

Evaluación de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización de ambientes de humedales

Miguel Angel Delpino Aguayo¹
Víctor Milciades Portillo Sosa²
Carlos René Mora Stanley³

¹Centro de Computación, Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Pilar
Narciso Gonzalez Romero, Campus Universitario, Pilar, Paraguay
mdelpino167@gmail.com

²Instituto de Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de
Pilar
Narciso Gonzalez Romero, Campus Universitario, Pilar, Paraguay
vportillososa@gmail.com

³Facultad de Ciencias, Tecnologías y Artes, Universidad Nacional de Pilar
Narciso Gonzalez Romero, Campus Universitario, Pilar, Paraguay
morastanley@yahoo.com

Resumen: En este trabajo se aborda el potencial de los índices espectrales, derivados de los sensores TM y OLI de Landsat, para el seguimiento al comportamiento de los regímenes de fluctuaciones hídricas en ambientes de humedales, así como para la determinación de los índices que mejor comportamiento presentan a dicho propósito. A partir del uso de los sensores remotos, es posible abordar estudios retrospectivos y realizar proyecciones en el comportamiento de los humedales del Ñeembucú. En una primera aproximación, se identificaron unidades comparativas. Las imágenes utilizadas corresponden a las imágenes del sensor TM de Landsat 5 del 06 de octubre del 2008, y del sensor OLI de LandSat 8, del 14 de abril del 2014; a los que se aplicaron diversos algoritmos de determinación de índices de agua, a fin de realizar análisis comparativo, a fin de determinar aquellas que presentan mejores comportamientos, identificados través del coeficiente kappa. Los resultados señalan que el modelo basado en el algoritmo ICEDEX, es el mejor indicador al propósito de determinar áreas saturadas de aquellas libres de inundaciones.

Palabras claves: TM, OLI, LandSat, ICEDEX.

Abstract: This paper deals with the potential of the spectral indices, derived from Landsat's TM and OLI sensors, to monitor the behavior of water fluctuation regimes in wetland environments, as well as to determine the best performance indices. to that purpose. From the use of remote sensors, it is possible to undertake retrospective studies and make projections on the behavior of Ñeembucú wetlands. In a first approximation, comparative units were identified. The images used correspond to the images of the TM sensor of Landsat 5 of October 6, 2008, and of the sensor OLI of LandSat 8, of April 14, 2014; to which various algorithms for determining water indices were applied, in order to perform comparative analysis, in order to determine those that present better behaviors, identified through the kappa coefficient. The results indicate that the model based on the ICEDEX algorithm, is the best indicator for the purpose of determining saturated areas of flood-free areas.

Keywords: TM, OLI, LandSat, ICEDEX

1. Introducción

El NDWI (Normalized Difference Water Index, o índice diferencial de agua normalizado), representa un índice, utilizado para la medición de la cantidad de agua presente en la vegetación o en el suelo, siendo una técnica utilizada para la determinación del nivel de saturación de humedad.

En el ámbito de los sensores remotos, se calcula a partir de imágenes adquiridas por los sensores satelitales, a partir de determinadas bandas espectrales, como resultado del nivel de reflectancia captada en el proceso de interacción con la superficie terrestre y los elementos presentes en ella.

Constituye una variación del NDVI, cuya ecuación invierte el orden de la banda espectral NIR o SWIR, reemplazándolo por una banda del espectro visible, con lo que se resaltan elementos inertes (agua), y se opaca la vegetación.

Los valores de NDWI obtenidos, son de interés en el ámbito de las ciencias ambientales, el estudio hídrico, la producción agropecuaria, entre otros campos, dado que los datos aportados son aplicables a diversos tipos de modelados, estudios predictivos, determinación del estrés hídrico en vegetación, saturación de humedad en suelo o la delimitación de masas de agua.

La determinación del NDWI, se realiza a través de la aplicación de un algoritmo matemático, que permite hallar la diferencia entre los valores de reflectancia de determinadas bandas del espectro electromagnético, captado por los sensores satelitales.

Los valores del índice poseen un rango de -1 a +1. Los valores menores a 0, están asociados a superficies brillantes sin presencia de vegetación o agua; los valores mayores a 0, indican presencia de agua y vegetación; cuanto más se acerca a 1, el valor, mayor es el contenido o presencia de agua.

2. Objetivo

Calcular índices espectrales derivados de sensores remotos, basados en diversos algoritmos, a fin de evaluarlos comparativamente a fin de determinar aquellas que presenten las mejores características con el propósito de aplicarlos a la caracterización de los humedales del Ñeembucú, en la República del Paraguay.

3. Materiales y Métodos

La combinación de los sensores remotos como fuente de información y los sistemas de información geográfica, para el procesamiento, surgen como herramienta analítica de grandes cantidades de datos, relacionados con los humedales, en particular, para los tomadores de decisión, como igualmente en la elaboración de cartografías, el desarrollo de simulaciones, la comparación de escenarios, la evaluación, la detección de correlaciones entre factores intervinientes, asociados con su distribución espacial y temporal, de acuerdo con Atkinson y Canter (2011).

