

PROPUESTA DE LÍMITE FUNCIONAL DEL HUMEDAL A PARTIR DE CRITERIOS HIDROLOGICOS EN LA VENTANA PILOTO CIÉNAGA DE ZAPATOSA A ESCALA 1:25.000

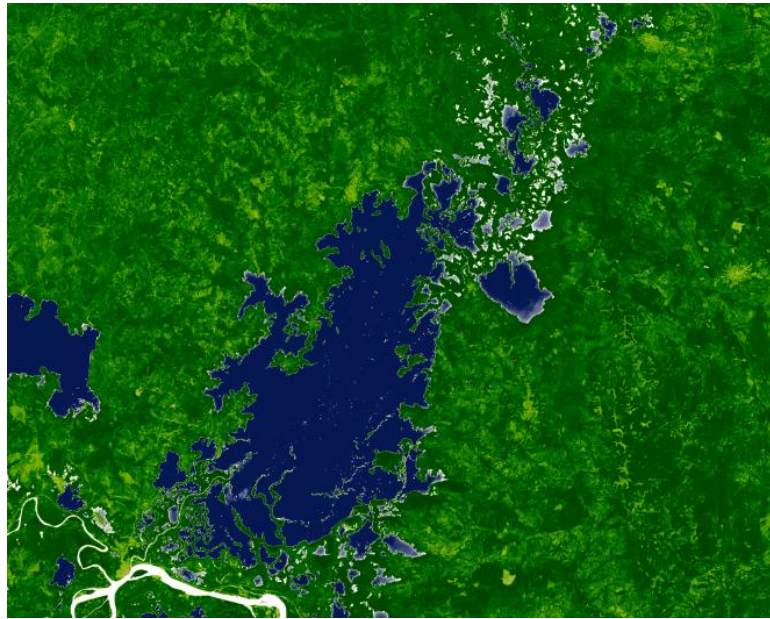
Contrato de prestación No. 15-13-014-065PS Instituto Humboldt – Diego Fernando Restrepo Zambrano

Objeto: Prestar los servicios profesionales para desarrollar el análisis de las dinámicas hidrológicas de los humedales relacionadas con: a. Definición y construcción de criterios hidrológicos para ser implementados en la clasificación nacional de humedales, b. Desarrollo de la metodología de delimitación de humedales, usando información hidrológica a escala 1:25.000 y c. Generación de una propuesta de límite para los complejos de humedal, al interior de cada una de las tres ventanas piloto a escala 1:25.000; todas estas en desarrollo de las actividades enmarcadas en el Convenio N° 13 - 014 (FA.005 de 2013) suscrito entre el Fondo Adaptación y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt”.



Convenio interadministrativo 13-014 (FA 005 de 2013) Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt - Fondo Adaptación

Subdirección de Servicios Científicos y Proyectos Especiales
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
Bogotá, D.C., 2015



Propuesta de Delimitación para la Ventana de la Ciénaga de Zapatoza. Componente Hidrológico

Contrato No 15-13-014-065PS

Diego Fernando Restrepo Zambrano, I.C, Msc Water Science

20/12/2015

Versión 1

Producto 4. Un documento que contenga recomendaciones para la propuesta de delimitación de la ventana de la Ciénaga de Zapatoza, con base en el análisis de información hidrológica a escala 1:25.000 entregada a la unidad ejecutora, complementada con información hidrológica del IDEAM.

Tabla de contenido

1	Introducción	4
2	Resumen Ejecutivo	5
3	El Pulso de Inundación y sus Atributos	6
3.1	Amplitud	7
4	Caracterización Hídrica de la Ciénaga de Zapatosa	9
5	Delimitación de la Ciénaga Zapatosa.....	11
5.1	La Amplitud como Indicador del Límite de la Ciénaga	11
5.1.1	Relación Nivel-Volumen de la Ciénaga de Zapatosa	17
5.2	Delimitación de humedales usando sensores remotos	18
5.2.1	Metodología.....	18
5.2.2	Propuesta de delimitación de la ventana de la Ciénaga de Zapatosa, con base en el análisis de información Satelital a escala 1:110.000.....	27
6	Anexos	32
7	Bibliografía.....	33

Tabla de Figuras

Figura 1 Representación grafica de la secuencia de pulsos. tomado de Neiff et al (1994).	7
Figura 2 El pulso de inundación, Junk 1984.	8
Figura 3 Definición de la Amplitud del pulso de inundación	9
Figura 4 Ubicación estación limnimétrica de la Ciénaga	11
Figura 5 Amplitud del pulso de inundación en La Ciénaga de Zapatosa	12
Figura 6 Mapa topográfico y batimétrico de la Ciénaga de Zapatosa (IDEAM, 2014).	13
Figura 7 Análisis batimétrico de la Ciénaga de Zapatosa (IDEAM, 2014).	13
Figura 8 Modelo Digital del Terreno, Ciénaga de Zapatosa	14
Figura 9 MDT con la lámina de agua, Ciénaga de Zapatosa.	15
Figura 10 Comparación límite levantado y niveles en el modelo digital del terreno.	16
Figura 11 Comparación niveles máximo y mínimo en el modelo digital del terreno, Ciénaga de Zapatosa.	16
Figura 12 Gráfica de relación Nivel - Volumen de la Ciénaga de Zapatosa.	17
Figura 13 Tabla comparativa Landsat.	19
Figura 14 Parte superior: Bandas (en colores) del sensor Landsat 8- Parte inferior: Sensor Landsat 7. (PANROMA Satellite Image Processing, 2013)	20
Figura 15 Metadatos Zapatosa 2015, (USGS,2015).	21
Figura 16 Mapa NDVI – Ciénaga de Zapatosa.	23
Figura 17 Tabla de áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada.	24
Figura 18 Mapa clasificación supervisada para Zapatosa.	25
Figura 19 Mapa de clasificación Ciénaga de Zapatosa, 1) (Amarillo) Zona inundada, 2) (Rojo) Zona Seca.	26
Figura 20 Mapa de cambio en mancha de inundación Ciénaga de Zapatosa. 1) (Amarillo) Zona inundada en ambos periodos, 2) (Azul) Zona seca que paso a inundada, 3) (Azul cian) Zona inundada que paso a seca, 4) (Rojo) Zona seca en ambos periodos.	27
Figura 21 Mapa NDVI, Ciénaga de Zapatosa, Magdalena, Cesar, Colombia.	29
Figura 22 Caudal, Precipitación Vs Tiempo, Ciénaga de Zapatosa.	30
Figura 23 Mapa de Confusión, Ciénaga de Zapatosa, Magdalena, Cesar, Colombia.	31
Figura 24 Mapa colores reales, Ciénaga de Zapatosa, Magdalena, Cesar, Colombia.	32

1 Introducción

Dentro del marco del Convenio 13-014 (FA. 005 de 2013) entre el Fondo de Adaptación y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos "Alexander von Humboldt", con el objeto de *"Aunar esfuerzos económicos, técnicos y administrativos para la delimitación, por parte de de EL MINISTERIO, de los ecosistemas estratégicos priorizados (Páramos y Humedales) en el marco del Convenio No. 008 de 2012 (cuencas hidrográficas afectadas por el Fenómeno de La Niña 2010-2011)"* El contratista desarrolla el cuarto producto en el presente informe, el cual contiene; *"Un documento que contenga recomendaciones para la propuesta de delimitación de la ventana de la Ciénaga de Zapatosa, con base en el análisis de información hidrológica a escala 1:25.000 entregada a la unidad ejecutora, complementada con información hidrológica del IDEAM.."*

El agua es la vida de los humedales, el ciclo hidrológico, el comportamiento de las lluvias, la cobertura de vegetación y la geología son aspectos que definen la escorrentía y la infiltración del agua. Estos aspectos definen la cantidad de agua que llegará y saldrá del humedal, generando condiciones especiales para el hospedaje de la vida. El constante cambio en el almacenamiento de agua se define como el pulso de inundación, que es de vital importancia para todos los humedales, pues sus atributos determinan los tipos de ecosistemas que se pueden llegar a desarrollar. Debido a que los humedales cuentan con características especiales que definen los ecosistemas, Wolfgang J.Junk propuso algunos atributos con los que se clasificaron los humedales en Brasil. La longitud, amplitud, frecuencia, temporalidad y la predictibilidad son útiles para clasificar los humedales y fueron utilizados con este fin en diferentes proyectos de Latinoamérica.

El presente informe contiene la propuesta para la delimitación del humedal Ciénaga de Zapatosa desde el punto de vista hidrológico. En primera instancia se utiliza el concepto de "Pulso de Inundación" y se describen sus atributos. Esto con el fin de presentarlos ya que la amplitud será un atributo utilizado para determinar el límite del cuerpo de agua del humedal y su volumen de agua disponible. Luego de realizar el análisis del pulso de inundación, y una vez analizada la topografía entregada por el instituto, se desarrolla un análisis de imágenes satelitales. El análisis de sensores remotos se realizó utilizando imágenes del satélite Landsat, el cual genera imágenes semanales de distintos lugares del planeta. Estas imágenes son procesadas y analizadas para determinar la presencia de cuerpos de agua. A si mismo se hace un análisis multitemporal de la imagen a partir de la información hidrológica para determinar las zonas inundables para un periodo seco y un periodo húmedo. Los mapas finales se presentan como anexos al informe.

2 Resumen Ejecutivo

El agua en la tierra está distribuida en variadas formas y lugares: en los océanos, bajo tierra, sobre la superficie y en la atmósfera., Únicamente el 2.5% del agua en nuestro planeta es dulce y está principalmente congelada en casquetes glaciares, el resto de ese 2,5% está principalmente presente como agua subterránea y sólo el 0.4% del total del agua existente se encuentra en la superficie y en la atmósfera.

La presión sobre el recurso hídrico está aumentando de manera alarmante, principalmente como resultado de actividades humanas tales como la urbanización, el crecimiento demográfico, la elevación del nivel de vida, la creciente competencia por el agua, y la contaminación, cuyas consecuencias se ven agravadas por el cambio climático y las consecuentes variaciones de las condiciones naturales.(Witgren,J., 2009).

Por otro lado, se vienen realizando esfuerzos a nivel internacional y local que buscan avanzar en la protección del recurso., Las autoridades evalúan la cantidad y la calidad de agua disponible coordinando esfuerzos de gestión a escala nacional e internacional. Uno de estos esfuerzos es la magnificación y comprensión de los cuerpos hídricos tipo humedal, los cuales tienen importantes papeles en los ecosistemas.

