera etapa se encuentra el procesamiento básico, como el recorte de las imágenes, la transformación Tasseled Cap, la clasificación no supervisada, el trabajo de campo y el trabajo de oficina posterior a la visita de campo. En la cuarta etapa se implementó el método GEOBIA mediante un sistema clasificador difuso y por último se evaluó la exactitud del método. En la quinta etapa se realizó el análisis multitemporal con los resultados obtenidos en la clasificación, se presentaron las bondades del método y se discutieron los resultados.

El área de estudio se localiza en el extremo sur de Colombia, en el departamento del Amazonas, entre los municipios de Leticia y Puerto Nariño (Figura 1). Esta zona se caracteriza por ser una frontera fluvial, ya que aguas arriba tiene un alcance en el territorio peruano (Santa Rosa y Caballococha) y aguas abajo tiene alcance en Tabatinga, Brasil. En este sector, el río tiene una longitud de 110 km y se encuentra definido por un sistema multicanal con canales principales y secundarios. Los canales son rectos y sinuosos y el ancho del río en el canal principal varía entre uno y 4,4 km (Roza et al., 2014). La zona se encuentra cubierta en su totalidad por selva tropical, compuesta por llanuras aluviales bajas, planas e inundables que presentan diferencias en su morfografía dependiendo de la estación, seca o lluviosa. El régimen de lluvias en la zona, según los registros de las estaciones me-

teorológicas de Puerto Nariño y Parque Amacayacu del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), es esencialmente unimodal, con una precipitación media multianual

de 3.307 mm. La temperatura media en la región es de 25,3 °C, con una mínima promedio de 21,5 °C y una máxima promedio de 30,2 °C (González, 2005; Corpoamazonia, 2014).

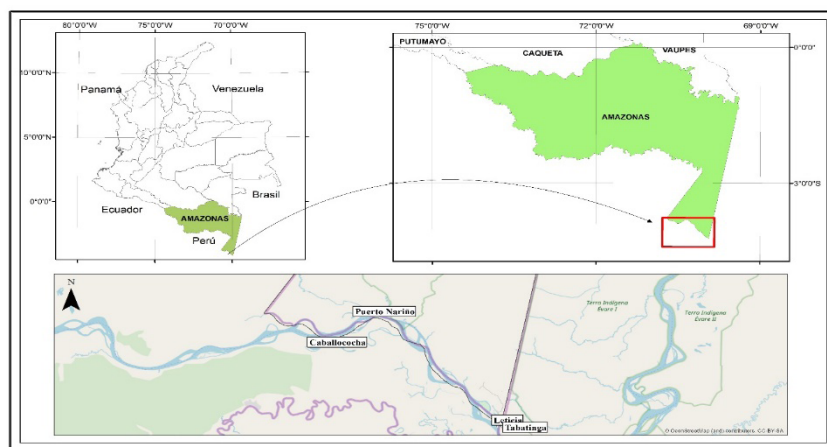


Figura 1. Localización del área de estudio, límite fluvial Perú-Colombia (río Amazonas)









Fuente: elaboración propia.

Las imágenes adquiridas fueron obtenidas por el programa Landsat con los sensores TM 5 y OLI-TIRS. Estas imágenes se caracterizan por tener una resolución espacial de 30 metros para las bandas multiespectrales y 15 metros para la banda pancromática. Las escenas se encontraron en Earth Explorer (2016), del Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey [USGS]), que brinda la opción de descargar las imágenes con un preprocesamiento nivel 1 (L1T), que indica corrección radiométrica y geométrica (USGS, 2016). Además, se encuentran con corrección atmosférica aparente, es decir que los valores de los niveles digitales hacen referencia a la reflectancia, información necesaria para el análisis

de las medidas físicas de las coberturas (Chuvieco, 2016). Cada imagen satelital se transformó al sistema de referencia espacial (Magna-Este), según el estándar oficial.

Posterior a la adquisición de las imágenes, se procedió a su organización de acuerdo con las fluctuaciones del nivel de agua establecidas por el régimen de lluvias en la zona de estudio. Según los registros de los niveles medios anuales de las estaciones hidrométricas (Nazareth y Puerto Nariño), los valores más bajos se presentan en los meses de agosto, septiembre y noviembre y los máximos de enero a julio. Con base en esta información, en la Tabla 1 se relaciona las imágenes por década según el nivel de agua.

**TABLA 1. IMÁGENES SEGÚN NIVEL DE AGUA DEL RÍO AMAZONAS**

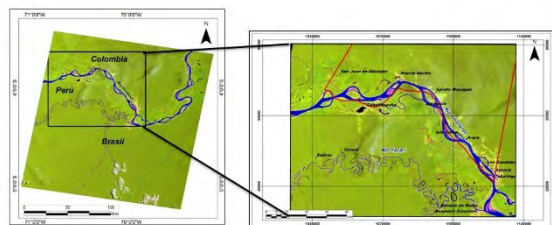
Niveles de agua bajos		Niveles de agua altos	
Sensor TM 5			
Sep. 13, 1989		Jun. 28, 1990	
			
Sensor TM 5			
Ago. 5, 1998		Jun. 18, 1998	
			
Sensor TM 5			
Sep. 28, 2006		Jun. 24, 2006	
			
Sensor OLI			
Ago. 4, 2015		Jul. 3, 2015	
			

Fuente: elaboración propia.