En el presente artículo, se presenta la aplicación de la geotecnología, destinado al mapeo, análisis y apoyo a la gestión de los humedales, tal como se propone, para el caso de la cuenca del Arroyo Hondo; a partir de la aplicación del índice NDWI en ambiente de humedales, como son los casos desarrollados para el área del Pantanal, experiencia evidenciada en los trabajos de caracterización de la cobertura de la tierra, el estudio de la dinámica del agua, la localización y mapeo de áreas inundadas, la determinación de modelos destinados a la detección de inundaciones en área de humedales, o la estimación de áreas anegadas en periodos secos y húmedos en el Pantanal, entre otros trabajos, de acuerdo con Ribeiro Fernandes et al. (2012), dos Santos Galvanin et al. (2017), Duarte Marth et al. (2016), Linhares Frederico (2016) y Rodrigues de Azevedo & de Assis Cinquini (2012).

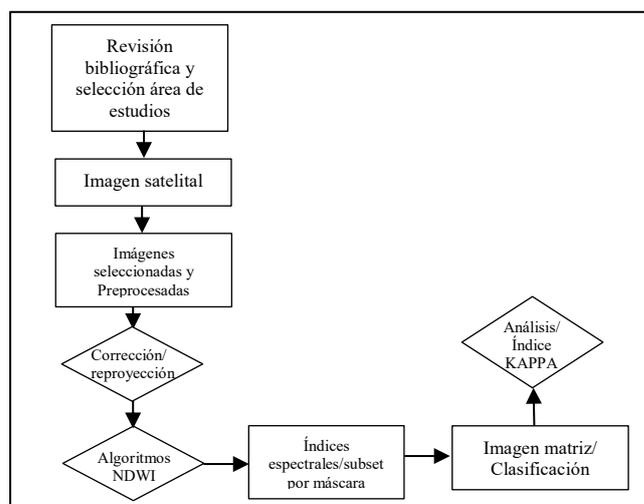


Figura 1. Esquema metodológico, seguido para el presente trabajo

El cálculo de los valores para el NDWI (Normalized Difference Water Index, o Índice Diferencial de Agua Normalizado), se realiza, aplicando el método de Gao (1996), en que se relacionan las bandas multispectrales NIR (Near InfraRed, o infrarrojo cercano) y la banda SWIR (Short Wavelength InfraRed, o infrarrojo corto), a partir de la ecuación: $NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$. McFeeters (1996), propone la sustitución de la banda SWIR por la banda visible del verde, quedando la ecuación: $NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$, cuyo propósito es la de maximizar la reflectancia del agua y la vegetación aplicando banda del espectro visible, y minimizándolo en el NIR. Otra propuesta, es la aplicación del MNDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado), de Xu (2006), que incorpora modificación a la propuesta de McFeeters (1996), en la que se sustituye la banda NIR por la de SWIR, quedando el algoritmo: $NDWI = (GREEN - SWIR) / (GREEN + SWIR)$.

Otro índice, es el ICEDEX (Índice del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), de España. Está destinado al mapeo de aguas continentales, en que se busca reducir la influencia de vegetación y la presencia de material en suspensión (sedimentos, algas). El algoritmo aplicado es: $ICEDEX = (NIR/ROJO) - (NIR/SWIR)$, conforme con Ariza et al. (2014). Según Ji et al. (2009), el valor de referencia establecido para discriminar la superficie inundada es el cero, los valores por debajo del mismo, son considerados agua.

La aplicación de espectro visible, es al fin de maximizar la reflectancia de las características acuáticas; en tanto que, la aplicación del SWIR y el NIR, tiene el propósito de minimiza la reflectancia de las características acuáticas, y maximizarla para la vegetación terrestre y los suelos.

Tabla 1. Relación entre las bandas espectrales de los sensores OLI y TM del satélite LandSat 8 y LandSat 5, de acuerdo con Gisandbeers (2018).

Plataforma/Sensor	Bandas Espectrales	Wavelength (µm)	Resolución Espacial (m)
LandSat8, OLI	3 Green	0,533 – 0,590	30
	4 Red	0,636 – 0,673	30
	5 NIR	0,851 – 0,879	30
	6 SWIR	1,566 – 1,651	30
	7 SWIR	2,107 – 2,294	30
LandSat5, TM	2 Green	0,520 – 0,600	30
	3 Red	0,630 – 0,690	30
	4 NIR	0,760 – 0,900	30
	5 SWIR	1,550 – 1,750	30
	7 SWIR	2,080 – 2,350	30

A los fines prácticos, las bandas espectrales de los sensores de la serie LandSat: el OLI (Operational Land Imager) y el TM (Thematic Mapper), se corresponden, tal como se resume en la **Tabla 1**.

