

Detección remota de alteración de los sedimentos en corrientes hídricas por explotaciones de oro de aluvión con uso de maquinaria en agua

[Remote sensing for detection of sediment alteration in water currents by alluvial gold exploitation using water machine]

Oficina de las Naciones Unidas Contra la droga y el Delito (UNODC)

Sandra Rodríguez^a, Mauricio González^b, Jeison Achicanoy^c

Eje investigación para la detección de evidencias a través de percepción remota de actividades de ilegalidad en el territorio

Resumen

La utilización de maquinaria en cuerpos de agua para la explotación de depósitos de oro aluvial causa alteración del fondo de los lechos de las corrientes hídricas y provoca cambios en la cantidad de sedimentos en suspensión. Estos modifican la reflectancia natural del cuerpo hídrico en las imágenes satelitales. En este contexto, el Sistema Integrado de Monitoreo de cultivos ilícitos, SIMCI, desarrolló una metodología basada en percepción remota mediante el empleo de álgebra de bandas (índice espectral), que facilita la detección y monitoreo de las zonas con alteración por sedimentos en los cuerpos de agua. El índice empleado es el MNDWI: Modification for Normalized Difference Water Index.

Esta metodología facilita identificar las alteraciones en la dinámica natural de la corriente, atribuibles a las actividades de explotación de oro, a partir del comportamiento espectral del agua en las imágenes. El método consiste en el establecimiento de la base natural espectral del cuerpo de agua como Tiempo 0. Luego, se realizan tres mediciones posteriores utilizando las imágenes disponibles para examinar los cambios en el índice espectral. Finalmente, una vez creada la línea de comportamiento espectral natural, se aplica el índice espectral para así construir las curvas espectrales que viabilizarán la identificación de la dinámica de cambio en los sedimentos en suspensión a través del tiempo, así como los puntos de máxima alteración o alertas.

Palabras clave: Percepción remota, índices espectrales, explotación de oro aluvial, afectación del agua por sedimentos, río Inírida

a. Ingeniera Forestal. Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Analista senior en PDI del proyecto Sistema Integrado de monitoreo de Cultivos Ilícitos SIMCI-UNODC. Sandraconstanza.rodriguez@un.org

b. Ingeniero Forestal. Ingeniero de Soporte PDI del proyecto Sistema Integrado de monitoreo de Cultivos Ilícitos SIMCI-UNODC.

c. Ingeniero Agro-Forestal, Ingeniero Junior en PDI del proyecto Sistema Integrado de monitoreo de Cultivos Ilícitos SIMCI-UNODC.



Abstract

The use of machinery in water during the exploitation of deposits of alluvial gold causes alteration in the riverbed and generates changes in the quantity of suspended sediments, that modify the natural reflectance of the water body. In this context, SIMCI project developed a methodology based on remote sensing through the use of band algebra (spectral index), which allows the detection and monitoring of alterations of amount of sediments dissolves in the water. The index used is the MNDWI (Modification for Normalized Difference Water Index).

This methodology allows the identification of alterations in the natural dynamics of the current attributable to gold mining exploitation, based on the spectral behavior of the water. The method consists in establishing the natural spectral base of the water body as Time 0, and three further measurements are made using the available images to examine changes in the spectral index. Finally, once the line of natural spectral behavior is established, the index is applied in order to construct the spectral curves that will allow the identification of the dynamics of change in suspended sediments over time, as well as the points of maximum alteration or alerts.

Keywords: Remote sensing, spectral index, gold mining exploitation, affectation of water by sediments, Inírida river

Introducción

La explotación aurífera en Colombia contempla dos tipos de yacimiento de acuerdo con las condiciones geológicas de formación: i) primarios, conocidos como de filón o veta y (ii) secundarios o de aluvión. La explotación de los yacimientos, tanto de filón como de aluvión, presenta dos modalidades básicas en cuanto a la extracción y beneficio, de acuerdo con el nivel tecnológico aplicado: la que emplea técnicas y herramientas rudimentarias y la que usa maquinaria pesada. Aunque la utilización de maquinaria pesada ha ganado protagonismo en las explotaciones auríferas como herramienta de mejora en la rentabilidad en la extracción, al remover grandes volúmenes de material en poco tiempo, repercute con mayor impacto si no se sigue un plan de manejo ambientalmente sostenible. (UNODC-MJD, 2016)