## 2.1. Procesamiento básico

Con cada imagen relacionada en la Tabla 1 se realizó la delimitación o corte de interés con el cual

se hizo el procesamiento digital. En la Figura 2 se presenta el recuadro con la delimitación de la zona de interés sobre la cual se realizó el análisis del río Amazonas.



**Figura 2.** Recorte del área de procesamiento

Fuente: elaboración propia.

Se escogió esta área porque el río tiene un ancho de aproximadamente 4 km y la llanura de inundación puede llegar a ser de 10 km. Este contexto regional permite analizar la variabilidad del entorno asociado a la dinámica del río, como la vegetación y los sistemas lagunares. Con base en el recorte de cada imagen se realizó la transformación Tasseled Cap, la cual genera bandas artificiales mediante la combinación lineal de las bandas originales de la imagen con el objeto de discriminar o realzar rasgos temáticos. Esta transformación reduce el volumen de datos espectrales a tres bandas principales: brillo, verdor y humedad; las demás bandas resultantes contienen el ruido y las influencias atmosféricas de la imagen como nubes, niebla y diferencias de ángulo, entre otros (Chuvieco, 2016). Se decidió trabajar sobre Tasseled Cap porque el uso de la información completa puede generar redundancia espectral y afectar los resultados finales, y utilizar de tres a cinco bandas espectralmente contrastantes es más que suficiente para una clasificación no supervisada (Posada, Ramírez Daza & Espejo, 2012). En este proceso fue necesario realizar una reclasificación de cada imagen, unificando las clases que brindaban información redundante o

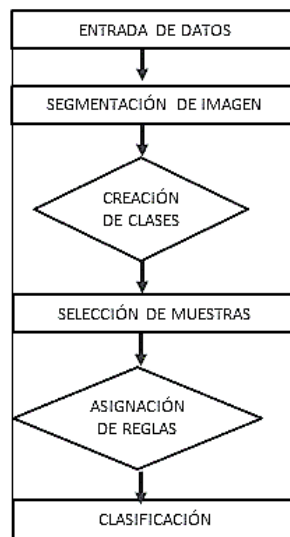
imprecisa. Los resultados obtenidos en las clasificaciones no supervisadas se emplearon en la visita de campo.

El trabajo de campo se formuló de acuerdo con dos objetivos principales: 1) identificar las islas existentes en el tramo de interés del río Amazonas y 2) adquirir puntos georreferenciados y sustentados mediante fotografías terrestres para la definición de las áreas de entrenamiento. La salida se llevó a cabo los días 25 y 26 de septiembre de 2016. Los municipios de Leticia y Puerto Nariño se escogieron como sedes de instalación teniendo en cuenta que estos sitios cuentan con la estructura física para hospedaje y elementos que facilitan la recolección de datos. Como actividad final de la tercera etapa, se espacializó la información obtenida en campo y se definieron las clases de entrenamiento para la implementación del método mediante el clasificador experto difuso de GEOBIA.

## 2.2. Clasificador experto difuso en el GEOBIA

En la implementación del clasificador experto difuso se siguió el flujo de trabajo presentado en el esquema de la Figura 3. En primer lugar, se ingresaron las bandas B2 (verde), B3 (roja), B4 (infrarrojo cercano 1), B5 (infrarrojo cercano 2), banda TSC1 (brillo), banda TSC2 (verdor), banda TSC3 (humedad), índice de vegetación e índice de humedad. A continuación se realizó el proceso de segmentación de cada imagen analizada, el cual convierte los datos de entrada en objetos.





**Figura 3.** Flujo de trabajo del método clasificador experto difuso de GEOBIA  
 Fuente: elaboración propia.

El algoritmo utilizado para la creación de objetos se denomina segmentación a múltiples resoluciones, se encuentra disponible en el software eCognition y utiliza tres parámetros principales: 1) escala, 2) forma y 3) compacidad. El parámetro de escala determina el tamaño de cada objeto creado, mientras que los parámetros de forma y compacidad determinan la forma de los objetos. Los parámetros asignados en este estudio fueron: escala 15, criterio de forma 0.3 y criterio de compacidad 0.7. Según la literatura que involucra métodos de segmentación en imágenes Landsat (Al Fugara, Pradhan & Mohamed, 2009; Aksoy & Ercanoglu, 2012), se establece el parámetro de escala mediante análisis visual, mientras que Maxwell (2011) destaca que un valor bajo en el parámetro de forma permite hacer énfasis en el criterio de color y un valor alto de compacidad da como resultado límites de objetos más compactos. Una vez generados los objetos de cada imagen a clasificar,

y con base en la información de campo, se definieron las clases de entrenamiento nombradas, así: 1) bosque denso alto de tierra firme; 2) bosque denso alto inundable heterogéneo; 3) cauce principal; 4) lagos y lagunas; 5) mosaico de cultivos; pastos y espacios naturales; 6) tejido urbano; 7) vegetación secundaria y 8) zonas arenosas. En algunas fechas se crearon las clases 9) nubes y 10) sombras debido a las condiciones atmosféricas. Una vez definidas, se seleccionaron muestras por clase en la imagen a clasificar.

El siguiente proceso consistió en la asignación de reglas difusas teniendo en cuenta las características particulares entre la relación espectral y las coberturas. Por ejemplo, para la clase cuerpos de agua se involucraron dos bandas del espectro visible (B2 y B3, verde y roja respectivamente) y un índice de humedad, mientras que para el caso de la vegetación se tuvieron en cuenta dos bandas del infrarrojo (B4 y B5, infrarrojos cercanos) y la información de brillo, verdor y humedad resultante de la transformación Tasseled Cap. Para optimizar la combinación de las reglas o condicionantes por clase se usa la herramienta feature space optimization disponible en eCognition, basándose en el cálculo de la mejor combinación de reglas según la cobertura (Aminipouri, Sliuzas & Kuffer, 2009).