En Colombia la definición que se adopta para los humedales se establece como “... *aquellas extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros*” (Min.Ambiente, 2002, Definición RAMSAR). Estos ecosistemas cumplen un papel irremplazable por la cantidad de bienes y servicios que afectan y protegen, los cuales van desde la regulación de flujos hídricos –directamente ligados con el control de inundaciones en épocas de lluvias-, la recarga y descarga de acuíferos, la retención y filtración de nutrientes en las cuencas y la acción como biodigestores de los excesos de materia orgánica, siendo parte esencial de la estabilidad e integridad de los ecosistemas asociados. Constituyen además espacios irremplazables para la investigación científica y la educación ambiental. (Naranjo,L.J.,et al. 1999).

La condición natural de los humedales se encuentra en ambientes de baja energía, estas condiciones se dan en aguas con flujos de velocidad baja, como resultado de las bajas pendientes de su topografía. Debido a la topografía plana de los humedales, el área de su espejo de agua se expande y contrae a medida que cambia la cota de la superficie del agua. De esta manera los humedales sirven como moderadores de variabilidad hidrológica, amortiguando volúmenes de inundación y reduciendo velocidades de flujo durante periodos húmedos. La principal ventaja de los humedales y la razón de que sean hábitats naturales de abundante biodiversidad son las condiciones de baja velocidad de flujo, ya que la

bajas pendiente y bajas profundidades de agua, son condiciones optimas para el depósito y asentamiento de nutrientes y sedimentos.

La dinámica o cambio en el comportamiento en estos fenómenos o ecosistemas es muy alta, por lo cual el estudio y magnificación de estas dinámicas es demasiado complejo para pretender hacerlo directamente en cada humedal existente. Por la importancia de todos y cada uno de estos ecosistemas es necesario implementar y llevar a cabo los monitoreos relacionados con estudios de suelos, hidrología y vegetación, con el objetivo de disponer de las mediciones que permitan tener un control de su cambio con respecto al tiempo y a las variables que los rigen. Con este propósito se dispone ya de herramientas como la teledetección, las imágenes de radar o las imágenes aéreas, las cual dependiendo del instrumento usado nos pueden aportar la cobertura y la calidad espaciotemporal necesaria para llevar a cabo un correcto análisis de cada zona, apoyados en los sistemas de información geográfica (SIG). El sondeo remoto se ha convertido en una herramienta clave para el análisis de estos sistemas de inundación, su evolución geomorfológica y su mapeo. (GIRALDO J., GARCÍA S., 2012)

3 El Pulso de Inundación y sus Atributos

La producción primaria y secundaria en la planicie de inundación de los sistemas de ríos, es la suma de la producción de la fase acuática y la fase terrestre, es decir las fases durante las cuales los humedales están parcialmente secos o inundados. La fertilidad de la planicie de inundación depende de la cantidad de nutrientes en el agua y los sedimentos transportados por el río. La fertilidad puede ser modificada por la calidad del agua de los ríos tributarios y por la escorrentía de las cuencas relacionadas al cuerpo de agua. La longitud, amplitud, frecuencia, temporalidad y la predictibilidad del pulso de inundación, determina la ocurrencia, los ciclos de vida y la abundancia de productores primarios, secundarios, descomponedores, y demás organismos que afectan la explotación y regeneración de los nutrientes así como su abastecimiento. (Junk, 1984).

3.1 Amplitud

El único atributo del pulso de inundación que será utilizado con el fin de delimitar los humedales, será la amplitud. Este atributo indica la fluctuación de los niveles del cuerpo de agua en el tiempo y usando la información histórica de su comportamiento, permite determinar el comportamiento medio de su altura y así mismo su nivel medio natural. A continuación se hace una breve introducción al atributo y se explican sus diferentes metodologías.

Tanto Neiff como Junk tienen diferentes aproximaciones a lo que es el pulso de inundación y sus atributos. Específicamente para el caso de la amplitud, Neiff define la amplitud del pulso de inundación como el periodo de tiempo entre la inundación, las aguas bajas y el siguiente periodo de aguas altas.



Figura 1 Representación grafica de la secuencia de pulsos. tomado de Neiff et al (1994).

Para Junk el atributo de la amplitud corresponde a la altura de la fluctuación de la lamina de agua en un humedal a lo largo del tiempo, la amplitud del pulso de inundación es un atributo básico para clasificar los humedales debido a que se relaciona espacialmente con la biota de área circundante del humedal.

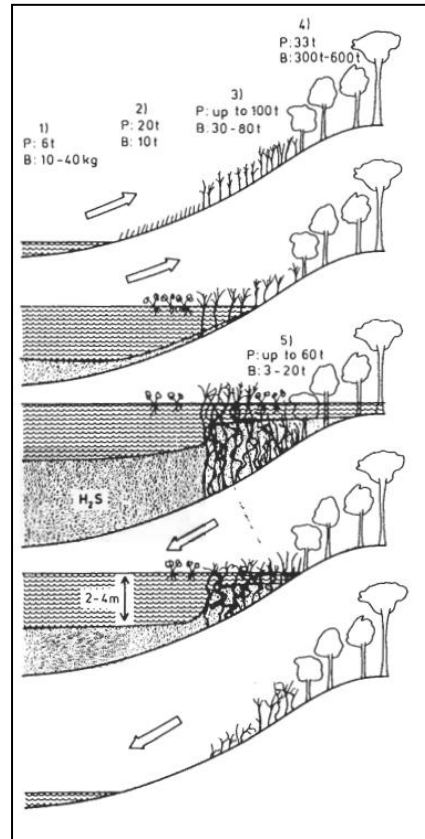


Figura 2 El pulso de inundación, Junk 1984.

El atributo de amplitud del pulso de inundación cumple con una función vital para la caracterización y delimitación de los humedales, ya que la vegetación que crece en las orillas y dentro del humedal depende totalmente del comportamiento del pulso de inundación y representa como los demás atributos, la fuerza conductora del sistema inundable. Es así como la amplitud puede servir como un indicador de los tipos de vegetación que puede ocurrir en zonas inundables, y así mismo puede indicar el nivel natural del humedal, basándose en sus series históricas.

La amplitud es un atributo importante para las plantas, grandes amplitudes se traducen en altas profundidades que causan más estrés en los micrófitos y plantas emergentes, al contrario del estrés que se causaría en las aguas poco profundas. (Junk, 2006).

Estudios comparativos de micrófitos acuáticos y aves acuáticas en la planicie de inundación central del Río Amazonas y el Pantanal de Mato Grosso señalan la importancia de la amplitud del pulso de inundación para la composición de las especies y las formas de vida del ecosistema. Para el caso de la planicie de inundación del Río Amazonas, una amplitud hasta de 15 metros obstaculiza el crecimiento de las plantas sumergidas y probablemente también el alimento de algunos tipos de aves limícolas. Ambos grupos, especies y plantas, ocurren en abundancia y diversidad en el Pantanal de Mato Grosso, donde la amplitud generalmente está entre 1 y 3 metros. (Junk, 2004).

Siguiendo la metodología utilizada por Junk, se definió la amplitud como la diferencia entre la altura mínima mensual de la estación linnimétrica o linnigráfica, con la altura media de las máximas mensuales. Esto quiere decir que la amplitud total del pulso corresponde a su fluctuación entre el mínimo de los promedios mensuales y la media de las máximas mensuales.

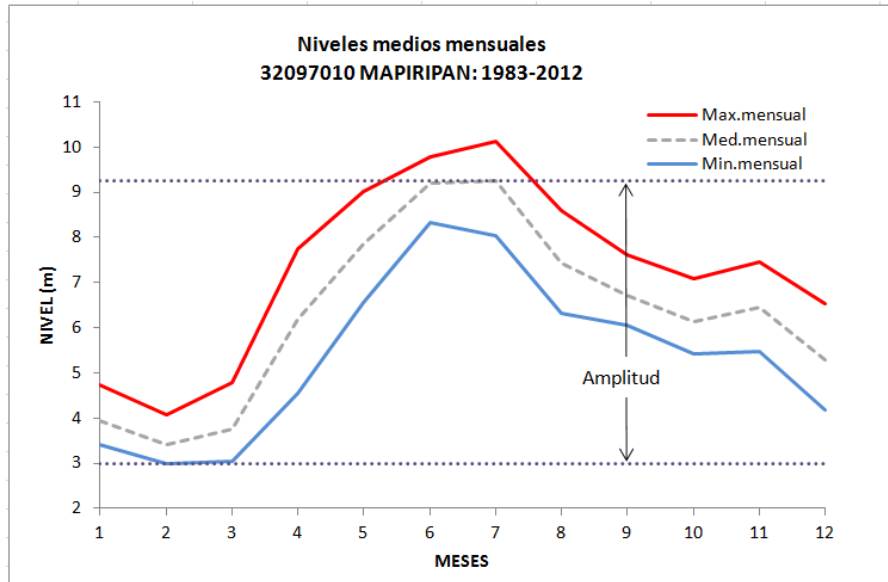


Figura 3 Definición de la Amplitud del pulso de inundación

No se toma la máxima de las máximas mensuales para definir la amplitud debido a que este dato corresponde a un evento extremo. La vegetación circundante del humedal que no hace parte propiamente de su ecosistema, raramente se ve inundada por eventos extremos.

Esto quiere decir que la amplitud nos da un indicador de los límites naturales del humedal, describiendo de forma histórica su comportamiento de niveles. Si esta información se analiza con la topografía y batimetría del humedal, se pueden determinar otras características de delimitación, como el borde de inundación, área del humedal, y volumen de almacenamiento del cuerpo de agua.

4 Caracterización Hídrica de la Ciénaga de Zapatosa

La ciénaga de zapatosa se encuentra ubicada en el norte del país, y hace parte de los municipios de El Banco en el Departamento del Magdalena, Chimichagua, Tamalameque, Curumaní y Chiriguaná pertenecientes al departamento de Cesar.

Su área promedio es de unos 360 kilómetros cuadrados, y en épocas de lluvia puede llegar a los 500 kilómetros cuadrados.

La ciénaga de Zapatosa corresponde a la zona de desembocadura del río Cesar, el cual se convierte en un río sinuoso y con grandes llanuras de inundación. El caudal medio del río es de aproximadamente 202 metros cúbicos por segundo y desbordando todo este caudal en el cuerpo de agua de la Ciénaga de Zapatosa. El río Cesar y el Magdalena por ende son la vida de la ciénaga, así como otros tributarios que alimentan a su vez el cuerpo de agua, como lo son, el río Mula, Anime Grande, Animito y Rodeo Hondo, los caños, Largo, Blanca Pía, Jobito, Las Vegas, Platanal, Mochila San Pedro, Viejo y Tamalacué, y quebradas Quiebradientes, La Floresta y Alfaro.