En consecuencia, el tipo de extracción, las herramientas y maquinaria utilizadas generan en el territorio evidencias físicas. La explotación de oro de aluvión con maquinaria pesada genera evidencias sobre la cobertura en la que se desarrolla. Aquella, llevada a cabo sobre paisajes aluviales en terrenos circundantes a los ríos con el uso de maquinaria tipo retroexcavadoras, ocasiona cambios en el paisaje de fuerte impacto visual. Pero otro tipo de explotación, aquella realizada en el lecho de los ríos con el uso de maquinaria tipo dragas, provoca cambios en el medio hídrico, al generar alteración de los sedimentos en suspensión. (UNODC-MJD, 2016)

Para la detección de la alteración de los sedimentos suspendidos en los cuerpos hídricos atribuibles a la actividad, se desarrolló una metodología basada en percepción remota, a través del uso de álgebra de bandas (índices espectrales). La que se implementa en una zona de estudio, en la que predomina este tipo de explotación (Río Inírida).

Desarrollo teórico y metodológico

Las imágenes de satélite capturan información en diferentes rangos del espectro electromagnético y posibilitan estudiar diversas coberturas sobre la tierra. Los cuerpos de agua en las imágenes satelitales son uno de los elementos que mejor explican las propiedades ópticas de reflectancia, transmitancia y absorción (Hernández, 2007). Esto porque el agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación visible que recibe, siendo mayor su absorptividad¹ cuanto mayor sea la longitud de onda. La mayor reflectividad² del agua clara se produce en el rango del espectro electromagnético que comprende desde 0,45 hasta 0,52 μm , reduciendo su valor paulatinamente hacia el infrarrojo cercano, donde ya es prácticamente nulo. La reflectividad se ve afectada por factores como el contenido de clorofila, sólidos en suspensión, rugosidad superficial y profundidad (Hernández, 2007).

La remoción de material en el lecho y riveras de los ríos durante las actividades de explotación del mineral, con uso de maquinaria pesada, genera alteración en los sedimentos en suspensión, modificando la reflectancia del cuerpo hídrico. Sin embargo, discriminar el cambio en la cantidad de sólidos en suspensión en los

1. En el proceso de teledetección, relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie.

2. En el proceso de teledetección, relación entre el flujo incidente y reflejado en una superficie.



cuerpos de agua requiere del uso de herramientas con mayor sensibilidad a este fenómeno. Tal es el caso de los índices espectrales, cuyo objetivo es realzar y suministrar información sobre una cobertura específica y, por otro lado, facilitan obtener, de una forma objetiva y precisa, información cuantitativa del objeto de estudio.

En este contexto, en coordinación con el Ministerio de Justicia y del Derecho, UNODC, en cabeza del proyecto SIMCI, diseñó una metodología basada en imágenes Landsat e índices espectrales, que parte del establecimiento de la línea base natural espectral del río de interés durante el periodo de aguas bajas, durante un periodo en el que no ocurría afectación por esta actividad (1996). Continúa con mediciones posteriores del índice (2002, 2007, 2011 y en 2014 cuando ya se registró esta actividad), utilizando las imágenes disponibles para examinar los cambios en el índice espectral con respecto al comportamiento natural, y termina con la validación de los resultados mediante información cualitativa y cuantitativa disponible. (UNODC-MJD, 2016)

Modelo metodológico

El modelo está basado en la identificación de cambios en el comportamiento natural de los sedimentos en ríos que se pueden medir a través de cambios en los índices espectrales, y que se pueden asociar con actividades de extracción de oro de aluvión.