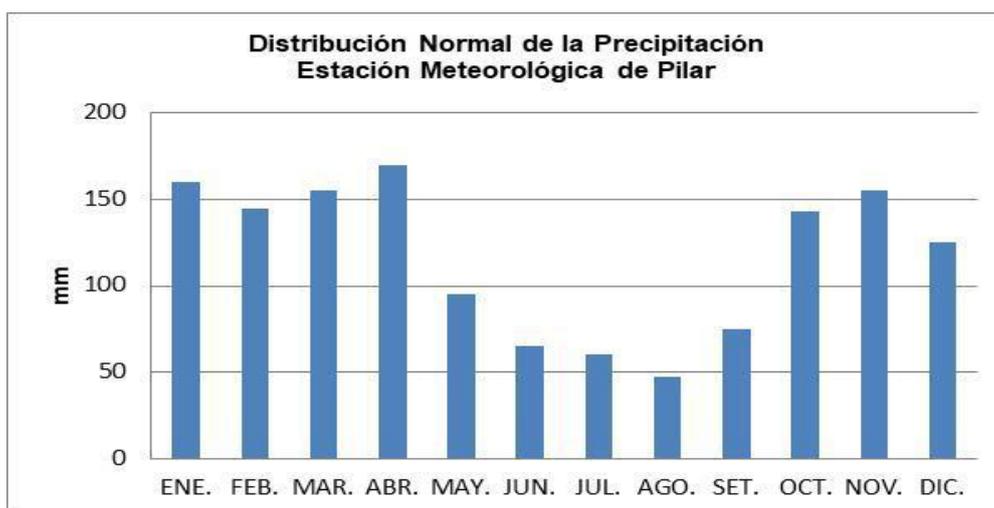


Figura 2. Distribución normal de la precipitación en la estación meteorológica de la ciudad de Pilar, de acuerdo con DGEEC (2014).

Precipitación Total (en milímetros) por mes, según estación meteorológica de Pilar (Lat. - 26°52' / Long. -58°19').

Tabla 2. Precipitación acumulada por mes y año, para los años 2008¹, 2010² y 2014³, estación meteorológica de la ciudad de Pilar, de acuerdo con registros de DGEEC (2014).

Total anual (mm)	MESES											
	VERANO (HUMEDO)			INVIERNO (SECO)								
	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
849,5 ¹	24,0	119,0	25,0	131,0	10,0	24,2	36,3	35,0	53,0	292,0	73,0	27,0
1363,0 ²	103,2	65,0	105,0	83,0	158,9	6,0	179,0	29,0	107,8	130,4	37,5	358,2
2129,7 ³	155,0	127,0	438,9	268,7	157,0	168,9	88,0	0,0	156,3	77,0	198,3	294,6

El área del Arroyo Hondo, se destaca en la región, como un centro de producción agropecuaria y turística. Los pobladores, se dedican a la pesca extractiva y deportiva, la producción bovina, y en menor medida a la agricultura.

El clima es templado a cálido, con una media de 22.1 °C, siendo enero el mes más cálido, en tanto que julio el más frío. Las precipitaciones, de acuerdo con la distribución media anual (**Figura 2.** y **Tabla 2.**), corresponde a una media de 1364 mm; siendo agosto el mes más seco, en tanto que abril es el mes más lluvioso, conforme a datos de la DGEEC (2014).

El área de estudio seleccionado para la realización del presente trabajo, corresponde al espacio geográfico de la cuenca del Arroyo Hondo, en el suroeste del XII Departamento de Ñeembucú, con una superficie de aproximadamente 360 Km², al que se anexa un área buffer, definidos por las coordenadas UTM X1= 362341, X2= 387653, e Y1= 7025916, Y2= 6985037, FUSO21. Se establece el uso de la Proyección denominada Universal Transversa de Mercator (UTM), y como Datum la representación WGS84 (World Geodesic Systems). La revisión de los registros pluviométricos para la estación meteorológica de la ciudad de Pilar (Lat. -26°52' / Long. -58°19') y de datos obtenidos en de TuTiempo (2018); se realizó al fin de orientar la búsqueda de imágenes satelitales disponibles acorde con el objetivo propuesto para la investigación.

Las escenas disponibles, del LandSat 8 (OLI) y LandSat 5 (TM), correspondiente con los datos pluviométricos (temporadas cálidas y húmedas y temporadas secas y frescas), y su distribución promedio anual, obtenidas del repositorio <http://earthexplorer.usgs.gov>, fueron: LT05_L1TP_226079_20081006_20161029_01_T1, del 06 de octubre de 2008, y LC08_L1TP_226079_20140414_20170423_01_T1, del 14 de abril del 2014.