El principal afluente de la ciénaga de Zapatosa es el río Cesar, el cual nace en la Sierra Nevada de Santa Marta. Su corriente se dirige hacia el sur, desde las tierras altas de la Guajira, hasta la Depresión Momposina. El río Cesar a su vez tiene como principal afluente al río Ariguani con una longitud de 183 km, y que como el río Cesar, nace en la Sierra Nevada de Santa Marta. También son tributarios del río Cesar los ríos Badillo Guatapurí y Cesarito.

Según el "Plan Decenal de Manejo Integral del complejo Cenagoso de Zapatosa", la ciénaga es una depresión con profundidades variables, entre 1 y 8 metros, dependiendo de la época del año. El promedio mínimo de profundidad se presenta en el mes de febrero y el máximo en mayo, este mismo comportamiento se puede visualizar en la grafica de amplitudes para la estación de Barrancones ubicada en la ciénaga y mostrada más adelante. El clima de la región oscila entre 28° y 32° Centígrados.

La Ciénaga también recibe caudales de exceso del río Magdalena y actúa como reservorio que acumula agua en época de lluvias y la devuelve a la depresión Momposina y al río Magdalena en época de sequía. La ciénaga tiene la capacidad de almacenar aproximadamente 900 millones de metros cúbicos provenientes de los ríos Magdalena y Cesar. El área total de la cuenca del río Cesar es de aproximadamente 9832 kilómetros cuadrados, comparando ésta con el área de la ciénaga de Zapatosa de aproximadamente 360 kilómetros cuadrados, representa el 3.6 % del total del área. Este porcentaje es un valor importante teniendo en cuenta que el área del río equivale únicamente a una pequeña porción del área total de la cuenca. La ciénaga es entonces un área de amortiguación importante para la cuenca, disminuyendo aguas abajo los picos de las crecientes, y almacenando agua en época de estiaje.

5 Delimitación de la Ciénaga Zapatosa

5.1 La Amplitud como Indicador del Límite de la Ciénaga

Como se explico anteriormente la amplitud es un atributo del pulso de inundación, este puede ser utilizado para determinar los límites del humedal, basado en los datos históricos registrados por estaciones presentes en el cuerpo de agua. El análisis de datos históricos puede dar una idea del comportamiento promedio de los humedales en el tiempo y describir desde una primera perspectiva hidrológica la delimitación del humedal.

Para llevar a cabo la delimitación de la ciénaga la Zapatosa con base en el atributo de amplitud se siguieron los siguientes pasos.

Se contó con un registro de niveles producto de una estación limnimétrica o limigráfica ubicada en el humedal, o muy cerca del mismo, que tenga alguna conexión hídrica con el cuerpo de agua. Para la ciénaga la Zapatosa se identificó únicamente una estación linimetrica, su ubicación se muestra a continuación.

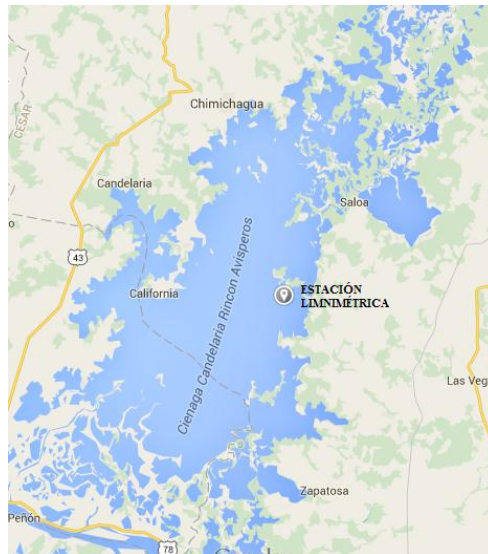


Figura 4 Ubicación estación limnimétrica de la Ciénaga

Con la información de la estación limnimétrica, se hizo un análisis de niveles máximos mensuales. Para realizar dicho análisis se debe calcular el promedio mensual de todos los registros, y organizar los registros máximos, medios y mínimos mensuales.

A partir de los datos obtenidos con los promedios mensuales de las mediciones históricas, se grafica el comportamiento de los máximos mensuales, medios mensuales y mínimos mensuales. La amplitud está definida como la diferencia en

altura entre el mínimo mensual de los promedios máximos mensuales, y el nivel máximo anual de los promedios medios mensuales. Esta diferencia de alturas representa la amplitud del pulso de inundación, y será utilizada para definir el borde del humedal desde el punto de vista hidrológico.

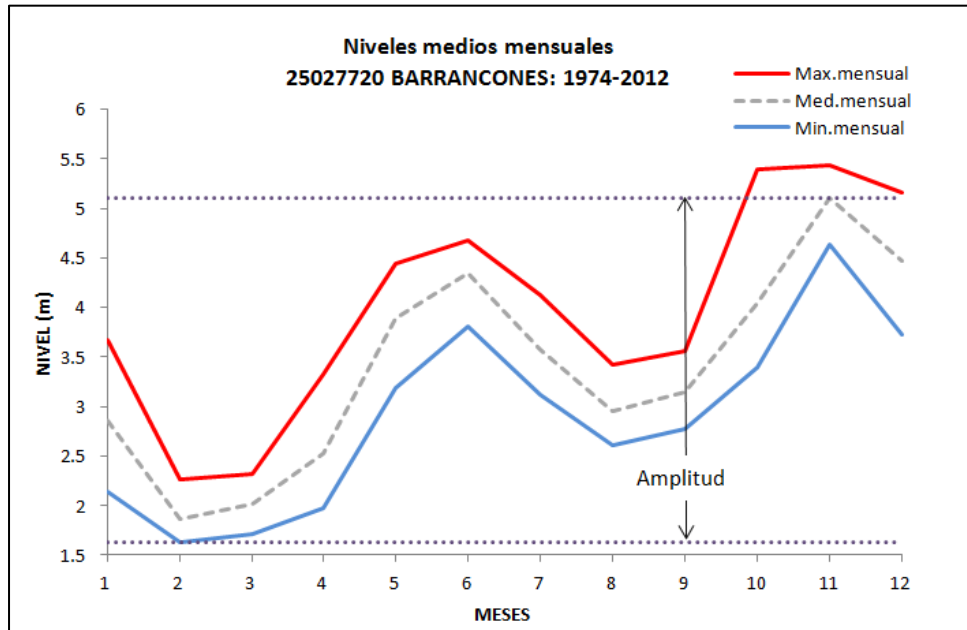


Figura 5 Amplitud del pulso de inundación en La Ciénaga de Zapatosa

Con la información topográfica levantada en campo, curvas de nivel y batimetrías, se construyó la topografía de toda el área del humedal y sus áreas circundantes. Una vez se tiene la topografía del terreno y las batimetrías del humedal, se proceden a realizar un mapa topográfico, sea en 2D o 3D de la totalidad del humedal. A continuación se muestra el mapa topográfico y los modelos digitales de terreno de la Ciénaga de Zapatosa.

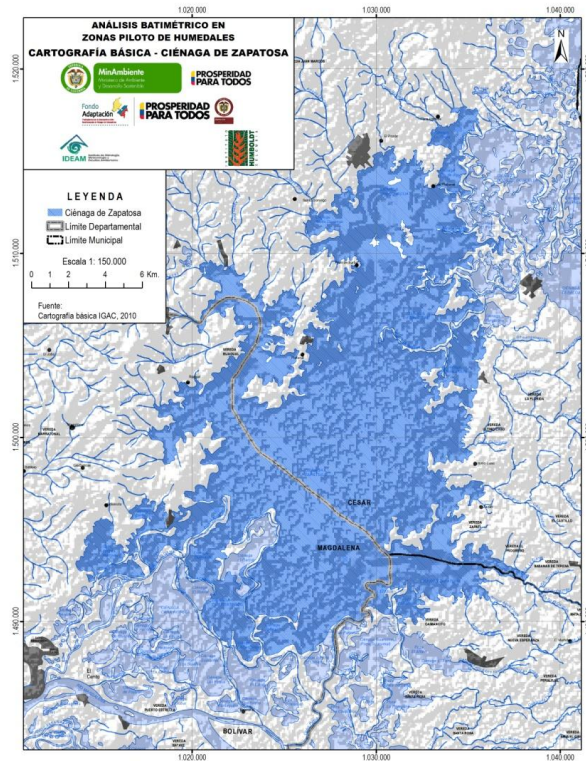


Figura 6 Mapa topográfico y batimétrico de la Ciénaga de Zapatos (IDEAM, 2014).

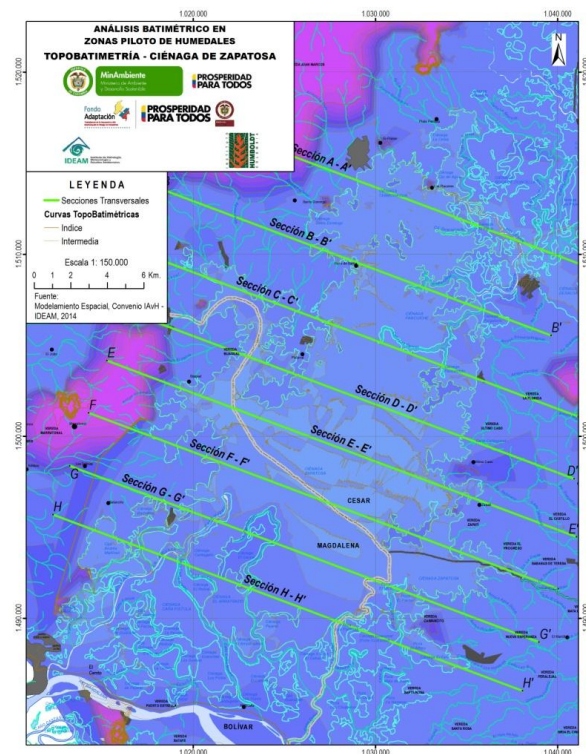


Figura 7 Análisis batimétrico de la Ciénaga de Zapatos (IDEAM, 2014).



Figura 8 Modelo Digital del Terreno, Ciénaga de Zapatosa

Es muy importante definir en qué cota se encuentra el cero del limnígrafo o limnómetro, pues este nivel deberá ser definido en el modelo digital del terreno o plano topográfico correspondiente. Una vez definido el nivel base del limnómetro, se deberá dibujar esta amplitud en el plano, ya sea en un plano topográfico o por medio de software que permita la visualización 3d de la lámina de agua sobre el terreno. La cota a la cual se deberá dibujar la lámina de agua será:

$$CP = Ccero + Nmin + Amplitud$$

Dónde:

CP = Cota del Pulso de Inundación

Ccero = Cota donde se encuentra el cero de la mira

Nmin = Nivel mínimo de los promedios mínimos mensuales

Amplitud = Valor de la amplitud del pulso de inundación

Para la Ciénaga de Zapatosa, se encontró que su amplitud corresponde a una altura de 3.48 metros de fluctuación en el nivel medio anual. Para encontrar la

delimitación del humedal se deberá tener en cuenta esta amplitud con respecto al amarre topográfico de la estación Limnimétrica. Debido a que no se conoce esta cota de amarre de la estación, no es posible determinar con exactitud en que cota se encuentra el cero de la mira. Esto representa un problema para continuar el análisis del límite hidrológico del humedal, sin embargo se continúa el ejercicio realizando el supuesto de que el límite medido en campo corresponde a un nivel medio anual de la ciénaga.