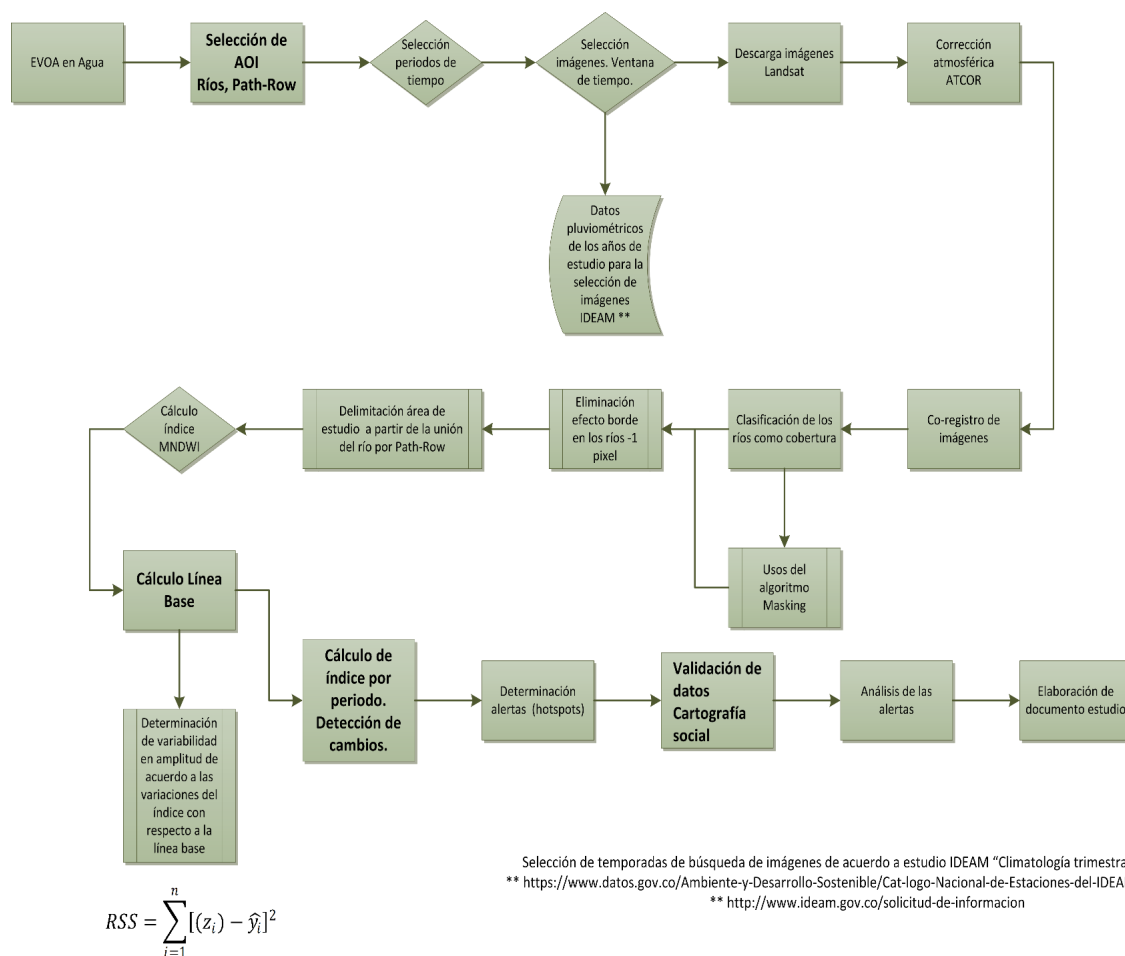


Figura 1. Esquema general metodológico
Fuente: Gobierno de Colombia . UNODC



Para la aplicación de este modelo se seleccionó el índice modificado de agua de diferencia normalizada MNDWI (por sus siglas en inglés), dado que este emplea el uso del rango del espectro electromagnético. En efecto, la banda correspondiente al infrarrojo medio, que posibilita diferenciar y resaltar lugares donde las características del agua se ven afectadas por alguna alteración (Vivek Kumar, Piyush Kumar, P, & M, 2015). Este índice se seleccionó tanto para la caracterización de la línea base, como para el análisis de los periodos.

El modelo de monitoreo para la detección de actividades de explotación de oro de aluvión en agua, basado en índices espectrales incluye tres etapas:

- i) Construcción de la línea de base³ para el río en la que se garantiza el comportamiento espectral “natural”, es decir, sin intervención de actividades de explotación de minerales.
- ii) Detección de los cambios en el comportamiento natural, mediante la observación y análisis de índices espectrales.
- iii) Identificación de los cambios detectados con actividades de explotación de oro de aluvión.