Una vez evaluadas todas las reglas por clase, se realizó la clasificación de los objetos mediante el método del vecino más cercano. Así, entre más cerca se encuentra un objeto de la muestra seleccionada, mayor es su pertenencia, y entre más lejos se encuentra, menor es su pertenencia (Wei, Chen & Ma, 2005).

Una vez obtenida la clasificación se procede con la evaluación de la exactitud temática. Esta se refiere a la concordancia entre la imagen clasificada y lo existente en el terreno (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2014). Esta validación se realiza comparando la clasificación GEOBIA con las áreas de entrenamiento que se encuentran realmente en la zona de estudio. Finalmente, con la reconstrucción temática de cada imagen se realiza el análisis multitemporal.

### 3. Resultados

A continuación se presentan los resultados de los pasos sistemáticos propuestos. La metodología se ilustra para la imagen que corresponde a septiembre de 1989. Sin embargo, cada proceso fue replicado en cada fecha de análisis. La Figura 4 representa la agrupación espectral, producto de la clasificación no supervisada realizada sobre la transformación Tasseled Cap.

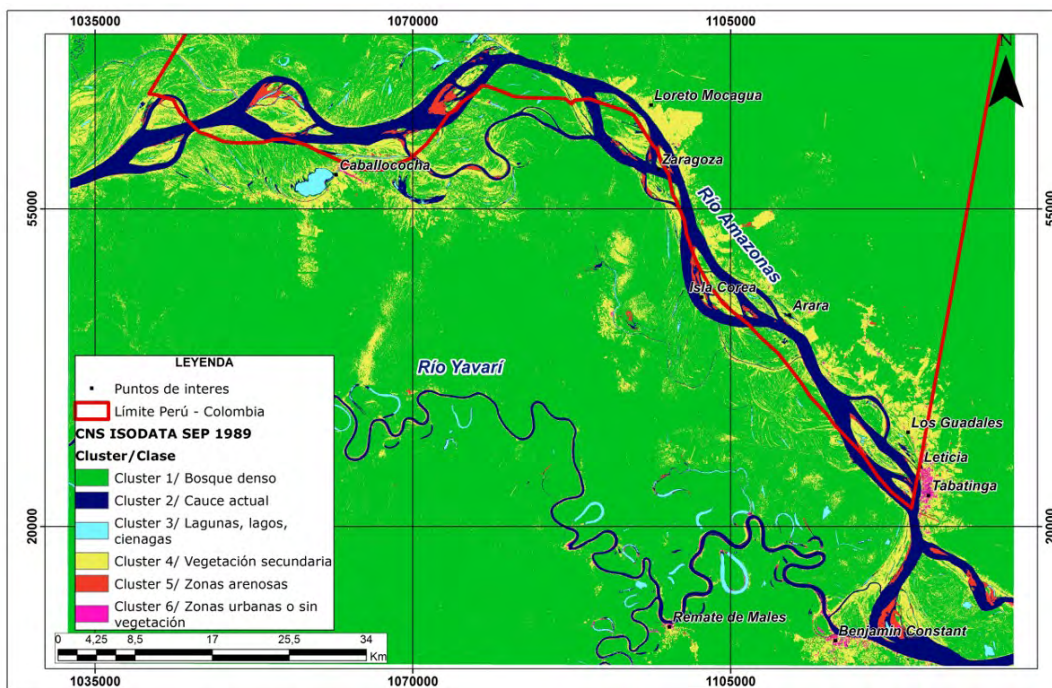


Figura 4. Clasificación no supervisada

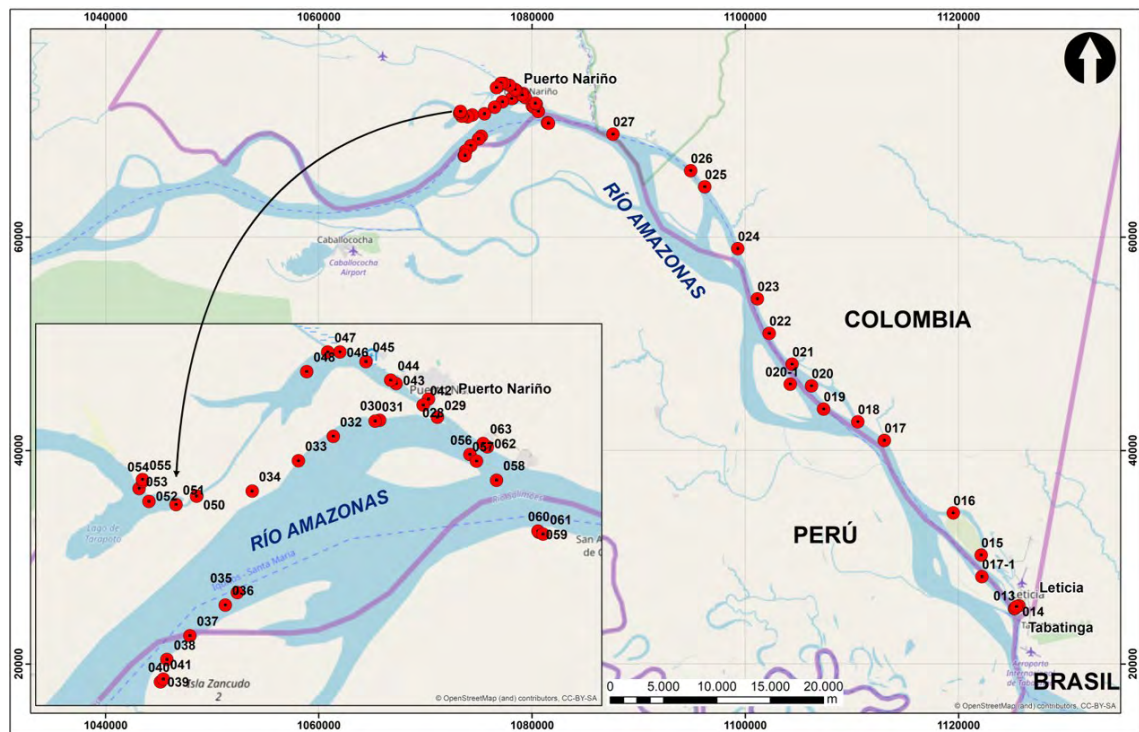
Fuente: elaboración propia.