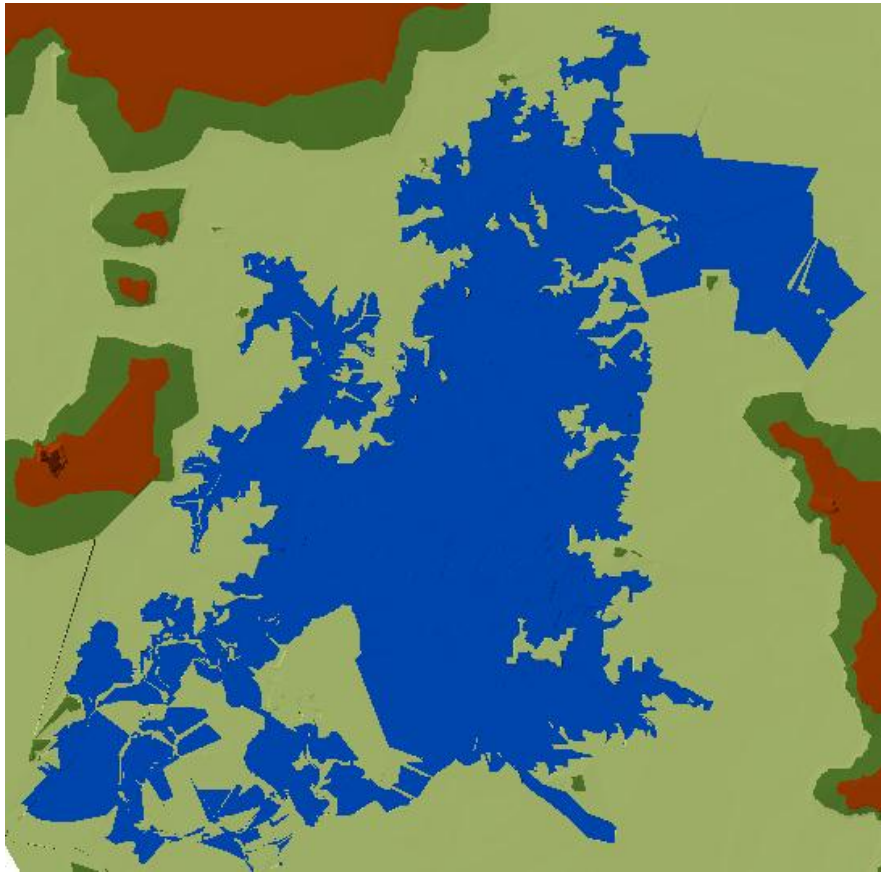


Figura 9 MDT con la lámina de agua, Ciénaga de Zapatosa.

Sin embargo se procedió a comparar los límites de la ciénaga encontrados cuando se realizó el levantamiento topográfico y el nivel del agua basado en el modelo digital del terreno. Se puede notar como la amplitud media corresponde al límite medido en campo, se puede concluir de esta forma que los niveles medios no se encuentran tan alejados de la realidad. Y de las condiciones hidrológicas actuales de la ciénaga. Cabe anotar que la diferencia entre la imagen obtenida con el MDT (Modelo Digital del Terreno) y la del estudio del IDEAM se debe a errores y diferencias en el MDT y la realidad. Sin embargo se hace una aproximación comparativa para determinar los niveles en el MDT y el límite levantado.

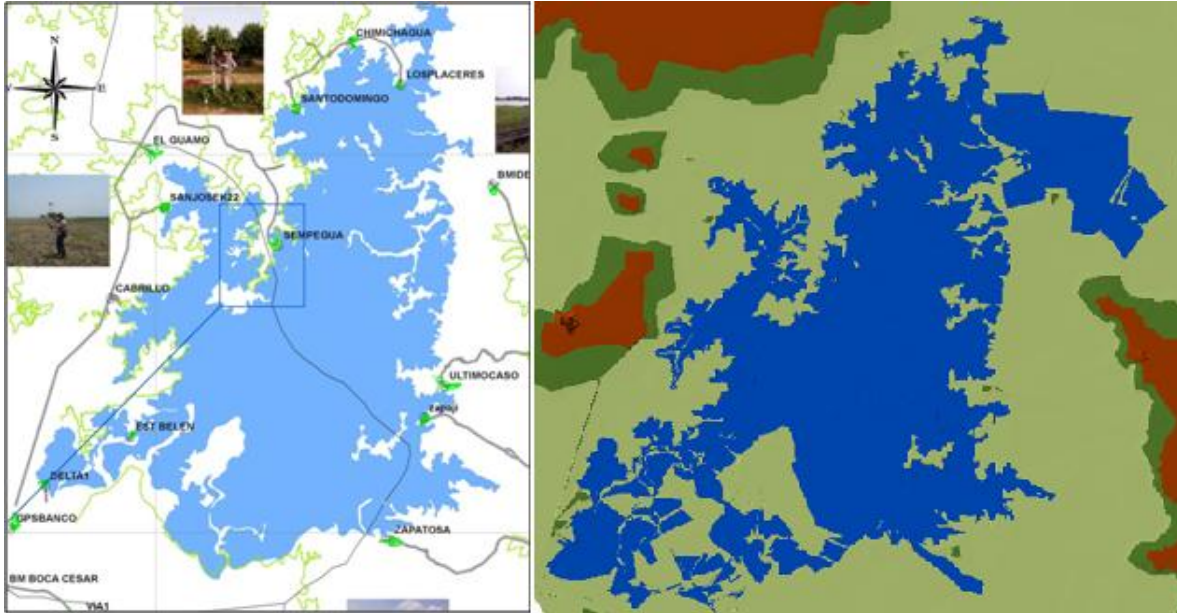


Figura 10 Comparación límite levantado y niveles en el modelo digital del terreno.

El nivel de agua que comparado con el limite levantado para el humedal es equivalente, corresponde a una cota de 24.9 msnm, esto quiere decir que si se asume este como el nivel medio anual, el nivel máximo de amplitud correspondería a un nivel de 26.6 msnm, y el nivel mínimo a un nivel de 23.12 msnm.

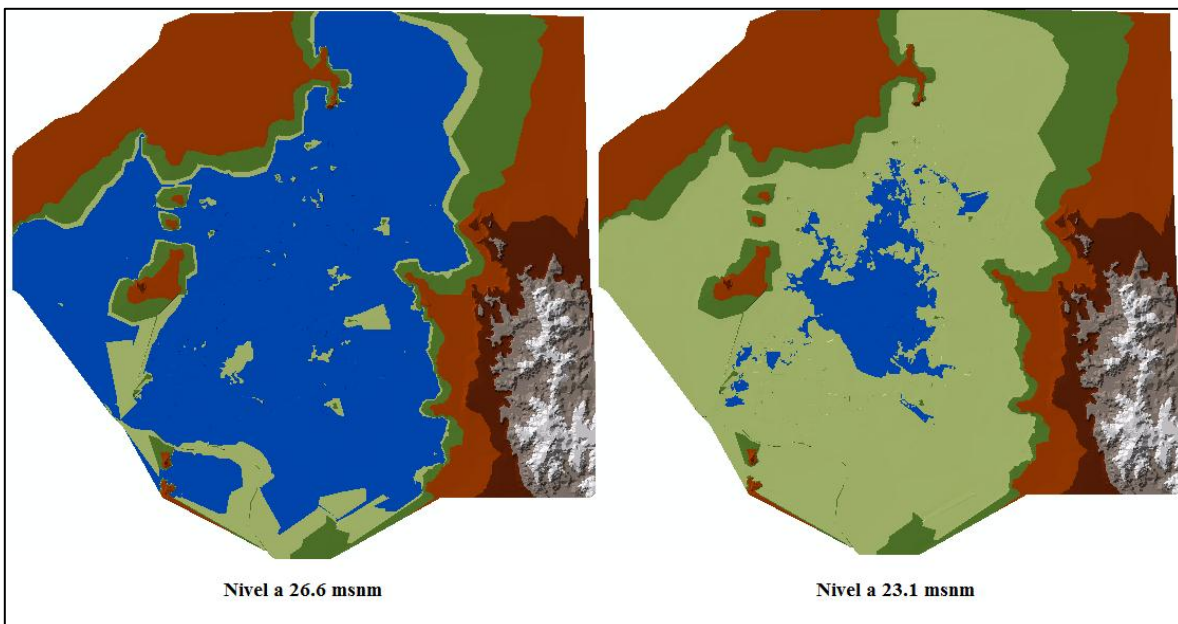


Figura 11 Comparación niveles máximo y mínimo en el modelo digital del terreno, Ciénaga de Zapatosa.

Es importante aclarar que esta metodología de delimitación hidrológica es válida mayormente para sistemas lenticos, y es poco recomendable para zonas de amortiguación de ríos, debido a que estos sistemas tienden a variar en mayor magnitud. En las planicies de inundación de ríos es más preciso realizar el ejercicio basado en imágenes satelitales. El caso de la ciénaga de Zapatosa se presentan ambas condiciones, por lo tanto se recomienda realizar el análisis con imágenes satelitales que definen de manera más precisa el límite húmedo del humedal. Este análisis se desarrolla a continuación.

5.1.1 Relación Nivel-Volumen de la Ciénaga de Zapatosa

Con el fin de caracterizar la Ciénaga de Zapatosa se realizó un análisis de volúmenes en la ciénaga con respecto al nivel de la lámina de agua. El cálculo del volumen se realizó utilizando herramientas de información geográfica, y aplicativos de análisis 3D. Para diferentes niveles se calcularon los volúmenes de agua en la ciénaga, arrojando como resultado la grafica que se presenta a continuación.