La selección de la zona piloto se hizo teniendo en cuenta las características geográficas, hidrografía, régimen de precipitaciones y climatología. Efectivamente, se eligieron dos ríos para la construcción de la línea base de comportamiento espectral natural: el río Inírida a la altura de las comunidades de Zancudo, Chorro Bocón, Huesito y Morroco; y el río Orinoco, a aproximadamente 55 km al noroccidente de la provincia de Tama, en la jurisdicción del Estado de Amazonas en la República de Venezuela, donde se sabe que no existen antecedentes de afectación por explotación mineral. Los hallazgos obtenidos para ambos ríos tienen una tendencia similar, por lo que se selecciona como línea base el Río Inírida, dado que es donde se realiza la aplicación del modelo.

Línea base comportamiento espectral natural de los sedimentos en suspensión en un cuerpo de agua.

Para el establecimiento de la línea base y posterior comparabilidad de la dinámica espectral en los diferentes periodos de tiempo, las imágenes se corrigieron atmosféricamente, mediante el algoritmo ATCOR. De otro lado, los puntos de muestra fueron distribuidos sistemáticamente cada 5 km, para abarcar la variabilidad de la zona.

Por otra parte, para garantizar la medición objetiva del índice MNDWI, se realizó un filtro de píxeles por efecto de borde para eliminar interferencia (ruidos) no atribuible al fenómeno en estudio.

Finalmente, para garantizar la comparabilidad en función del caudal hídrico, se seleccionó para cada periodo una ventana de tiempo correspondiente a la estación de bajas lluvias en función de las premisas:

- El menor caudal facilita la detección de alteraciones en los sedimentos suspendidos.
- El periodo lluvioso representa un régimen fuerte de precipitación, que conlleva un incremento en los sedimentos transportados. Estos se generan tanto por el régimen

3. Los estudios de línea base proporcionan una base de información contra la cual monitorear y evaluar (ONU mujeres, 2019)



de lluvias como por otros factores inherentes a la temporada de lluvias, erosión fluvial lateral, desplomes de material en las orillas en condiciones naturales y en consecuencia un incremento en el arrastre de material.

- La información secundaria reportada por las instituciones presentes en la zona menciona que el mayor caudal dificulta el acceso al yacimiento por parte de la maquinaria utilizada.

Con los valores obtenidos en cada punto de muestra en la imagen de 1996, se construyó una curva de comportamiento *natural espectral*. Los valores mínimos y máximos del índice determinan el rango de comportamiento natural, que a su vez posibilita identificar los cambios posteriores en los sedimentos suspendidos.