Esta clasificación muestra grupos temáticos que permiten conocer a priori las coberturas existentes en la zona de estudio; en este mapa se evidencia de forma clara el cauce actual del río y algunos cuerpos de agua como lagunas. La clase bosque se representa de forma general, sin jerarquizar los diferentes tipos, y de igual forma sucede con la vege-

tación; el método no categoriza esta cobertura. En cuanto a las zonas urbanas y las zonas arenosas, el método genera mezcla de estas coberturas. Sin embargo, aunque la información es muy general y presenta mezcla, el mapa es un insumo útil previo y durante el trabajo de campo.

Con este mapa en campo se confirma cada agrupamiento espectral y se identifican las coberturas que el método no supervisado no identifica. Durante el trabajo de campo se recorrieron 97 aproximadamente en lancha sobre el tramo de interés del río Amazonas. En la Figura 5 se visualizan las estaciones georreferenciadas, las cuales contienen información de las islas fluviales y de las cober-

turas asociadas al entorno biofísico (suelo, agua y vegetación); esta información se obtuvo mediante registro de coordenada y sustento fotográfico. Posterior al trabajo de campo, estas estaciones sirvieron como base para la definición de las clases y la selección de las áreas de entrenamiento relacionadas en la Tabla 2.


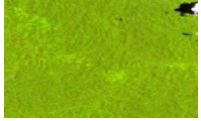

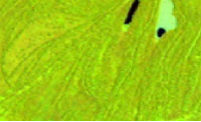





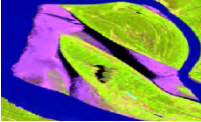

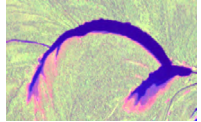




**Figura 5.** Mapa de estaciones de campo  
Fuente: elaboración propia.

Una vez definidas e identificadas las clases temáticas, se generaron los objetos para cada imagen a clasificar. Este proceso de segmentación en cada imagen creó objetos homogéneos, de tamaños similares y diferenciados por variabilidad espectral y geométrica. Para el caso de estudio, la segmenta-

ción delinea el contorno del río y otros cuerpos de agua según sus formas geométricas y compactas. Teniendo en cuenta la definición de las clases, según la Tabla 2, estas se seleccionan en la imagen segmentada como áreas de entrenamiento.







TABLA 2. DEFINICIÓN DE CLASES Y ÁREAS DE ENTRENAMIENTO

Cobertura	Fotografía	Clase en imagen satelital
Bosque denso		
Bosque inundable		
Vegetación secundaria		
Cauce principal (río)		
Mosaico de cultivos y pastos		
Zonas pantanosas		
Lagunas, lagos y ciénagas naturales		
Tejido urbano		

Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso consiste en la definición del conjunto de reglas de clasificación por clase. En la Tabla 3 se relacionan las reglas asignadas.

