

Sensores remotos y técnicas de teledetección para el monitoreo espaciotemporal de cuerpos de agua: una revisión sistemática

Remote sensing and remote sensing techniques for spatial-temporal monitoring of water bodies: a systematic review

Recepción del artículo: 04/02/2026 • Aceptación para publicación: 20/04/2026 • Publicación: 01/05/2026

<https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi28.424>

Reynaldo de León-Valladares
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1208-5865>

María Inés Yáñez-Díaz*
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6715-4723>

Luis Gerardo-Cuéllar Rodríguez
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4969-611X>

José Israel Yerena-Yamallel
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9216-7427>
 Universidad Autónoma de Nuevo León.
 Facultad de Ciencias Forestales. Linares,
 Nuevo León, México.

*Autor para correspondencia:
maria.yanezd@uanl.edu.mx

Resumen

El agua representa uno de los recursos naturales más críticos para el desarrollo económico, productivo y social de los países; sin embargo, solo el 1% del agua del planeta se encuentra disponible en la superficie terrestre, lo que convierte su monitoreo en una prioridad global. El presente estudio tiene como objetivo evaluar los sensores remotos y técnicas de teledetección disponibles para determinar la disponibilidad y variabilidad espacio-temporal de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Se realizó una revisión sistemática de literatura a partir de 47 fuentes publicadas entre 2015 y 2024, consultadas en bases de datos como Scopus, Web of Science, Google Scholar y ScienceDirect. Los resultados indican que el 68% de los estudios emplean sensores ópticos multiespectrales, el 21% sensores de apertura sintética (SAR) y el 11% sensores gravitacionales. El sensor Sentinel-2 fue identificado como el de mejor equilibrio entre resolución espacial (10 m) y temporal (10 días) para el monitoreo regional. Los sensores SAR demostraron mayor eficacia en la detección de inundaciones bajo condiciones de nubosidad, mientras que la misión GRACE/FO constituye la principal herramienta para el seguimiento del almacenamiento de agua subterránea a escala global. Se concluye que la integración de estrategias multisensor y el uso de datos de acceso abierto representan la tendencia más prometedora para fortalecer la gestión sostenible de los recursos hídricos a nivel mundial.

Palabras clave: Imágenes satelitales, revisión sistemática, recursos hídricos, análisis espacial, teledetección, índices espectrales.

Abstract

Water represents one of the most critical natural resources for the economic, productive, and social development of countries; however, only 1% of the planet's water is available on the Earth's surface, making its monitoring a global priority. This study aims to evaluate the remote sensors and remote sensing techniques available to determine the availability and spatiotemporal variability of surface and groundwater resources. A systematic literature review was conducted using 47 sources published between 2015 and 2024, consulted in databases such as Scopus, Web of Science, Google Scholar, and ScienceDirect. The results indicate that 68% of the studies use multispectral optical sensors, 21% synthetic aperture radar (SAR) sensors, and 11% gravitational sensors. The Sentinel-2 sensor was identified as having the best balance between spatial (10 m) and temporal (10 days) resolution for regional monitoring. SAR sensors proved more effective in detecting flooding under cloudy conditions, while the GRACE/FO mission is the primary tool for monitoring groundwater storage globally. It is concluded that the integration of multisensor strategies and the use of open access data represent the most promising trend for strengthening sustainable water resource management worldwide.

Keywords: Satellite images, systematic review, water resources, spatial analysis, remote sensing, spectral indices.

Introducción

El agua es un recurso natural de suma importancia, de él depende la sostenibilidad de los ecosistemas; además es básico para la población y para las actividades relacionadas con la producción de bienes y servicios. Actualmente presenta un desafío urgente para el ser humano, ya que la demanda cada vez es mayor y los recursos hídricos cada vez más escasos, estresados y vulnerables (UNESCO, 2022).

La mayor distribución de los recursos hídricos se encuentra en los océanos con un 96.5%; sin embargo, tan solo el 2.5% es agua dulce. De este porcentaje, el 68% está almacenada en glaciares, el 30% es agua encontrada en el subsuelo y el 0.2% escurre en ríos y lagos (Ochoa, 2022). En las últimas cuatro décadas, el uso del agua se ha incrementado en un 1% anualmente (UNESCO, 2023), debido al crecimiento demográfico, el desarrollo económico y los cambios en los patrones de consumo.