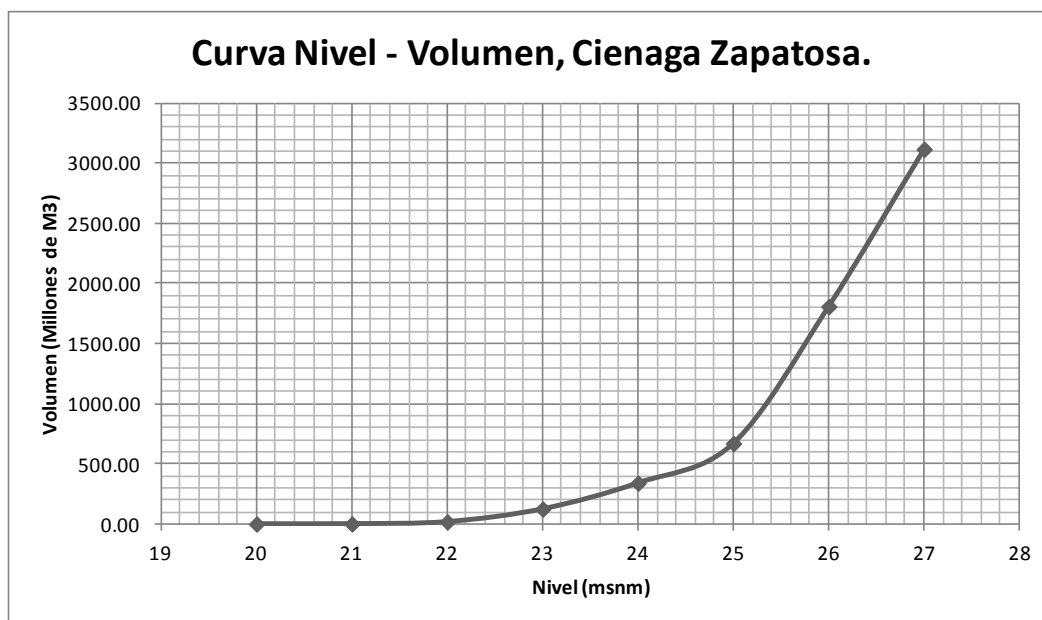


Figura 12 Gráfica de relación Nivel - Volumen de la Ciénaga de Zapatosa.

Es importante resaltar los cambios de pendiente en la grafica que se identifican en ciertos niveles. El cambio más importante se da a una altura de 25 msnm, altura que corresponde a la condición media de niveles, mas alto que este nivel, se puede notar un cambio en la pendiente, seguramente asociado al desbordamiento de la ciénaga a algunas áreas que no se inundan con frecuencia.

5.2 Delimitación de humedales usando sensores remotos

La tecnología de los sensores remotos o teledetección, es una herramienta que evoluciona rápidamente y posibilita la obtención de datos espacio-temporales y ambientales con el uso de plataformas satelitales, es decir sin la necesidad de entrar en contacto físico con la zona a estudiar, siendo esto una alternativa relativamente económica y eficaz. Para la delimitación de cuerpos de agua el software SIG GRASS proporciona diversos módulos para el procesamiento de estas imágenes, por lo cual todos los análisis existentes para este tipo de dato son aplicables. Cabe aclarar que existen otras herramientas de uso libre con las cuales es posible hacer el mismo procesamiento de imágenes, es el caso de Quantum GIS, software de uso libre que cuenta con todos los aplicativos de GRASS. Como resultado de este análisis será posible diferenciar las zonas secas, las zonas de inundación y los cuerpos de agua. El proceso será explicado en el transcurso de este capítulo.

5.2.1 Metodología

Para llevar a cabo este análisis pueden ser empleados diversos productos de servidores y sensores, sin embargo vamos a centrarnos en los productos Landsat 5,7 y 8 los cuales tienen una resolución espacial y radiométrica adecuada.

Los productos captados por el satélite Landsat 5, poseen 7 bandas espectrales siendo 3 de estas visibles, una en infrarrojo cercano, dos en infrarrojo medio y una en infrarrojo termal, estas al igual que sus predecesoras poseen resolución de 30 metros.

El satélite Landsat 7 tiene la posibilidad de captar 532 imágenes por día, este se caracteriza por tener una órbita Heliosincrónica, es decir que pasa siempre pasa por el mismo lugar a la misma hora, logrando esto cada 15 días. Este posee 8 bandas, las mismas que su antecesor el Landsat 5 y una nueva banda Pancromática con resolución de 15 metros.

El sensor Landsat 8 posee 11 bandas las cuales 5 de estas son visibles, incluyendo la pancromática, una en infrarrojo cercano uno en infrarrojo medio y otro en lejano, dos bandas termales y una nueva banda para la nubosidad.

	Numero de Bandas	Tipo	Resolución
Landsat 5	7 Bandas	3 Visibles 1 Infrarrojo cercano 2 Infrarrojo medio 1 Infrarrojo termal	30 Metros
Landsat 7	8 Bandas	3 Visibles 1 Infrarrojo cercano 2 Infrarrojo medio 1 Infrarrojo termal 1 Pancromática	30 y 15 Metros
Landsat 8	11 Bandas	3 Visibles 1 Infrarrojo cercano 2 Infrarrojo medio 1 Infrarrojo termal 1 Pancromática 1 Nubosidad 2 Termales	30 y 15 Metros

Figura 13 Tabla comparativa Landsat.

Para determinar las diferencias en las zonas de inundación de las ventanas requeridas para su delimitación, se requiere la búsqueda de imágenes satelitales ópticas del sensor Landsat 8 que cubran el sitio de interés y que tengan un porcentaje de nubosidad bajo, para que sea posible apreciar los cuerpos de agua existentes y que estos no estén afectados por fenómenos climáticos que interfieran con la correcta recolección de datos.

De la página web del gobierno de Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov>) se descargaron dos imágenes:

Esta selección se basa en la época del año que se considera seca para la región, debido a la baja nubosidad que se va a presentar durante el verano posibilitando una clara vista de las zonas de inundación, además de la disminución en el nivel de las aguas debido la falta de lluvias, característica de este periodo, por lo cual estas pueden estar espaciadas por 2 semanas o un mes.

La selección del sensor Landsat 8 se basa en que es el único sensor que nos brinda una banda específica para la nubosidad, la cual será de gran ayuda en el procesamiento de las imágenes, además de su buena resolución espacial, espectral y radiométrica. Las ventajas del sensor 8 de Landsat con respecto a sus predecesores son bastantes, y por esta razón se decidió usarlo para realizar el análisis de delimitación.

Algunas de las ventajas del sensor 8 se presentan a continuación:

La resolución radiométrica del sensor 7 nos otorgaba 8 bits de información, para el sensor 8 aumento a 12 bits, lo cual indica un rango dinámico mayor y pasar de $2^8 = 256$ niveles digitales a $2^{12} = 4096$ esto no quiere decir que el sensor 8 sea más adecuado que el sensor 7, significa que el valor físico asignado a la variable digital será más preciso, por lo cual el error al momento de identificar una zona humedad de una seca será menor.

La resolución espacial de los dos sensores es la misma, 30 metros para las bandas ópticas, 100 metros para las bandas térmicas.

La resolución espectral se identifica mejor con la siguiente imagen:

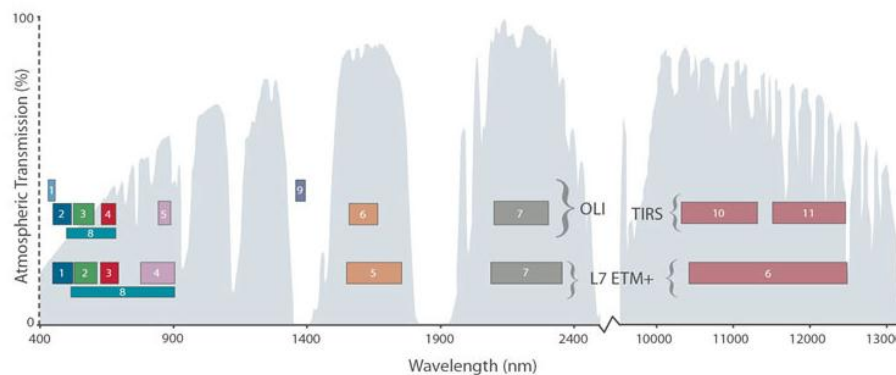


Figura 14 Parte superior: Bandas (en colores) del sensor Landsat 8- Parte inferior: Sensor Landsat 7. (PANCROMA Satellite Image Processing, 2013)

Es notable apreciar el cambio en las bandas, en especial la banda 9 del sensor 8, además del cambio en los espectros visibles (bandas 1, 2, 3, 4 y 8) y en las bandas térmicas.

Para el desarrollo de este documento únicamente se tendrán en cuenta las bandas de la 1 hasta la 8 además de la BQA (Quality Assesment Band), de las 11 que posee este sensor, es decir fueron descartadas las bandas térmicas 10 y 11 por no ser necesarias para lograr nuestro objetivo y la banda 9 la cual recolecta la información óptica de la nubosidad.

En la mayoría de los casos estas imágenes vienen con errores, valores nulos los cuales deberán ser descartados o corregidos con los módulos `r.null` y `r.fillnulls` del SIG GRASS, esto para las 9 bandas además de cambiar su color a gris ecualizado "grey.eq" ideal para observar con mayor facilidad detalles de las imágenes como ciudades, tipos de vegetación y en especial los cuerpos de agua, los cuales son el principal objetivo de este análisis.

Teniendo en cuenta que las imágenes se encuentran en la proyección UTM 18, es necesario cambiar esta a unidades y origen coordinado de la proyección MSZB, mediante el módulo r.proj.

Posterior a esto es necesario hacer el análisis digital sobre una zona de trabajo delimitada, según la distribución espacial del cuerpo de agua, una vez delimitado este espacio de trabajo el resto de la imagen será descartada para los posteriores procesos, esto evita los cálculos innecesarios y la economía de recursos computacionales, que para este punto ya son altos.

Cada imagen o paquete de bandas que se descargan, poseen metadatos específicos, estos son apreciables desde la página de la siguiente manera, esto nos otorga información desde la fecha exacta en que fue captada la imagen hasta el datum y los bordes geográficos de esta, un ejemplo de esta información se puede ver en la siguiente imagen:

Data Set Attribute	Attribute Value
Landsat Scene Identifier	LC80090542014380LGN00
WRS Path	009
WRS Row	054
Target WRS Path	009
Target WRS Row	054
Full or Partial Scene	FULL
Nadir/Off Nadir	NADIR
Data Category	NOMINAL
Bias Parameter File Name OLI	LO8BPPF20141228150317_20141228154554.02
Bias Parameter File Name TIRS	LT8BPPF20141222180001_20150108000000.02
Calibration Parameter File	L8CPF20141219_20141231.10
RLUT File Name	L8RLUT20130211_20150302v10.h5
Roll Angle	-.001
Station Identifier	LGN
Day/Night	DAY
Data Type Level 1	L1T
Sensor Identifier	OLI_TIRS
Date Acquired	2014/12/28
Start Time	2014:380:15:17:33.2580440
Stop Time	2014:380:15:18:05.0280410
Image Quality	9
Scene Cloud Cover	1.93
Sun Elevation	49.2925077
Sun Azimuth	142.26225851
Geometric RMSE Model X	5.832
Geometric RMSE Model Y	4.517
Browse Exists	Y
Processing Software Version	LPGS_2.5.0
Center Latitude	8°40'37.88"N
Center Longitude	75°04'43.28"W

Figura 15 Metadatos Zapatosa 2015, (USGS,2015).