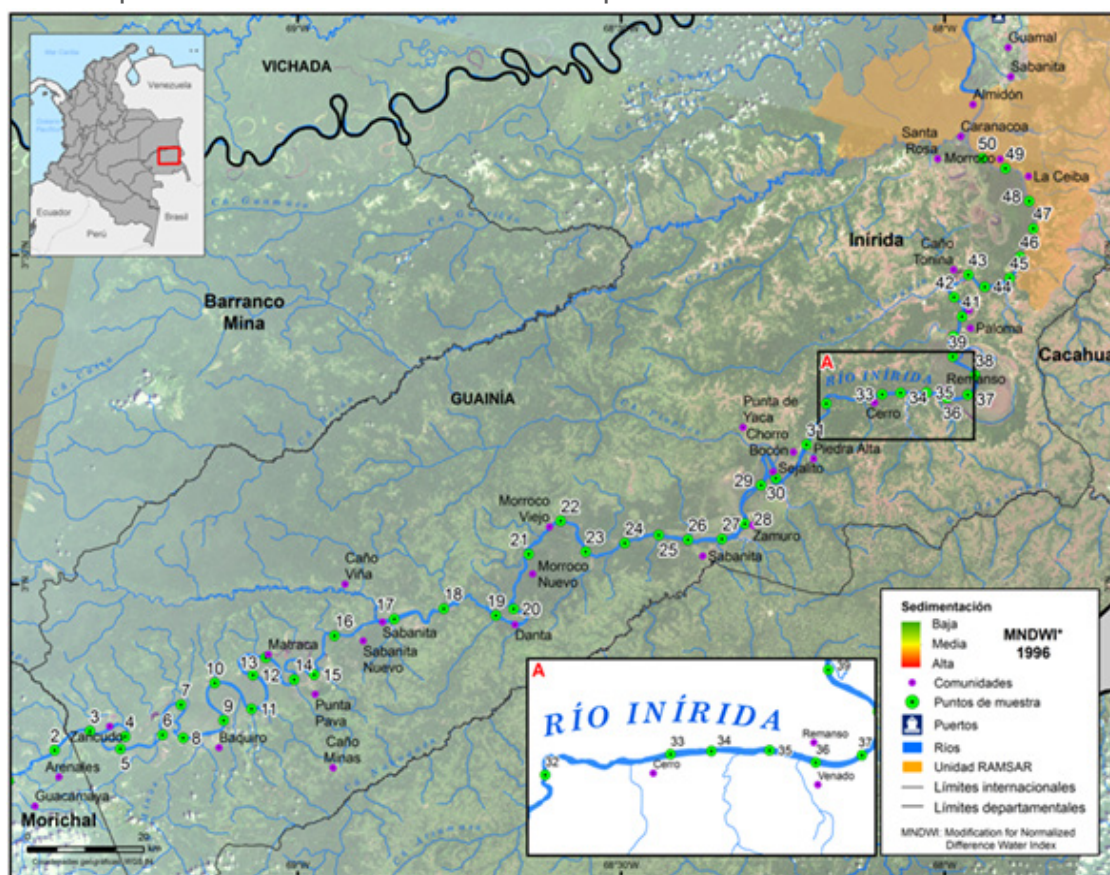


Figura 2. Representación del índice MNDWI en el área de estudio para el periodo 1996
Fuente: Gobierno de Colombia . UNODC⁴

De acuerdo con el índice MNDWI para el año 1996, el río presenta uniformidad en el análisis en la mayoría de los puntos tomados como muestra. La representación de la alteración de sedimentos parte de la tonalidad azul que indica mínima afectación, hasta el color rojo que representa una alta afectación. Como se puede observar en la figura 2, el río presenta una coloración azul, inclusive en zonas de meandros (curva interna) donde, por el comportamiento del río, se deberían acumular sedimentos, lo que valida que para la fecha base, este no estaba afectado por factores externos que alteraran los sedimentos suspendidos en el río Inírida. Para efectos del monitoreo, las variaciones a este comportamiento indican alteraciones en los sedimentos en suspensión en esta corriente que pueden relacionarse con actividades de explotación de oro de aluvión en agua.

4. Los límites, nombres y títulos usados en este mapa no constituyen reconocimiento o aceptación por parte de Naciones Unidas.



Construcción de curvas de comportamiento espectral

Para la construcción de las curvas de comportamiento espectral durante los periodos de tiempo establecidos, se obtuvo el valor del índice en los puntos muestra seleccionados. Estos valores se compararon con la línea base para detectar los cambios en los sedimentos suspendidos y la identificación de zonas alerta. Mediante análisis visual cuantitativo y análisis espacial con coberturas, se depuraron zonas de alerta, aplicables a agentes exógenos a la actividad de extracción de oro de aluvión.