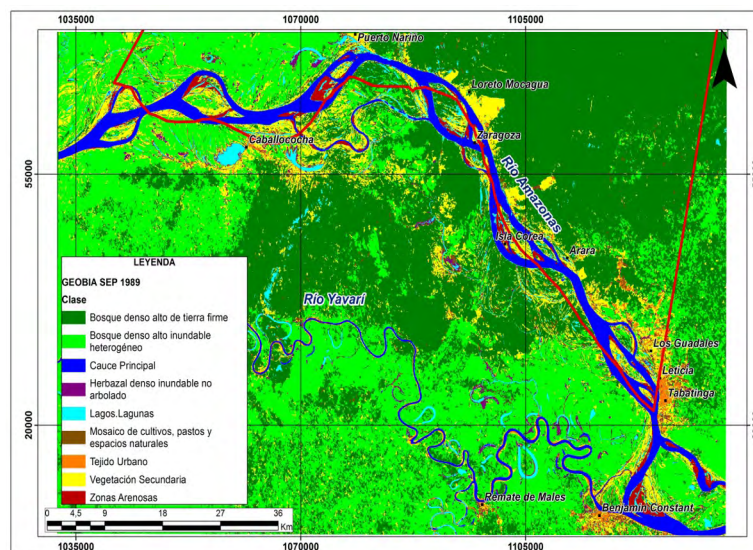
**TABLA 3. ASIGNACIÓN DE REGLAS**

Clase	Regla difusa	Descripción
Vegetación, tejido urbano y zonas arenosas	 <b>and (min)</b>  <b>nearest neighbor</b>	
	Mean TSC1	Promedio Tasseled Cap-brillo
	Mean TSC3	Promedio Tasseled Cap-humedad
	Mean NDVI	Promedio índice de vegetación
	Mean B4	Promedio banda infrarrojo cercano 1
	Mean B5	Promedio banda infrarrojo cercano 2
Cauce principal, lagos y lagunas	 <b>and (min)</b>  <b>nearest neighbor</b>	
	Mean NDWI	Promedio índice de humedad
Promedio banda verde	Mean B2	Promedio banda verde
	Mean B3	Promedio banda roja
Nubes y sombras	 <b>and (min)</b>  <b>nearest neighbor</b>	
	Mean TSC1	Promedio Tasseled Cap-brillo
	Mean TSC2	Promedio Tasseled Cap-verdor
	Mean TSC3	Promedio Tasseled Cap-humedad

**Fuente:** elaboración propia.

Una vez que las áreas de entrenamiento han sido seleccionadas y evaluadas las reglas, la asignación de cada objeto a una clase determinada se realiza

mediante el método del vecino más cercano. En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos del clasificador experto difuso utilizado en el GEOBIA.



**Figura 6.** Resultados de la clasificación del método experto difuso utilizado en el GEOBIA

Fuente: elaboración propia.

Con estos resultados, se evidencia que el método brinda jerarquización en las clases temáticas, discrimina dos tipos de bosques y al menos tres tipos de vegetación. Las zonas arenosas o barras de arena asociadas al río y la vegetación secundaria se interpretan mejor en la temporada baja del río, mientras que el cauce actual y las zonas lagunares se interpretan mejor en las imágenes de niveles altos del río. Por otra parte, mediante GEOBIA la información de las coberturas analizadas en cada periodo se almacena directamente en un sistema de información geográfica (SIG), optimizando así los procesos de digitalización, análisis y administración de datos alfanuméricos. Además, se tiene disposición de consulta del comportamiento del río para cada fecha de análisis.

Por último, se evaluó la precisión de la exactitud temática mediante la comparación entre las áreas de entrenamiento obtenidas en campo y las categorías resultantes de cada imagen clasificada. Originalmente se identificaron once clases, pero con base en las condiciones atmosféricas se generaliza cada clasificación en cinco grupos principales: 1) cuerpos de agua; 2) bosque denso alto de tierra firme; 3) bosque denso alto inundable heterogéneo; 4) vegetación secundaria y 5) zonas arenosas. Con esta información se genera una matriz de confusión (Tabla 4) que presenta los conflictos entre las categorías existentes en superficie (filas) y las categorías estimadas mediante el método (columnas). Con base en la matriz de confusión se obtienen medidas estadísticas como el porcentaje de exactitud global, el cual relaciona los elementos

de la diagonal con el total de las áreas muestreadas. Este porcentaje obedece únicamente a una estimación basada en las áreas de entrenamiento. Para este caso, el porcentaje de exactitud global es de 99,6%. Sin embargo, este análisis no involucra la distribución aleatoria de los datos ni las relaciones múltiples entre las distintas clases. Uno

de los índices utilizados para este objetivo es el estadístico Kappa (Congalton, 1991), el cual mide el grado de ajuste del mapa deducido o clasificado prescindiendo del causado por factores aleatorios. Para este caso, el índice Kappa es del 99,2%. Este porcentaje indica una alta confiabilidad en el método para análisis e interpretaciones.

TABLA 4. MATRIZ DE CONFUSIÓN

Matriz de confusión, método GEOBIA, imagen septiembre 1989

Clases	Cuerpos de agua	Bosque denso alto de tierra firme	Bosque denso alto inundable heterogéneo	Vegetación secundaria	Zonas arenosas
Cuerpos de agua	99,86	0,11	0,41	0,55	37,89
Bosque denso alto de tierra firme	0,1	99,47	1,01	2,33	58,39
Bosque denso alto inundable heterogéneo	0,03	0,32	97,62	1,81	0
Vegetación secundaria	0,01	0,1	0,97	95	3,73
Zonas arenosas	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

### 3.1. Análisis multitemporal

Con el clasificador experto difuso utilizado en el GEOBIA se obtuvieron capas vectoriales de las geofomas asociadas al sistema del río objeto de estudio, principalmente islas, bancos de arena, cauce del río y llanura de inundación para cada una de las imágenes en niveles de agua bajos y niveles de agua altos. La Figura 7 y la Figura 8,

conjuntamente, permiten inferir la dinámica del río en cada régimen de lluvias. Si se realiza un primer análisis, la vista en planta evidencia variaciones en la migración del cauce del río o en las márgenes de este en las zonas donde ocurre erosión o deposición. Durante las épocas de sequía los canales son nuevamente erodados, mientras que en épocas de inundación las terrazas e islas crecen por deposición de materiales.