En primera instancia si la región escogida tiene presencia de nubosidad, es necesario eliminar esta de las 8 bandas, como guía sea usen los valores de nubosidad presentes en la banda nueve, estos valores digitales son 53248, 56320,

57344, 61440, 59424, los cuales se extraen y se generan 8 nuevos mapas raster a los cuales se les hace una interpolación bilineal (r.fillnulls) con el fin de llenar los espacios creados al momento de extraer la nubosidad, con esto se posee la información ideal para realizar con correcto análisis sobre la zona de estudio.

Análisis de radiancia y reflectancia

Para convertir los valores de brillo de las imágenes satelitales a variables físicas en mapas raster se utilizan los valores de ganancia (RADIANCE_MULT_BAND) y desvío (RADIANCE_ADD_BAND) descargados en los metadatos de las imágenes para ser reemplazados en la siguiente ecuación:

$$Radiancia_{\lambda} = Ganancia_{\lambda} * Nivel Digital_{\lambda} + Desvío_{\lambda}$$

Ecuación 1 Radiancia en el canal λ , (USGS, 2015)

Donde λ : es la longitud de onda para cada canal.

Para reducir la variabilidad de entre bandas será calculada la reflectancia utilizando los valores de ganancia (REFLECTANCE_MULT_BAND), desvío (REFLECTANCE_ADD_BAND) y elevación solar (SUN_ELEVATION) descargados en los metadatos de las imágenes para ser reemplazados en la siguiente ecuación:

$$Reflectancia_{\lambda} = \frac{Ganancia_{\lambda} * Nivel Digital_{\lambda} + Desvío_{\lambda}}{90 - \cos(elevación solar)}$$

Ecuación 2 Reflectancia en el canal λ , (USGS, 2015)

Donde λ : es la longitud de onda para cada canal.

Una vez procesadas las imágenes para obtener la reflectancia, con los valores de las bandas 4 y 5 se calculan el mapa de índices de vegetación (NDVI) (Ecuación 3) nuevamente utilizando la herramienta r.mapcalc, este índice nos ayuda a verificar las condiciones de la imagen.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

Ecuación 3 NDVI

La obtención del Mapa de índice de vegetación (NDVI) utiliza la diferencia entre la banda del infrarrojo cercano u el rojo para inferir información sobre qué tipo de cobertura podría tener el suelo. Los valores en este mapa oscilan entre 1 y -1, por lo tanto cuando un pixel toma un valor muy cercano a 1 la vegetación es abundante y saludable, cuando los valores son cercanos a 0 se trata de suelos desnudos y para los valores negativos hasta -1 la cobertura del suelo es agua. Un ejemplo de un mapa NDVI se muestra a continuación:



Figura 16 Mapa NDVI – Ciénaga de Zapatosa

Existen una gran variedad índices que pueden ser aplicados para este fin, en este caso el NDVI tiene muchos pros y contras, este índice es muy eficaz para la detección cuerpos de agua, el ejemplo de clasificación efectuado en este manual será usado este índice, muchas literaturas hablan de más índices que también captan la respuesta de la cobertura del suelo, tales como el SAVI (Soil Adjusted Vegetation Indices), TSAVI (Transformed soil-adjusted vegetation index), GEMI (Global Environment Monitoring Index) y el OSAVI (Optimised Soil-Adjusted Vegetation Index). Que son vistas optimizadas de la cobertura superficial, y se enfocan en tipos de características como la humedad en las plantas, el tipo de cultivo o cobertura.

Para eliminar las redundancias en las imágenes utilizamos el módulo i.pca y de esta manera generamos nuevos mapas. Las bandas de una imagen multispectral están correlacionadas, dado que existe similitud en la respuesta espectral de los objetos observados, por lo cual existe redundancia en los datos. Para esto el análisis de componentes principales (*Principal Component Analysis PCA*) el cual trasforma la información de bandas inicialmente correlacionada, en un nuevo conjunto de datos que no tengan correlación entre canales, al realizar esta

transformación la información de la imagen se concentrara en unos pocos canales, es decir cada dato de cada banda posee un valor el cual se si compara con el mismo pixel en otra banda podría tener el mismo valor o uno desviado, por lo cual estos valores tendrán una varianza, al final se seleccionaran los datos que menos varianza tienen, es decir los más acertados, obteniendo los PCA1, PCA2 y PCA3, mapas que son los que cuentan con la mayoría de los datos espectrales de las bandas.

A continuación se realiza la clasificación supervisada, primero se deben generar áreas de entrenamiento sobre el mapa NDVI, mediante vectores para diferenciar los tipos de cuerpos de agua, vegetación y zonas urbanas. A cada uno de estos vectores se les asigna la categoría a la que pertenecen, en este caso fueron hechas 20 clases diferentes, 10 perteneciste a tipos de agua y otras 10 pertenecientes a tipos de suelo, cuando se habla de tipos de suelo se refiere a la variación en su cobertura, cuando se habla de tipos de agua se refiere a variación de manera dinámica o estática y a su profundidad.

A las dos imágenes se les asigna el mismo tipo de clasificación con el fin que sean comparables, puesto que la clasificación se realizara en ambas con los mismos tipos de firmas espectrales.

Tabla de clases para la clasificación supervisada.	
Categoría	Tipo
1	Aguas más profunda estática
2	Agua profunda estática
3	Agua poco profunda estática
4	Agua superficial estática
5	Agua profunda ríos
6	Agua menos profunda ríos
7	Agua superficial ríos
8	Agua superficial ríos
9	Agua turbulenta ríos
10	Agua rápida ríos
11	Ciudad
12	Zona seca inundable
13	Suelo tipo 1
14	Suelo tipo 2
15	Suelo tipo 3
16	Suelo tipo 4
17	Suelo tipo 5
18	Suelo tipo 6
19	Suelo desnudo
20	Suelo vegetación densa

Figura 17 Tabla de áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada.

Con los mapas vectoriales y el módulo v.to.ras se genera un mapa ráster con las zonas de entrenamiento el cual juntos el grupo y el subgrupo creados del PCA y el módulo i.gensig genera las firmas espectrales para las zonas de entrenamiento.

Una vez definidas las firmas espectrales se procede a ejecutar el modulo i.maxlik el cual asignara todos los pixeles de la imagen de satélite a las clases derivadas del agrupamiento previo, y del definido en el archivo de firmas espectrales, es decir se genera el algoritmo de agrupamiento, las matrices de covarianza y la asignación de estos a cada pixel, el mapa resultado de éste proceso ya cuenta con la definición clara en cuanto que área está inundada o seca, un ejemplo de este mapa de clasificación se muestra a continuación:

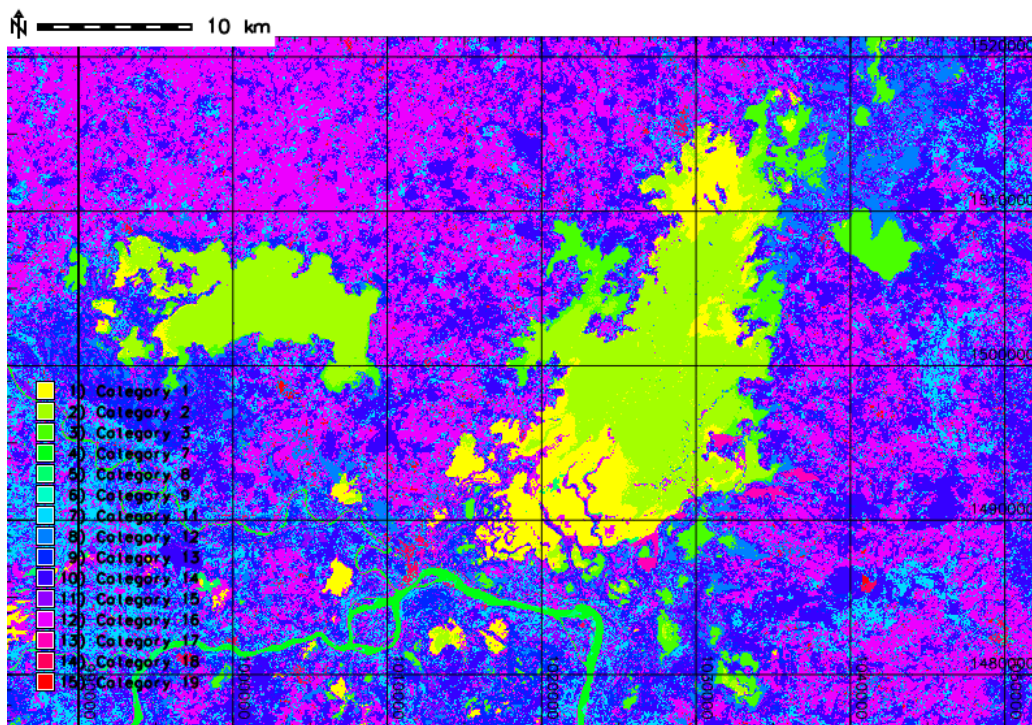


Figura 18 Mapa clasificación supervisada para Zapatosa.

Para identificar las áreas “mojadas” de las áreas “secas” en forma más simple la clasificación se utiliza el módulo r.reclass en el que se asigna el valor de 1 a las áreas mojadas y el valor de 2 a las áreas secas, dando así una visión más marcada de la zona de influencia del cuerpo de agua y como este análisis se hace en dos ventanas de tiempo diferentes para cada zonas, es posible observar el cambio de este con respecto al tiempo, y medible en cuanto al cambio espacial.

La evolución de zonas inundadas se puede cuantificar, evaluando el cambio en los pixeles, o el cambio en su estado, es decir que este cambio de una zona inundada a zona seca o viceversa, en este caso el orden correcto sería el primeramente nombrado sin embargo existen zonas que estaban secas y cambiaron a inundadas, puede deberse esto a errores en la calificación, sin embargo su

cantidad no es comparable con respecto al resto de zonas, por consiguiente es un error medible.

A continuación serán expuestos los resultados de estos procesos para el caso de la ciénaga de Zapatosá, en el primer mapa expuesto la clasificación marcada entre zonas mojadas y secas, el segundo mapa expuesto se verá la evolución de la mancha de inundación en la ventana de tiempo que se definió para el análisis y los pixeles que cambiaron su estado.