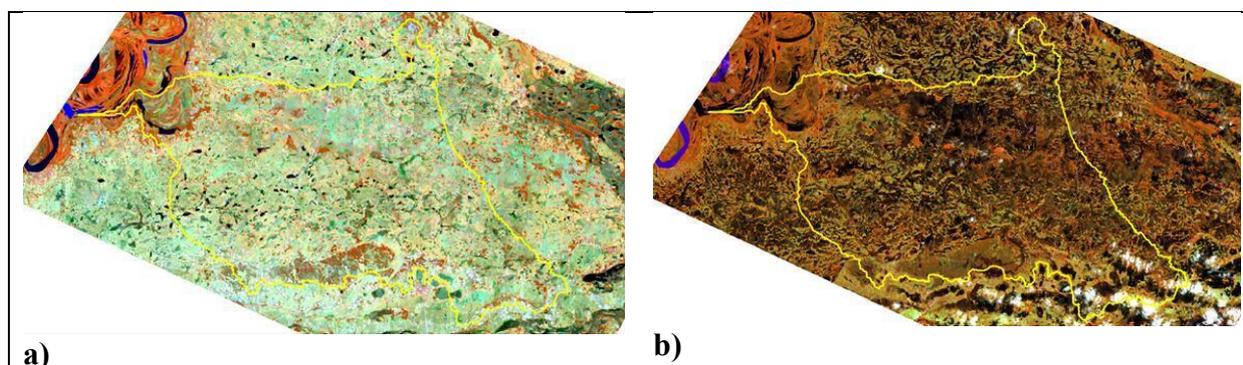


Figura 3. Localización Geográfica de la cuenca del arroyo Hondo y el área buffer de estudio. Imagen LandSat 5 TM, RGB-543, del 06/10/2008 **a)**, e Imagen LandSat 8 OLI, RGB-654, del 14/04/2014 **b)**.

Las diversas bandas multispectrales a ser utilizadas, provenientes de los satélites LandSat 8 y LandSat 5 (**Tabla 1**), posteriormente procesadas. Estos datos fueron gestionados a través del Sistemas de Información Geográfica QGIS y empleando las correspondientes imágenes provenientes de los mencionados satélites.

Las imágenes previamente tratadas, de acuerdo con la metodología propuesta (**Figura 1**), son sometidas a las funciones de álgebra de mapas, a través de la herramienta Calculadora Raster del QGIS, para la realización de las funciones matemáticas, siguiendo la metodología propuesta, en el procesamiento de los valores y análisis de píxeles, para la obtención de una nueva imagen de índices espectrales del agua, al que se aplica la asignación de tonos y colores para el realce e identificación de zonas húmedas de interés, contrastada con los espacios con bajo tenor o ausencia de agua.

Se propone la aplicación de los algoritmos sugerido por Gao (1996), McFeeters (1996), Xu (2006) y el ICEDEX, de acuerdo con Ariza et al. (2014), a fin de realizar una contrastación en cuanto a los resultados arrojados, en el proceso de realzar y diferenciar territorios cubiertos de agua, de aquellas libre de ella, a fin de determinar la que brinde los mejores resultados, para el espacio territorial bajo estudio.

4. Resultados y Discusiones

Las imágenes obtenidas, previo tratamiento a través del software QGIS (reproyecciones, correcciones), se ha aplicado el álgebra de mapa, con lo que se obtuvo una nueva capa raster correspondiente a los índices espectrales de agua, como resultado de la aplicación de los diversos algoritmos (Figura 4).

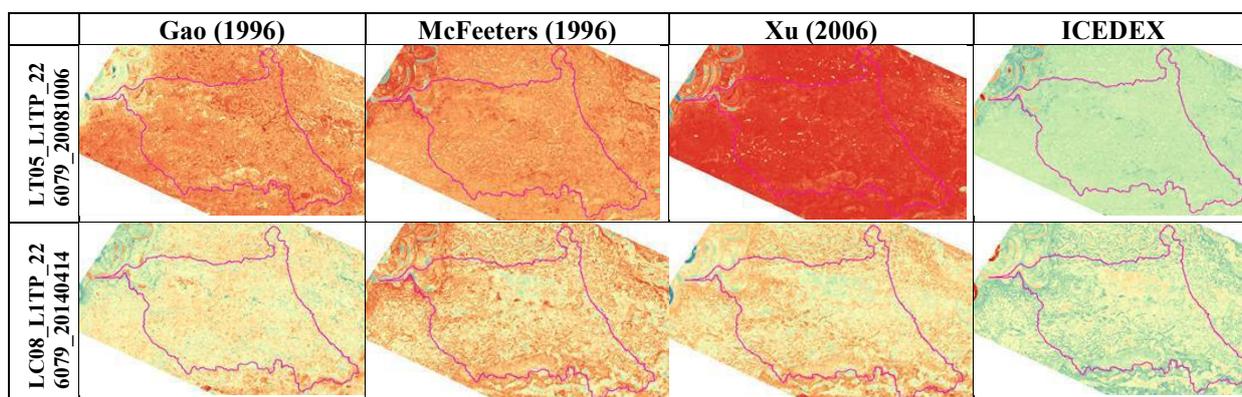


Figura 4. Índices espectrales, aplicando diversos algoritmos, para la cuenca del Arroyo Hondo.