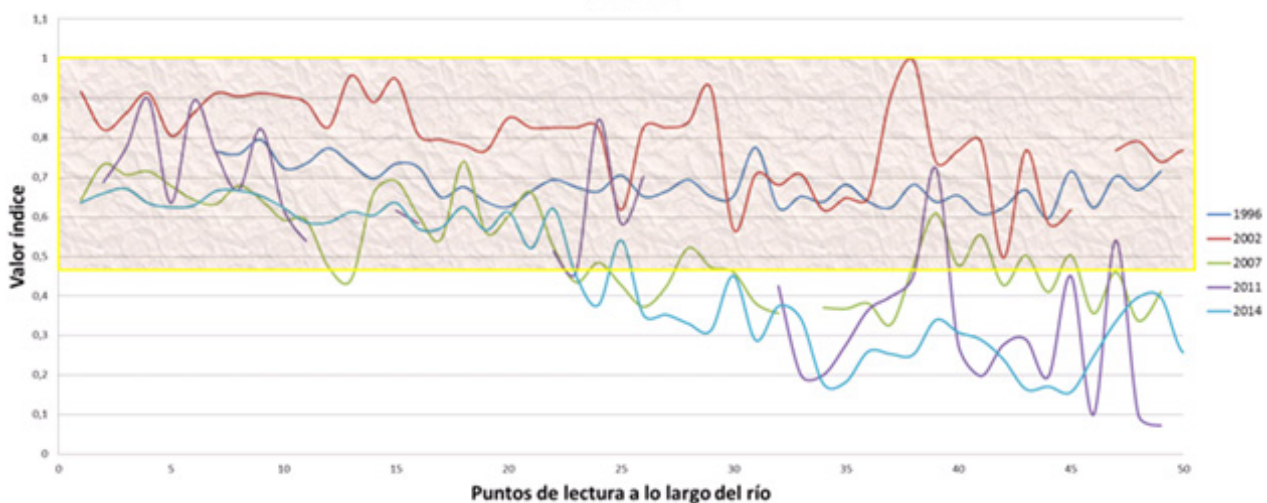


Figura 3. Cruva de comportamiento espectral en suspensión en zona de estudio
Fuente: Gobierno de Colombia . UNODC

Los segmentos de las curvas que se encuentran por fuera del recuadro amarillo corresponden a alteraciones en los sedimentos suspendidos. En este sentido, durante los años 1996 y 2002 los valores del índice se encuentran dentro del comportamiento natural del río. Sin embargo, a partir del año 2007 se evidencia alteración de los sedimentos en suspensión a partir del punto 24.

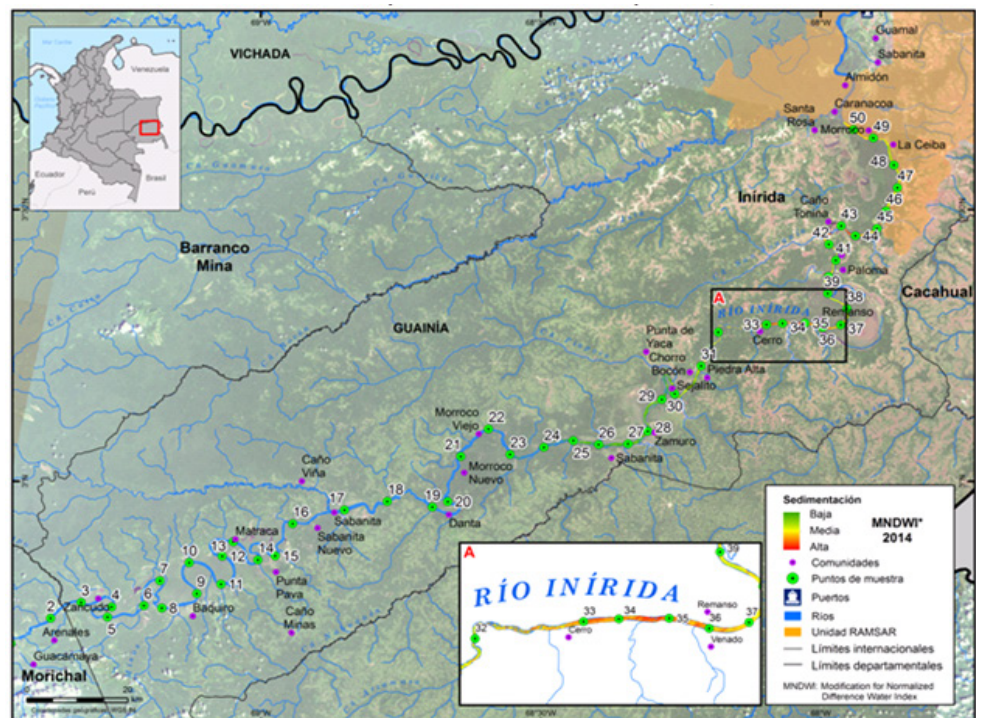


Figura 4. Representación del índice MNDWI en el área de estudio para el periodo 2014

Fuente: Gobierno de Colombia- UNODC⁵

5. Los límites, nombres y títulos usados en este mapa no constituyen reconocimiento o aceptación por parte de Naciones Unidas.