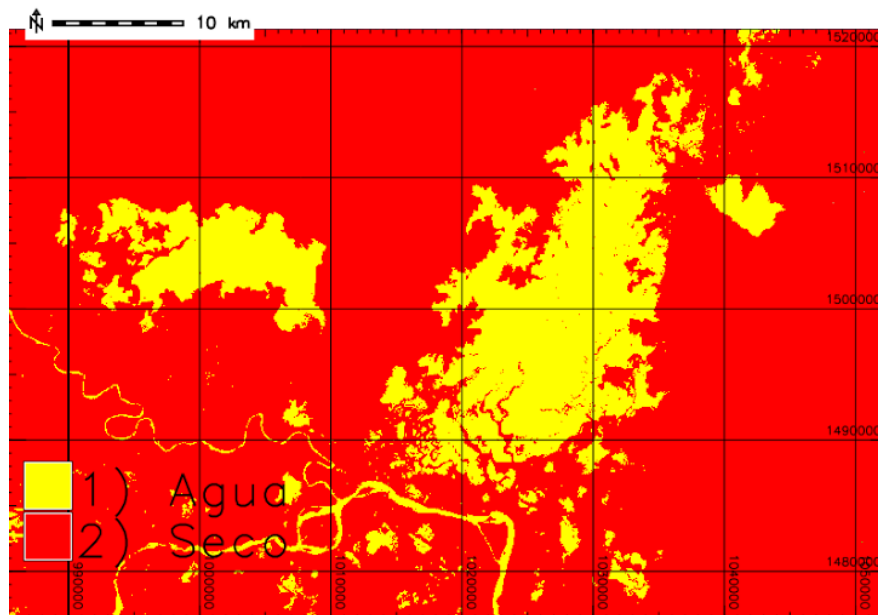


Figura 19 Mapa de clasificación Ciénaga de Zapatosá, 1) (Amarillo) Zona inundada, 2) (Rojo) Zona Seca.

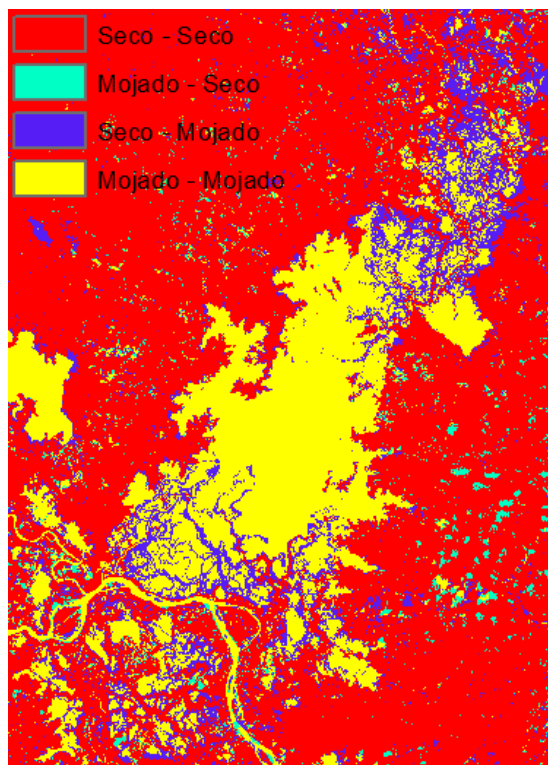


Figura 20 Mapa de cambio en mancha de inundación Ciénaga de Zapatosa. 1) (Amarillo) Zona inundada en ambos periodos, 2) (Azul) Zona seca que paso a inundad, 3) (Azul cian) Zona inundada que paso a seca, 4) (Rojo) Zona seca en ambos periodos.

5.2.2 Propuesta de delimitación de la ventana de la Ciénaga de Zapatosa, con base en el análisis de información Satelital a escala 1:110.000.

Propuesta:

Para llevar acaba la creación de estas ventanas se tuvieron en cuenta tres factores los cuales son considerados de gran importancia al momento de delimitar los cuerpos de agua. Se realizaron tres tipos de mapas para determinar el límite del espejo de agua del humedal, el primero corresponde al Índice de vegetación, el segundo es un análisis multitemporal (Matrices de confusión, (ver “Development of a sub-pixel analysis method applied to dynamic monitoring of floods, International Journal of Remote Sensing, 33:7, 2277-2295, Giraldo O. Juan Diego, Garcia G. Sandra Gabriela, 2011.”).) y la vista real de las imágenes. Todos estos con un shape que muestra los límites del cuerpo en la época de mayor nivel.

Insumos:

Para esta propuesta fueron usadas como insumo imágenes satelitales Landsat 8, las cuales se vienen tomando desde el año 2013, se escogerían las fechas según

los datos otorgados por la información hidrológica aportada por el IDEAM, en donde se calcularon los picos hidrológicos basados en las series de caudales y niveles de las estaciones hidroclimatológicas disponibles en el área de estudio.

5.2.2.1 Mapas entregados:

Mapa NDVI “Normalized Difference Vegetation Index”:

El origen y objetivo de este mapa de índices de vegetación es identificar la actividad fotosintética de las plantas, esta varía según su densidad espacial y estado de salud. Sin embargo este mapa también es capaz de diferenciar entre el suelo desnudo o con alguna cobertura no natural, además de identificar la respuesta espectral de los cuerpos de agua y diferenciar cuando éste es poco profundo a muy profundo. Por lo tanto existe una transición entre el cuerpo de agua profundo, las llanuras de inundación que normalmente esta desnudas, alguna urbanización y la vegetación en sus diferentes estados de salud y densidades. En este caso, el mapa de índice de vegetación es crucial para la identificación de los cuerpos de agua, puesto que en los niveles bajos, se cuenta con una alta capacidad de mostrar la transición en las diferentes coberturas del suelo, esto al momento de saber que zonas quedan al descubierto, cuales se inundan y de qué manera fluctúa la lamina de agua que alimentan el sistema de humedal. Es posible apreciar la gran amplitud que tiene el sistema de cuerpos acuáticos. Su capacidad de expandirse y contraerse es muy alta, ésta está directamente relacionada y afectada por las lluvias y las crecientes venideras aguas arriba de sus ríos tributarios.

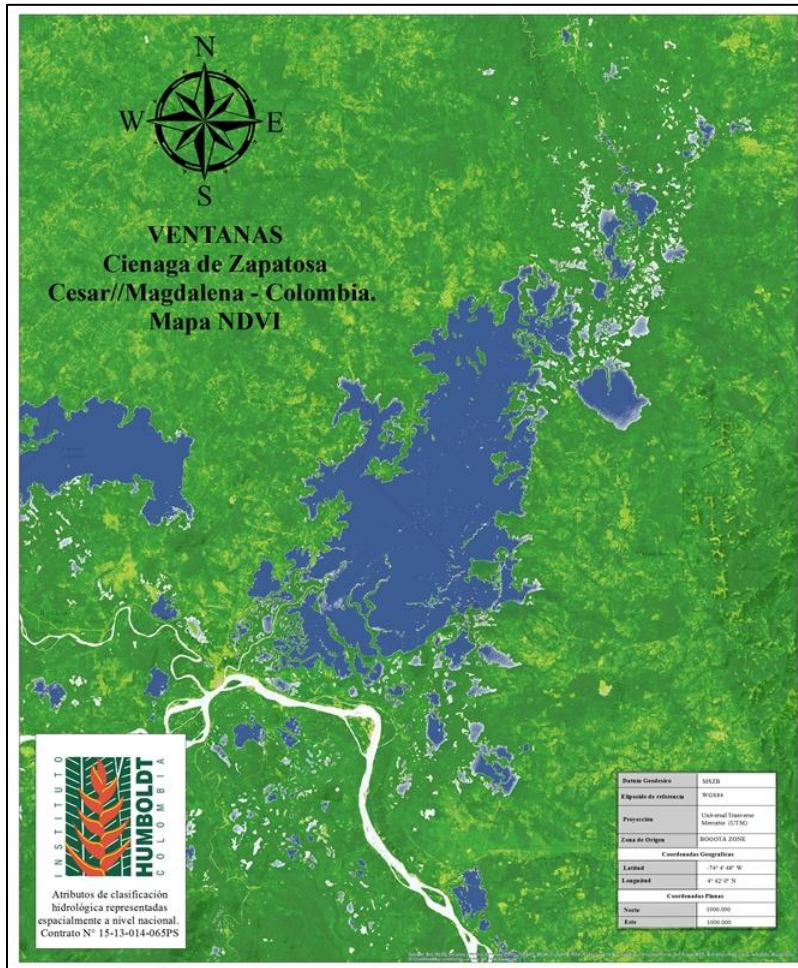


Figura 21 Mapa NDVI, Ciénaga de Zapatosa, Magdalena, Cesar, Colombia.

Mapa Matrices de confusión:

Este mapa, explicado también en la parte final de la metodología, tiene como objetivo exponer la multitemporalidad del análisis, la cual se hace comparando el cuerpo del agua en su época seca y húmeda del año. Estos extremos se encontraron analizando la información registrada por la estaciones de caudal del IDEAM. Para lograr este mapa es necesario tener dos imágenes puntas, ojala consecutivas de estas épocas del año en sus momentos pico.

Para escoger las imágenes que serían parte del análisis multitemporal se procedió a revisar toda la información hidrológica de la estación hidroclimatológica más cercana. Para el caso de la cienaga de Zapatosa se graficaron los datos de nivel de la estación 25027720 ubicada dentro del cuerpo de agua de la cienaga. Adicionalmente se graficaron los eventos de lluvia registrados por la estación pluviométrica 25020270, y los eventos de fenómeno del niño y la niña registrados dentro de la misma ventana de tiempo.

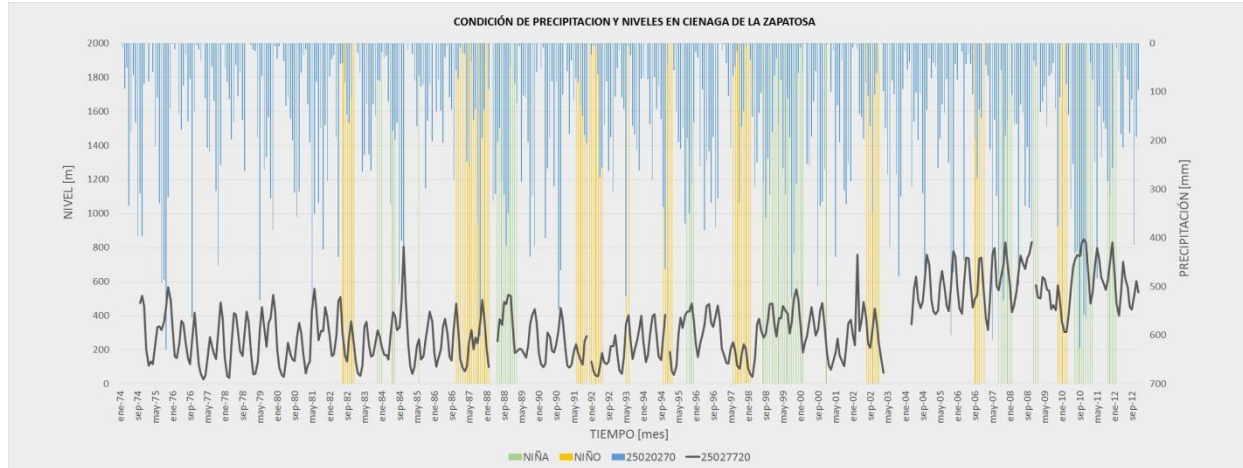


Figura 22 Caudal, Precipitación Vs Tiempo, Ciénaga de Zapatosa.