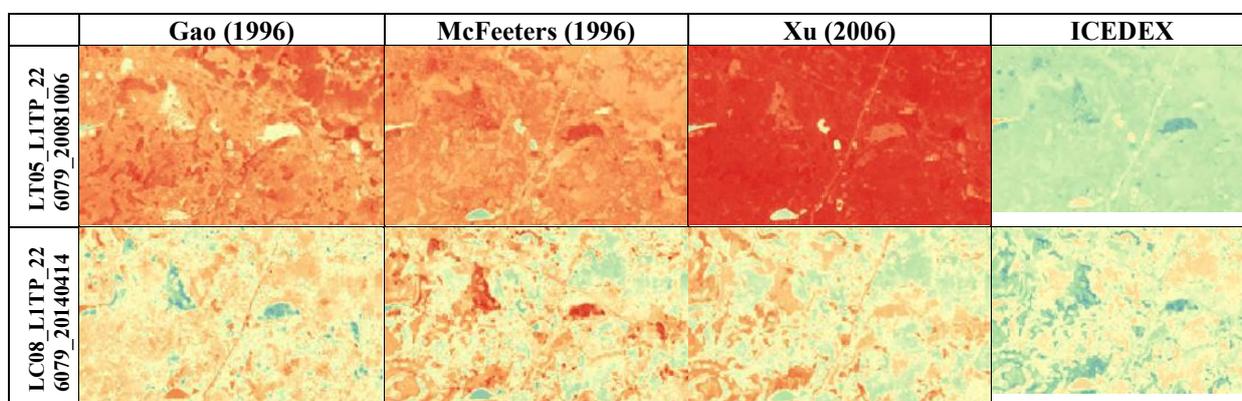


Figura 5. Índices espectrales, coordenadas UTM 369494/7007217 WGS84, Fuso21S.

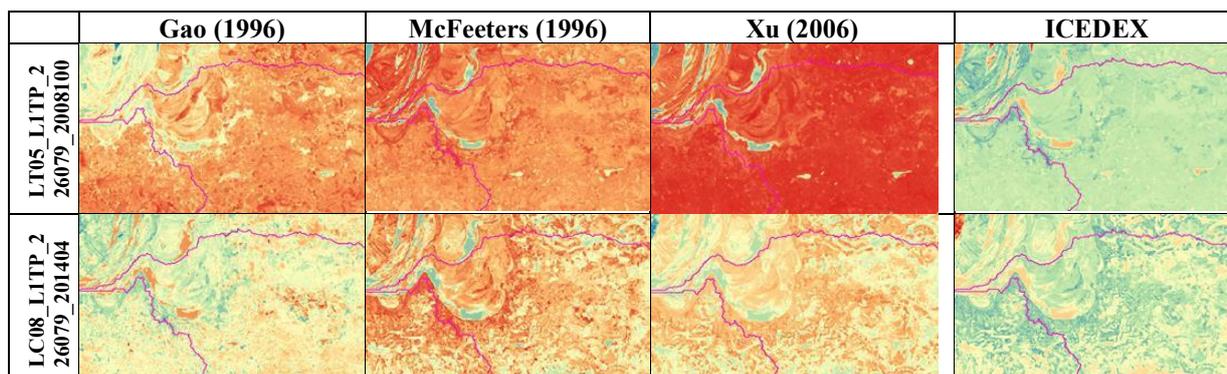


Figura 6. Índices espectrales, coordenadas UTM 359504/7009908 WGS84, Fuso21S.

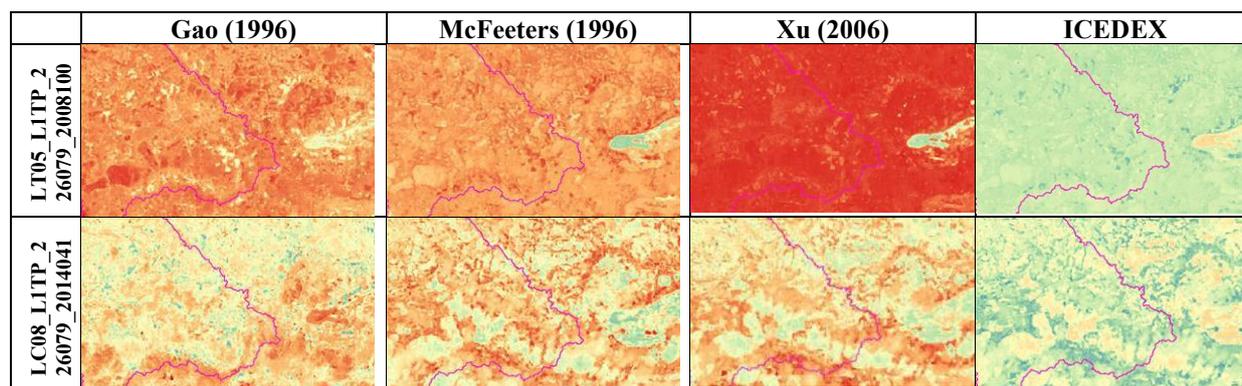


Figura 7. Índices espectrales, coordenadas UTM 384447/6998642 WGS84, Fuso21S.