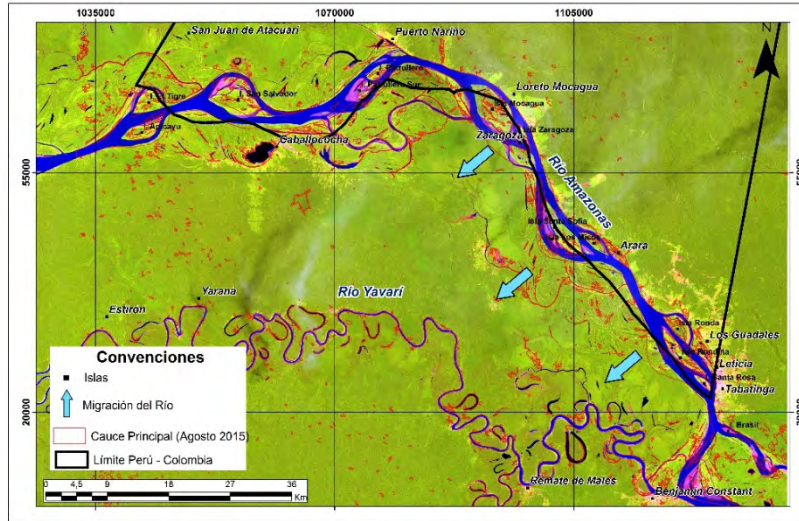


Figura 7. Dinámica del cauce principal, 1989-2015, nivel de agua bajo

Fuente: elaboración propia.

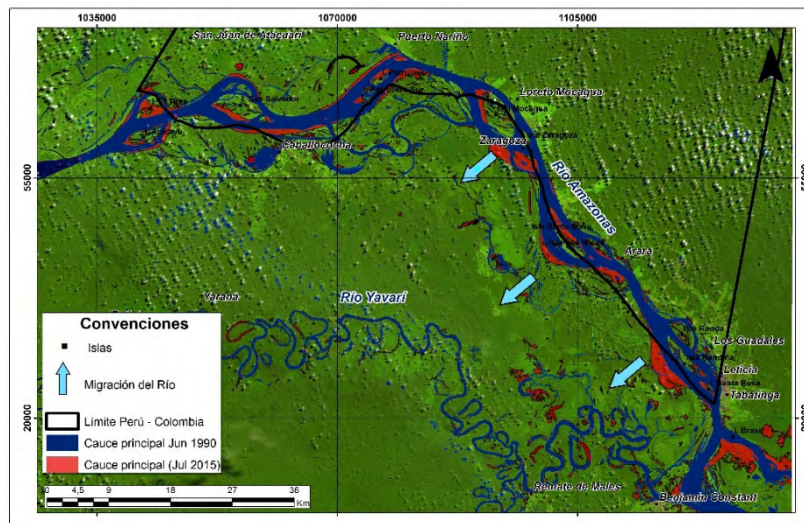


Figura 8. Dinámica del cauce principal, 1989-2015, nivel de agua alto

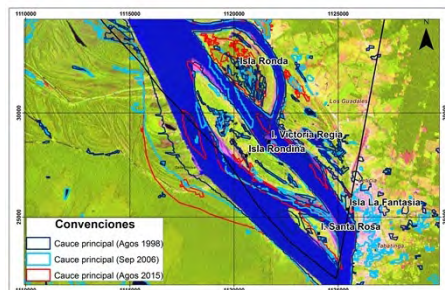
Fuente: elaboración propia.

La variabilidad climática en la zona de estudio provoca que algunas de las islas puedan crecer constantemente. Por ejemplo, si el retorno de un invierno tiene menos fuerza la erosión se reduce,

pero si el flujo de fondo tiene suficiente energía arrastra material grueso. El cambio de las dimensiones del cauce actual se analiza calculando las áreas de las islas del río en  $\text{km}^2$  para cada momento



del análisis. Cada isla responde a las condiciones de su entorno y las variables que definen su comportamiento están relacionadas con el régimen de lluvias, por ejemplo, la geometría del valle aluvial, el sustrato sobre el cual se localiza el río y el aporte de sedimento, entre otras (Charlton, 2007). El análisis local se ilustra con la isla Rondiña. La Figura 9 visualiza la migración del cauce principal cada diez años y evidencia un desplazamiento promedio aproximado de 700 metros por década.



**Figura 9.** Análisis multitemporal de la isla Rondiña, nivel de agua bajo  
**Fuente:** elaboración propia.

Estas variaciones pueden estar asociadas a que el río Amazonas está cambiando constantemente su cauce principal. En este sector se observa que el río está erosionando hacia el sur, aumentando su cauce. Del lado norte se observa que el comportamiento es constante. Este desplazamiento evidencia el conflicto diplomático entre Perú y Colombia al no haber claridad en la pertenencia del río. La isla Rondiña, en el año 1989, pertenecía 100% a Colombia; 30 años después, el 10% de la isla le pertenece a Perú y los resultados indican que el río puede continuar su migración con el transcurrir del tiempo. El análisis multitemporal se debe realizar isla por isla debido a sus características y entornos diversos. El análisis realizado evidencia que nin-

gún trayecto del río es estable (Rozo et al., 2014; Quiroga, 2018).

## 4. Conclusiones

La metodología genera resultados en formato vectorial acerca del comportamiento en área de las clases definidas, para cada una de las fechas. Este método no se limita a la generación geométrica del contorno de estas formas en superficie, sino que además delinea el sistema lagunar de cada isla generada por la dinámica del thalweg, como paleocauces, lagunas semilunares y líneas divagantes. Obtener estos elementos asociados a la acción del agua de forma semiautomatizada optimiza el tiempo en cuanto a digitalización y brinda un mejor acercamiento a las formas que componen cada isla.

Aunque existen ciertos análisis obvios del comportamiento asociado a la energía del río presente en cada nivel de agua que no necesitarían de un método de clasificación de imágenes para deducir el comportamiento, el uso del método brinda la disposición en la información que representa la reconstrucción del río en cada período de análisis y permite calcular la tasa de cambio entre una década y otra, con el fin de determinar la razón de cambio y el desplazamiento de estas geoformas.