Dada la disponibilidad y la poca nubosidad en las imágenes satelitales, las imágenes finalmente escogidas fueron las siguientes:

Imagen Húmeda del satélite Landsat 5: It50080542000235

Imagen Seca del satélite Landsat 7: le70080542003011

La imagen muestra la comparación pixel a pixel de la imagen seca y la imagen húmeda. En Rojo se ven los pixeles que estaban secos en la imagen seca y permanecieron secos en la imagen húmeda. En cian los pixeles que estaban húmedos en la imagen seca y pasaron a estar secos en la imagen húmeda. El azul oscuro los pixeles que estaban secos en la imagen seca y pasaron a estar húmedos en la imagen húmeda. Finalmente el amarillo son los pixeles que permanecieron húmedos en ambas imágenes.

Con la ayuda de este mapa es posible observar la alta complejidad del sistema ciénaga y su gran número de conexiones, también lo sensible que es a los pulsos de inundación y las sequias que pudieran afectarlo. Su extensión, cabe resaltar es gigantesca, abarcando dos departamentos y siendo este el espejo de agua más grande de Colombia, nótese la gran fluctuación que puede observarse en el mapa resultado del análisis. Cabe resaltar que siguen existiendo cuerpos de agua bajo dosel o vegetación flotante, que aumentaría en área del espejo de agua. Al estar estos completamente cubiertos por vegetación, se dificulta su identificación. La mayoría del área inundada es captada por el análisis, sin embargo se podrían llegar a utilizar otro tipo de índices o combinaciones de bandas que permitieran detallar de mejor manera el agua que se encuentra bajo la vegetación.

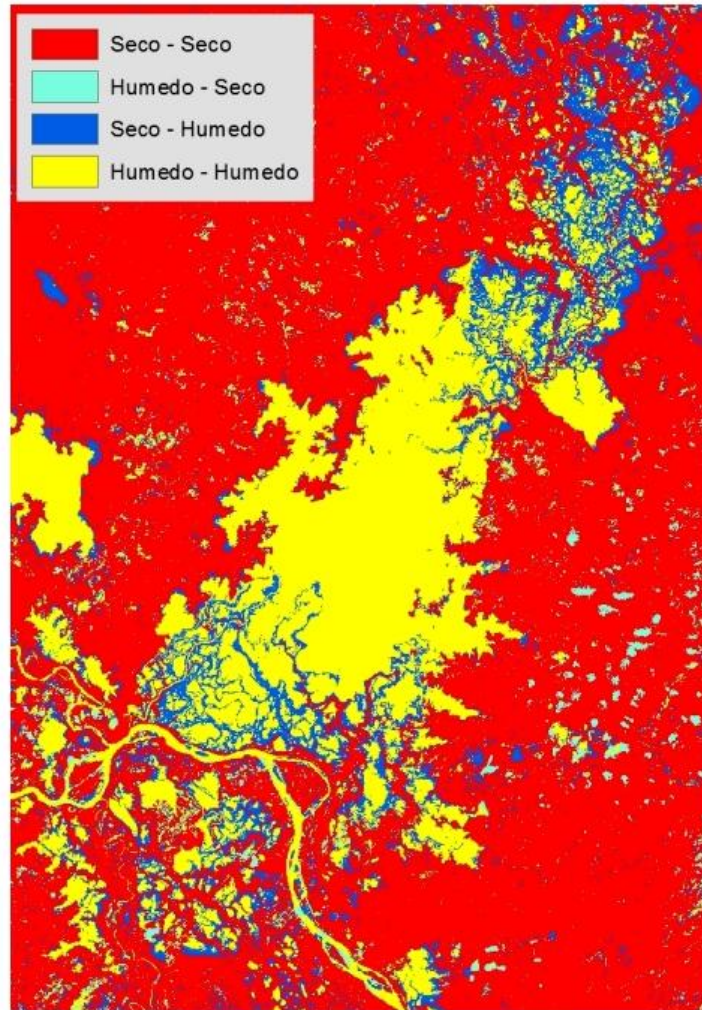


Figura 23 Mapa de Confusión, Ciénaga de Zapatosa, Magdalena, Cesar, Colombia.

Mapa imagen colores reales:

La creación de ese mapa se logra haciendo una combinación RGB de las bandas visibles, las cuales ya están debidamente corregidas, eliminando valores de nubosidad y rellenado vacíos. Es adecuado contar con esta imagen, puesto que gracias a la ayuda del polígono obtenido de las épocas altas del cuerpo de agua, es posible observar el área de afectación real del cuerpo, y en qué puntos puede existir amenaza de inundación en las poblaciones aledañas a la ciénaga.

Adicionalmente es posible apreciar coberturas, profundidades y cuerpos de agua pertenecientes al sistema de la ciénaga, de igual manera alrededor de ésta existe una gran diversidad de coberturas, las cuales, pudiéndolas ver en los dos extremos (húmedo y seco) se puede apreciar un entorno supremamente cambiante, que representa el sustento de vida para un sin número de especies y

pobladores, así como la base económica de miles de personas que subsisten de las bondades que ofrece la ciénaga de Zapatosa.

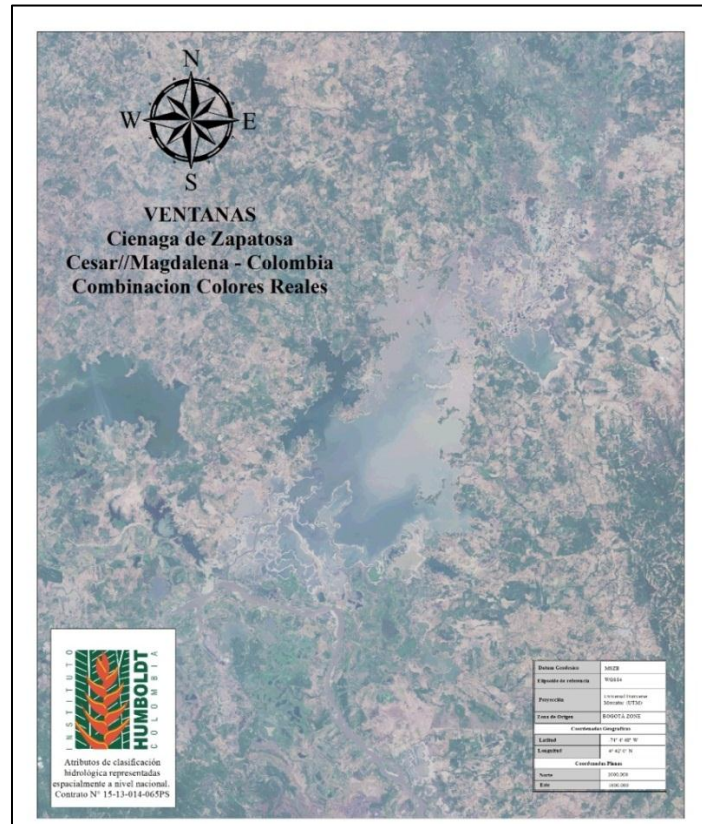


Figura 24 Mapa colores reales, Ciénaga de Zapatosa, Magdalena, Cesar, Colombia.

Es importante aclarar que los resultados del procedimiento acá expuesto, deberán ser comparados con los resultados de las demás metodologías de delimitación, la de vegetación, geomorfológica, y suelos. El límite final del humedal deberá ser el resultado del análisis conjunto, comparando los resultados acá expuestos con los de los otros consultores.

6 Anexos

- Plano 1. Mapa Combinación Colores Reales
- Plano 2. Mapa NDVI
- Plano 3. Mapa Matrices de Confusión

7 Bibliografía

- Oscar J. Mesa, Germán Poveda J, Luis F. Carvajal S. Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Medellín, Sede Medellín, Facultad de Minas, 1997
- Junk W.J, Piedade M.T, Lourival R, Wittmann F. Brazilian wetlands: Their definition, dealination , and clasification for research, susteinable management, and protection. 2013.
- Junk W.J, Wantzen K.M, Flood Pulsing and the Development and maintenance of Biodiversity in Floodplains. 2006.
- United States Environmental Protection Agency, EPA. Methods for Evaluating Wetland Condition, #20 Wetland Hydrology. 2008.
- Colwell R. Predictability, Constancy and Contingency of Periodic Phenomena. Ecology, Volume 55, Issue 5, 1974.
- Milhous R.T, Application of the Colwell Index to Monthly Streamflow Analysis, Colorado . 2012.
- Ricaurte L.F, Wetland Habitat Diversity in the Amazonian Piedmont of Colombia. Society of Wetlands Scientists. 2012.
- Junk W.J, The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. Max Planck Institut für Limnologie. 1984.
- Junk W.J, The Flood Pulse Concept: New Aspects, Approaches and Applications - An Update. Max Planck Institut für Limnologie. 2004.
- Neiff J.J, El Regimen de Pulsos en Rios y Grandes Humedales de Suramerica. Centro de Ecología Aplicada del Litoral,1997.
- Ven Te Chow. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill, 1993.
- Tiner R. The Primary Indicators Method - A Practical Approach to Wetland Recognition and Delineation in the United States. U.S Fish and Wildlife Service, 1993.
- Tiner R. Wetland Indicators: A Guide to Wetland Identification, Delineation, Classification and Mapping.
- Heeh. K.H, Lee. T.M, Hydrology and Ecology of Freshwater Wetlands in Central Florida. USGS, 2010.
- Corps of Engineers, Wetland Delineation Manual. Environmental Laboratory. 1987.
- Frazier. P, Page. K.J, Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data. 2000.
- IDEAM, Informe consolidado del área temática de batimetría parte I. Convenio IAvH e IDEAM. 2014.
- Vilorio de la Hoz, J. Economía Extractiva y Pobreza en la Ciénaga de Zapatosa, Banco de la Republica. 2008.
- PROGRAMA DEL, Plan para el Uso Sostenible de la Biodiversidad, Region Complejo Cenagoso de Zapatosa. Unión Europea, Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, República de Colombia. 2011.