Tabla 3. Rango de valores de índice diferencial de agua, obtenidos aplicando diversos algoritmos.

Temporalidad/Algoritmos	Gao (1996)	McFeeters (1996)	Xu (2006)	ICEDEX
LT05_L1TP_226079_20081006	Min.: -0,492958 Max.: 0,64557	Min.: -0,591549 Max.: 0,526316	Min.: -0,631902 Max.: 0,744681	Min.: -3,04839 Max.: 3,46286
LC08_L1TP_226079_20140414	Min.: -0,04934 Max.: 0,367189	Min.: -0,462046 Max.: 0,221264	Min.: -0,340717 Max.: 0,303999	Min.: -1,05698 Max.: 1,33404

Tabla 4. Parámetros de calidad.

Clases	Descripción	Gao (1996)				McFeeters (1996)				Xu (2006)				ICEDEX			
		Imagen TM		Imagen OLI		Imagen TM		Imagen OLI		Imagen TM		Imagen OLI		Imagen TM		Imagen OLI	
		PG (%)	K (%)	PG (%)	K (%)	PG (%)	K (%)	PG (%)	K (%)	PG (%)	K (%)	PG (%)	K (%)	PG (%)	K (%)	PG (%)	K (%)
1	Cuerpo de Agua	75	61	70	54	73	60	59	51	75	73	71	59	75	73	72	60
2	Cobertura Arbórea	79	72	72	60	78	73	68	57	79	73	69	60	78	75	70	60
3	Área inundada	70	62	64	50	68	59	57	49	71	62	59	50	70	63	61	52
4	Praderas	72	63	67	54	71	61	67	56	71	63	68	59	72	64	68	60
Precisión		0,69		0,61		0,67		0,58		0,70		0,61		0,71		0,62	
Fuerza de concordancia		Buena		Buena		Buena		Moderada		Buena		Buena		Buena		Buena	

Referencias: **PG**: Precisión Global (%), por cada clase; **K**: Índice Kappa (%), por cada clase

La elección de ambas temporalidades de las imágenes, es al propósito de hacerlas corresponder con la temporada estacional de máxima y mínima precipitación pluvial; como así mismo hacerlas coincidir con momentos de sequía (850mm) y periodo lluviosa (2129mm), teniendo en consideración la media anual de 1360mm; con lo cual es posible realizar una contrastación en cuanto a la elongación del área anegada en periodos de alta pluviosidad, y los límites mínimos a los que se contraen en periodos de escasas precipitaciones.

En la **Figura 4**, se muestra un resumen de los índices espectrales de agua utilizadas para la determinación de la presencia de agua en la zona de estudios, correspondiente al 06 de octubre de 2008, fecha de máxima contracción de las áreas anegadas, y el del 14 de abril de 2014, fecha coincidente con un periodo de máxima expansión de los cuerpos de agua para la zona.

Para la determinación del índice espectral de agua, se aplicaron diversos algoritmos, todas al mismo propósito, a fin de contrastarlas e identificar aquellas que presenta mejores

comportamientos en la determinación y caracterización de los humedales en el Ñeembucú. Los algoritmos aplicados fueron el de Gao (1996), de McFeeters (1996), de Xu (2006), y el ICEDEX, de acuerdo con Ariza et al. (2014).

Para la evaluación de los resultados de cada índice NDWI, se utilizaron los coeficientes de exactitud global y Kappa, generados a partir de la matriz de confusión, que compara, clase por clase, la relación entre los datos de referencia conocidos y los resultados correspondientes con una clasificación automatizada según Lillesand et al. (2004); con el propósito de hallar el material cartográfico con los datos más próximos a la realidad, de acuerdo con Antunes e Lingnau (1997).

El índice Kappa (K), mide el grado o fuerza de la concordancia, para determinar la exactitud de la clasificación. De acuerdo con Landis y Koch (1977), la valoración de dicho índice se resume en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Valoración del índice Kappa

INDICE KAPPA	Fuerza de la concordancia
< 0,20	Pobre
0,21 – 0,40	Débil
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Buena
0,81 – 1,00	Muy buena

Las **Tablas 3 y 4**, resume los valores para los coeficientes de exactitud global y Kappa, para los resultados de los cuatro algoritmos de NDWI aplicados, obtenidas para las imágenes LandSat 5 TM y LandSat 8 OLI.