De acuerdo con el índice MNDWI para el año 2014, se puede observar sectores del río donde se evidencia alteración de sedimentos. Las tonalidades que van del naranja al rojo evidencian una mayor alteración de los sedimentos y dichos sectores coinciden con las zonas de extracción de oro sobre el río Inírida según la información secundaria.

Tabla 1. Puntos con evidencia de alteración de sedimentos de acuerdo con el índice MNDWI

Punto de Muestra	COMUNIDAD	MNDWI				
		1996	2002	2007	2011	2014
12	Bauiro	0,770	0,830	0,470	**	0,590
14	Matraca	0,700	0,890	0,660	**	0,600
24	Morroco Viejo	0,660	0,830	0,480	0,850	0,380
26	Chorro Bocón	0,650	0,830	0,370	0,700	0,350
27	Sabanita	0,660	0,830	0,420	**	0,350
29	Zamuro	0,650	0,920	0,470	**	0,310
30	Sejalito	0,650	0,570	0,460	**	0,450
31	Piedra Alta	0,780	0,710	0,380	**	0,290
32		0,620	0,680	0,360	0,430	0,370
33	Cerro	0,650	0,710	**	0,200	0,340
34		0,640	0,620	0,370	0,200	0,180
35		0,680	0,650	0,370	0,280	0,180
36	Remanso	0,640	0,650	0,380	0,360	0,260
37		0,620	0,910	0,330	0,400	0,250
38		0,680	1,000	0,480	0,450	0,250
39		0,640	0,740	0,610	0,720	0,340
40	Paloma	0,650	0,770	0,480	0,280	0,310
41	Huesito	0,610	0,790	0,550	0,200	0,290
42		0,620	0,500	0,430	0,280	0,240
43	Caño Tonina	0,670	0,770	0,500	0,290	0,160
44		0,600	0,580	0,410	0,200	0,170
45		0,720	0,620	0,500	0,450	0,160
46		0,620	**	0,360	0,100	0,250
47	La Ceiba	0,700	0,770	0,460	0,540	0,340
48		0,670	0,790	0,340	0,100	0,400
49		0,720	0,740	0,410	0,070	0,400
50	Morroco	**	0,770	**	**	0,260

** Zonas sin información por cubrimiento de nubes

Fuente: Gobierno de Colombia- UNODC



Relación entre la información obtenida con las actividades de explotación de oro de aluvión

Para la validación de la robustez de la aplicación de índices espectrales, se obtuvo información correspondiente a operaciones de control e interdicción de la Armada Nacional de Colombia. Además, se realizaron talleres de aproximación sobre lugares de exploración y explotación de oro de aluvión con instituciones y mineros de la región de estudio. Utilizando los resultados obtenidos en el piloto, se realizó un análisis de correspondencia espacial entre la información obtenida de los índices y la información secundaria. Los resultados obtenidos validan la metodología.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio, la metodología diseñada con base en índices espectrales, en particular el MNDWI, se constituye en una herramienta confiable para la detección de alteración de los sedimentos en suspensión en las corrientes hídricas, debidos a la explotación de oro de aluvión.

Aunque los resultados hacen referencia a la región de estudio, la metodología es aplicable en el ámbito nacional, considerando las particularidades de cada región, en cuanto a características geográficas, hidrográficas y meteorológicas.





Bibliografía

- Hernández, H. D. (2007). *Manejo y Conservación de Recursos Forestales*. Santiago de Chile: Pirámide Editions.
- ONU mujeres. (22 de 04 de 2019). <http://www.endvawnow.org>. Obtenido de <http://www.endvawnow.org/es/articles/959-estudios-de-linea-de-base.html>
- Pérez, C., y Muñoz, A. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- UNODC-MJD. (2016). *Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota.2016*. Bogotá.
- Vivek Kumar, G., Piyush Kumar, G., P, M., & M, A. (2015). Assessment of Surface Water Dynamicsin Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation. *Aquatic Procedia, Volume 4*, 739-746.