Como caso de estudio, se aplica la metodología propuesta al conflicto de la frontera limítrofe entre Colombia y Perú definiendo clases como cauce actual e islas para cada una de las fechas. Se observó que el río Amazonas está cambiando constantemente su cauce principal. Con base en el espectro amplio en el infrarrojo y la erosión que presentan los meandros, se determinó que el río está erosionando hacia el sur y aumentando su cauce. Sin

embargo, del lado norte se observa que el comportamiento es constante.

Esto quiere decir que el río está migrando hacia Perú, ocasionado que esta población se posea ilegalmente en las islas asociadas al río. Por tal motivo, en los diálogos entre Perú y Colombia referentes a nuevos acuerdos para definir el límite territorial se deben tener en cuenta los estudios superficiales en la zona, ya que la dinámica en planta es respuesta a lo que ocurre en el fondo del río. Para ello se recomienda el análisis en detalle por isla, ya que en este estudio se evidenció que cada isla es un subsistema individual que responde a las condiciones de su entorno, como la geometría del valle aluvial, el régimen de lluvias, el sustrato y el aporte de sedimentos, entre otros. Con base en lo anterior, se concluye que el río no presenta un patrón estable en el recorrido del tramo que define el límite fluvial entre los dos países. Una opción para que ambos países tengan claridad territorial es contemplar el límite como la mediatriz del río; esto permitiría solucionar los conflictos políticos, económicos y ambientales.

Finalmente, es importante destacar que las imágenes satelitales permiten detectar cambios en la forma y la dirección de un río a lo largo del tiempo, ciertas características de la vegetación circundante

y de la corriente, como su velocidad y potencia, estimar el volumen de precipitación para determinar regímenes de lluvia, cuando estas imágenes han sido validadas con pluviómetros en campo, y detectar construcciones hechas por el hombre que puedan afectar el flujo natural del río y así, a largo plazo, provocar modificación en su trayectoria.

Estos resultados son un apoyo importante para la realización de un análisis sinóptico en planta, dado que los cambios observados en superficie en gran parte se deben a los cambios ocurridos en el fondo del río. Sin embargo, se requieren estudios específicos en el fondo para determinar las geoformas y cómo la erosión las está afectando, identificar bancos de piedra y arena, volumen y clase de sedimentos transportados, cuantificar la intensidad de la fricción y la erodabilidad, entre otros. Por ejemplo, los estudios hidráulicos permiten incorporar las características batimétricas en el análisis del perfil del río y así describir de manera más precisa los cambios en el thalweg generados por la sedimentación del río. Tener acceso a este tipo de información permitiría determinar, describir y caracterizar diferentes comportamientos del relieve y sus dinámicas en el fondo del río para generar modelos que relacionen esta información con la transformación de la superficie.



## Referencias

- Abad, J. & Garcia, M. (2006). RVR Meander: A toolbox for re-meandering of channelized streams. *Computers & Geosciences*, 32(1), 92-101.
- Aguirre, J., Seijmonsbergen, A. C. & Duivenvoorden, J. F. (2012). Optimizing land cover classification accuracy for change detection, a combined pixel-based and object-based approach in a mountainous area in Mexico. *Applied Geography*, 34, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.10.010>.
- Aksoy, B. & Ercanoglu, M. (2012). Landslide identification and classification by object-based image analysis and fuzzy logic: An example from the Azdavay region (Kastamonu, Turkey). *Computers and Geosciences*, 38(1), 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.05.010>.
- Al Fugara, A. M., Pradhan, B. & Mohamed, T. A. (2009). Improvement of land-use classification using object-oriented and fuzzy logic approach. *Applied Geomatics*, 1(4), 111-120. <https://doi.org/10.1007/s12518-009-0011-3>.
- Aminipouri, M., Sliuzas, R. & Kuffer, M. (2009). Object-Oriented Analysis of Very High Resolution Orthophotos for Estimating the Population of Slum Areas, A Case of Dar-Es-Salaam, Tanzania. *ISPRS Archives*, 38 (1-4-7/W5), Conference Paper. Recuperado de [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/1\\_4\\_7-W5/](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/1_4_7-W5/).
- Ariza, A., Roa, O., Serrato, P., Aicardo, H. & Rincón, L. (2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Perspectiva Geográfica*, 23(1), 105-122.
- Baar, A., Boechat Albernaz, M., van Dijk, W. & Kleinhans, M. (2019). Critical dependence of morphodynamic models of fluvial and tidal systems on empirical downslope sediment transport. *Nature Communications*, 10(1), 4903. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12753-x>.
- Calle, H. (14 de julio de 2018). La movediza frontera de Perú y Colombia. *El Espectador*. Recuperado de <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/la-movediza-frontera-de-peru-y-colombia-articulo-800173>.
- Charlton, R. (2007). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London: Routledge.
- Chen, G., Zhao, K. & Powers, R. (2014). Assessment of the image misregistration effects on object-based change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.10.007>.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35-46.
- Corpoamazonia. (2014). Plan de manejo ambiental de la quebrada Yahuaraca, municipio de Leticia, departamento de Amazonas.