Los resultados obtenidos demuestran que los algoritmos basados en McFeeters (1996) y de Gao (1996), son las que presentan los resultados más pobres en cuanto a los índices espectrales del agua, perdiendo en gran medida el grado de detalle necesario para la determinación de los límites entre áreas anegadas y aquellas libres de inundaciones, cuyo suelo pueda considerarse saturado o seco (**Figura 4 y Tabla 4**). Estos resultados permanecen constantes tanto para la temporada de sequía, como para la de alta pluviosidad. En tanto, que los algoritmos basados en Xu (2006) y el ICEDEX, conforme a Ariza et al. (2014), son las que mejores resultados han arrojado, destacándose particularmente éste último índice, debido al alto nivel de contraste e identificación de los diversos elementos presentes (**Figura 4**), que se corresponde con un rango más amplio de valores obtenidos (**Tabla 3.**), y mejores valores para los coeficientes de exactitud global y Kappa (**Tabla 4**).

El mencionado índice, logra un mayor nivel de respuesta espectral, comparativamente con relación a los basados en otras propuestas (**Figura 5**), en la misma, es posible identificar unidades como la formación de áreas de cobertura arbórea, espejos de agua, suelos anegados, áreas libres de inundaciones, trazados viales. Igualmente, presenta una buena respuesta, al permitir un alto nivel de contrastación, para el análisis de áreas costeras y sus bordes, cursos potámicos, vegetación acuática, cuerpos de agua, entre otras unidades (**Figura 6**).

En cuanto se refiere a la caracterización de humedales, y la determinación de la elasticidad (elongación) de las áreas anegadas y de retracción, el ICEDEX, constituye la mejor opción con relación a los demás índices aplicados, al identificar unidades de interés al propósito mencionado (**Figura 7 y Tabla 4**).

5. Conclusiones y Sugerencias

En el cometido de realizar seguimientos y caracterización de los humedales del Ñeembucú, la aplicación de los cálculos de índices espectrales derivados de sensores remotos, constituye

una opción viable desde la perspectiva de que la misma puede ser aplicada en un contexto retrospectivo y en la proyección de la misma.

Se han identificado diversas metodologías para el cálculo de los índices espectrales a partir de las imágenes provenientes de los sensores remotos satelitales.

Se han aplicado cálculos basados en los algoritmos de Gao (1996), de McFeeters (1996), de Xu (2006), y utilizando el ICEDEX.

Se han identificado que los algoritmos basados en Xu (2006) y el ICEDEX, presentaron los mayores niveles de contraste y diferenciación de las unidades de interés, para el área de los humedales del Ñeembucú; no obstante, el ICEDEX ha presentado las mejores respuestas espectrales al fin propuesto.

Esta primera aproximación, permite corroborar, que mediante la adquisición de una imagen y su procesamiento, resulta factible la caracterización de los humedales del Ñeembucú, teniendo en cuenta la elasticidad de la misma, basado en el contraste entre periodos de sequía y de alta pluviosidad; permitiendo realizar seguimientos, de la evolución de los cuerpos de agua en temporalidades que resulten de interés.

Así mismo, se destaca que esta herramienta, evidencia una mayor utilidad, cuanto mayor sea el área geográfica de estudio, complementada con tareas de campo y otros estudios que contribuyan a establecer una correlación.

Se destaca que, la determinación del índice espectral del agua, permite identificar con mayor grado de precisión, las potenciales zonas húmedas, la delimitación de áreas saturadas, entre otros estudios complementarios.

Se evidencia la importancia y potencialidad del NDWI, para la caracterización de la cobertura de la tierra; el estudio de la dinámica del agua; la localización y mapeo de áreas inundadas; la determinación de modelos destinados a la detección de inundaciones en área de humedales; la estimación de áreas anegadas; la detección de propiedades de interés, en cultivo o en la vegetación; la determinación del estrés hídrico y la saturación de humedad del suelo; la delimitación de mesas de agua; resultan importantes para obtener ecuaciones empíricas, para la determinación de propiedades de interés, como ser la productividad, el crecimiento, las características del suelo, de cultivos o de las formaciones vegetales; además, es aplicable a la agricultura de precisión.

6. Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Pilar, en la persona del Decano, Lic. Jorge Fornerón por su permanente ayuda y aliento en la realización de los trabajos de Investigación; a la Directora de Investigación y Postgrado, Dra. Nélide Soria Rey quien acompañó en todo momento las actividades de éste trabajo; y a la Facultad de Ciencias, Tecnologías y Artes de la UNP, en la persona de su Decano, el Dr. Ever Villalba, quien permanentemente ha alentado las tareas que hace a la realización de las labores de investigación.

7. Referencias

Antunes, A. F. B. y Lingnau, C. 1997. Uso de índices de acurácia para avaliação de mapas temáticos obtenidos por meio e classificação digital. In: **III Congreso e Feira para Usuários de Geoprocessamento**. Curitiba, p. s/n, 1997, en <https://docs.ufpr.br/~felipe/master.pdf>, accesado en fecha 27/07/2018.

Ariza, A., García, S. Rojas, S. y Ramírez, M., Desarrollo de un modelo de corrección de imágenes de satélite para inundaciones: (CAIN - Corrección Atmosférica e Índices de Inundación). [en línea]. Bogotá D.C. **Centro de Investigación y Desarrollo en información Geográfica del IGAC-CIAF**, UN-SPIDER Regional Support Office in Colombia, 2014. Disponible en: <http://docplayer.es/2900781-Desarrollo-de-unmodelo-de-correccion-de-imagenes-de-satelite-para-inundaciones-caincorreccion-atmosferica-e-indices-de-inundacion.html>, accesado 20/06/2018.

Atkinson, Samuel F. y Canter, Larry W. 2011. **Assessing the cumulative effects of projects using geographic information systems**. Environmental Impact Assessment Review Volume 31, Issue 5, September 2011, Pages 457-464. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.01.008>, acessado en fecha 27/07/2018.

dos Santos Galvanin, Edinéia Aparecida; Madureira Cruz, Carla Bernadete; Sanchez Vicens, Raúl; Duarte Marth, Jonathan; Vilaverde Moura, Nina Simone; Koester, Edinei. 2016. **Localização e mapeamento de Áreas Úmidas na Sub-bacia Hidrográfica Arroio Santa Isabel, através do Método NDWI**. Geografia (Londrina) v. 25. n. 1. p.23-41, jan/jun, 2016, en <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/21437>, acessado en fecha 27/07/2018.

Gao, Bo-Cai, 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 58: 257-266, en http://ceeserver.cce.cornell.edu/wdp2/cee6150/Readings/Gao_1996_RSE_58_257-266_NDWI.pdf, acessado 20/05/2018.

Ji, Lei; Zhang, Li y Wylie, Bruce. 2009. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**.

Landis, J.R.; Koch, G.G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Arlington, v.33, n.1, p.159-174, mar. 1977.

Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. and Chipman, J.W. 2004. **Remote sensing and image interpretation**. 5.ed. Madison: Wiley, 2004. 763p.

Linhares Frederico, Jéssica da Silva. 2016. **Estabelecimento de um modelo de detecção de inundação no pantanal norte a partir de produtos derivados de imagens Landsat TM**. Tesis. Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, en <http://www.pgfa.ufmt.br/index.php/en/utilities/files/banco-de-dissertacoes-do-programa/366-j%C3%A9ssica-linhares-frederico/file>, acessado en fecha 27/07/2018.

Mas, Jean François; Díaz-Gallegos, José Reyes y Pérez Vega, Azucena. 2003. **Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión**. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM Núm. 51, 2003, pp. 53-72, en <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n51/n51a5.pdf>, acessado en fecha 27/07/2018.

McFeeters, S. K., 1996. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal Of Remote Sensing**, 17, pp. 1425-1432.

Ribeiro Fernandes, Renner; Manzon Nunes, Gustavo e Freire Silva, Thiago Sanna. 2012. **Classificação orientada a objetos aplicada na caracterização da cobertura da terra no Araguaia**. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.47, n.9, p.1251-1260, set. 2012, en <http://www.scielo.br/pdf/pab/v47n9/10.pdf>, acessado en fecha 27/07/2018.

Rodrigues de Azevedo, Adriana y de Assis Cinquini, Jonas. 2012. **Estimativa de áreas alagadas no período de seca e cheia em ottobacia no município de Corumbá/MS, utilizando NDVI, NDWI e atributos de textura em imagens Landsat/TM**. Anais 4º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Bonito, MS, 20-24 de outubro 2012 Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 71 -80, en <https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2012/cd/p14.pdf>, acessado en fecha 27/07/2018.

Xavier Pereira, Murilo Henrique and Alves da Silva Neves, Sandra Mara. 2017. **Study of the Floodflow Dynamics in the Pantanal of Cáceres/MT**. In Proceedings of the 3rd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2017), pages 195-200

Xu, H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal Of Remote Sensing**, 27(14), 3025-3033. doi:doi:10.1080/01431160600589179.

[DGEEC, 2014] Dirección General de Estadísticas Encuestas y Censos. 2014. **Anuario Estadístico del Paraguay. Territorio, hidrología y climatología**, en <http://www.dgeec.gov.py/>. Acessado 25/05/2018.

[Gisandbeers, 2018] **Equivalencia de bandas multispectrales entre satélites**. <http://www.gisandbeers.com/equivalencia-bandas-multispectrales-satelites/>, acessado 20/06/2018.

[QGIS, 2018] **QGIS. Un Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto**. <https://qgis.org/es/site/>, acessado 20/05/2018.

[Tutiempo, 2018] <https://www.tutiempo.net/clima/03-2008/ws-862550.html>. Acessado 25/05/2018.