- Davies, A. & Robins, P. (2017). Residual flow, bedforms and sediment transport in a tidal channel modelled with variable bed roughness. *Geomorphology*, 295, 855-872.
- Drâgut, L. & Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81, 330-344. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013>.
- Earth Explorer, U. E. (2016). USGS EarthExplorer. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- González, M. (2005). La zona de integración fronteriza (ZIF) colombo - peruana un esfuerzo por atender la realidad. *Aldea Mundo, Revista Sobre Fronteras e Integración*, 10(18), 29-35. Recuperado de <http://www.saber.ula.ve/db/ssaber/Edocs/pubelectronicas/aldeamundo/ano10num18/articulo3.pdf>.
- Hansen, M. C. & Loveland, T. R. (2012). A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024>.
- Hedhli, I., Moser, G., Zerubia, J. & Serpico, S. B. (2014). Fusion of multitemporal and multiresolution remote sensing data and application to natural disasters. En *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 207-210). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946393>.
- Li, M., Zang, S., Zhang, B., Li, S. & Wu, C. (2014). A review of remote sensing image classification techniques: The role of Spatio-contextual information. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1), 389-411. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20144723>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W. & Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Lizarazo, I. (2012). Clasificación de la cobertura del suelo urbano usando objetos de imagen difusos. *UD y la Geomática*, 6, 97-109.
- López, J. (2011). Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la quebrada la Marinilla (ANT). *Boletín Ciencias de la Tierra*, 30, 107-118.
- Ma, L., Li, M., Ma, X., Cheng, L., Du, P., & Liu, Y. (2017). A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 277-293. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.001>.
- Maxwell, S. K. (2011). Generating land cover boundaries from remotely sensed data using object-based image analysis: overview and epidemiological application. *Spat Spatiotemporal Epidemiol*, 1(4), 231-237. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2010.09.005>.
- Mertes, L. a K., Daniel, D. L., Melack, J. M., Nelson, B., Martinelli, L. & Forsberg, B. R. (1995). Spatial patterns of hydrology, geomorphology, and vegetation on the floodplain of the Amazon river in Brazil from a remote sensing perspective. *Geomorphology*, 13(1-4), 215-232. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00038-7](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00038-7).

- Muñoz Vernaza, A. (1928). *Exposición sobre el tratado de límites de 1916 entre el Ecuador y Colombia y análisis jurídico del tratado de límites de 1922 entre Colombia y el Perú*. Quito: Talleres Gráficos de El Comercio.
- Novak, F. & Namihas, S. (2011). *Perú-Colombia: la construcción de una asociación estratégica y un desarrollo fronterizo*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ojaghi, S., Ahmadi, F. F. & Ebadi, H. (2016). A new method for semi-automatic classification of remotely sensed images developed based on the cognitive approaches for producing spatial data required in geomatics applications. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(19), 724. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2730-1>.
- Posada, E., Ramírez Daza, H. M. & Espejo, N. (2012). *Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Quiroga, L. (2018). *Análisis de detección de cambios en el espacio empleando interpretación de imágenes satelitales y estadística espacial*. (Tesis de Maestría en Geomática). Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
- Ramírez, C., Bocanegra, R. & Sandoval, M. (2006). Modelación morfológica del río Cauca en el tramo La Balsa-Juanchito. *Ingeniería y Competitividad*, 8(2), 80-93.
- Rozo, M. G., Nogueira, A. C. R. & Soto, C. (2014). Remote sensing-based analysis of the planform changes in the Upper Amazon River over the period 1986-2006. *Journal of South American Earth Sciences*, 51, 28-44. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.12.004>.
- Rozo, M. & Soto, C. (2009). Multitemporal analysis of the amazon river between corea island (Colombia) and Aramosa Island (Brazil). *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 9(2), 13-17. Recuperado de [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/article/view/902](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/902).
- Saadat, H., Bonnell, R., Sharifi, F., Mehuys, G., Namdar, M. & Ale-Ebrahim, S. (2008). Landform classification from a digital elevation model and satellite imagery. *Geomorphology*, 100(3-4), 453-464. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.011>
- Salgar Antolínez, D. (2 de octubre de 2014). Santa Rosa, ¿tierra de nadie? *El Espectador*. Recuperado de <https://www.elespectador.com/noticias/elmundo/santa-rosa-tierra-de-nadie-articulo-520150>.
- Shah, P., & Vayada, M. G. (2014). Review on Satellite Image Classification using Fuzzy Logic. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(12), 1245-1248.
- Uca Avcı, Z. D., Karaman, M., Ozelkan, E., Kumral, M. & Budakoglu, M. (2014). OBIA based hierarchical image classification for industrial lake water. *Science of the Total Environment*, 487(1), 565-573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.048>.
- United States Geological Survey (USGS). (2016). *Landsat Processing Details*. Recuperado de [http://landsat.usgs.gov/Landsat\\_Processing\\_Details.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php).

- Vargas, G. (Agosto, 2012). *Geología, geomorfología y dinámica fluvial aplicada a hidráulica de ríos*. Ponencia presentada en el XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Barranquilla, Colombia.
- Wei, W., Chen, X. & Ma, A. (2005). Object-oriented Information Extraction and Application in High-resolution Remote Sensing Image. *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05*, pp. 3803-3806. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1525737>.
- Wu, S., Bai, Y., & Chen, H. (2017). Change detection methods based on low-rank sparse representation for multi-temporal remote sensing imagery. *Cluster Computing*, 22, 9951-9966. <https://doi.org/10.1007/s10586-017-1022-1>.
- Yang, C., Cai, X., Wang, X., Yan, R., Zhang, T., Zhang, Q., & Lu, X. (2015). Remotely Sensed Trajectory Analysis of Channel Migration in Lower Jingjiang Reach during the Period of 1983-2013. *Remote Sensing*, 7(12), 16241-16256. <https://doi.org/10.3390/rs71215828>.