Los cuerpos de agua superficiales han mostrado sequías intensas y pérdidas de volumen (Lioubimtseva, 2023), fragmentación de ríos y pérdida de conectividad ecológica (Grill *et al.*, 2019), y la reducción de humedales a nivel global (Nick *et al.*, 2023). Por otro lado, los acuíferos más grandes a nivel mundial presentan un agotamiento del 30% (Jasechko *et al.*, 2024) y se estima que para el 2050, el 70% de los acuíferos podría agotarse (IPCC, 2023).

La disponibilidad de los recursos hídricos en diferentes escalas requiere herramientas prácticas, analíticas e innovadoras que permitan predecir, evaluar y analizar la evolución de los cuerpos de agua (Normandín *et al.* 2024)). En este contexto, la teledetección mediante sensores remotos ofrece capacidades únicas para el monitoreo continuo, espacial y temporal de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (Bhaga *et al.*, 2020).

El objetivo de esta investigación es evaluar y comparar los diferentes sensores remotos, sus características técnicas y las técnicas de procesamiento disponibles para el monitoreo de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, mediante una revisión sistemática de literatura publicada entre 2015 y 2024.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión sistemática de literatura de carácter descriptivo-analítico, orientada a identificar, clasificar y comparar los sensores remotos y técnicas de teledetección empleados para evaluar la variabilidad espacial y temporal de cuerpos de agua superficiales y subterráneos a escala global. Este enfoque metodológico permite analizar el conocimiento existente con base en criterios explícitos y reproducibles (Chawla *et al.*, 2020), superando las limitaciones históricas de los métodos convencionales de monitoreo hídrico.

Por décadas, la caracterización de la variabilidad de los cuerpos de agua se sustentó en observaciones in situ que determinaban el movimiento altura, extensión y descarga y la calidad del agua en sistemas superficiales y subterráneos (Papa *et al.*, 2022). Sin embargo, estos registros presentan restricciones para realizar seguimientos espaciales y temporales continuos de fenómenos como inundaciones, fluctuaciones en ríos y variaciones en lagos a largo plazo. Frente a estas limitaciones, la teledetección emerge como una alternativa técnica y económicamente viable para observar y evaluar los cuerpos de agua con cobertura espaciotemporal de manera continua (Chawla *et al.*, 2020). La teledetección se define como la adquisición de información sobre objetos o fenómenos a través de datos captados por sensores que no se encuentran en contacto directo con el objeto evaluado (Chuvieco, 2016). El uso de observaciones satelitales en una amplia gama del espectro electromagnético visible, infrarrojo, microondas y sus combinaciones ha permitido monitorear la extensión y calidad de masas de agua en diferentes escalas espaciales y temporales (Huang *et al.*, 2018).

El período de información consultada se llevó a cabo entre 2015 y 2024, consistió en bases de datos especializadas: Scopus, Web of Science, Google Scholar y ScienceDirect e informes técnicos de organismos internacionales como la UNESCO, la FAO, la NASA y el IPCC.

La tecnología satelital moderna ofrece una variedad de sensores con resoluciones espaciales y temporales, que permiten recopilar características del relieve de forma continua y a gran escala, proporcionando una evaluación integral de los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos (Adams *et al.*, 2022). Cada sensor presenta propiedades espectrales que responden de manera específica a las características ópticas del agua, cuantificando la radiación en distintas longitudes de onda reflejada por su superficie (Mohammad, 2016).

Las técnicas de teledetección obtienen una visión espaciotemporal del agua superficial y parámetros de calidad para identificar cambios oportunos para la prevención de riesgos; además, las mediciones a escala global resultan útiles en zonas costeras, lagos, estuarios y embalses (Andrés *et al.*, 2018). Entre las capacidades más relevantes de los sensores remotos a nivel regional y local, destacan: la caracterización de cuencas hidrográficas, el monitoreo de la extensión y los niveles del agua, la estimación de la evapotranspiración, la modelización hídrica y el mapeo de inundaciones (Wang *et al.*, 2019).

En el caso del agua subterránea, resulta imprescindible identificar zonas con alto potencial de almacenamiento, delimitar la extensión de los acuíferos y monitorear los niveles freáticos a través del tiempo (Ibrahim *et al.*, 2024).

Los sensores remotos permiten la evaluación de recursos hídricos en regiones no estudiadas o con escasez hídrica permanente (Chawla *et al.*, 2020). Las investigaciones se enfocan en las variaciones del almacenamiento a escala regional, y evaluaciones más específicas identifican ubicaciones óptimas para la perforación de pozos y a estimar la probabilidad de localizar agua en el subsuelo (Díaz *et al.*, 2019).

Las variables consideradas son, el tipo de sensor clasificado en tres categorías: (1) ópticos multiespectrales, (2) radar (SAR, microondas activos y pasivos) y (3) gravitacionales; Para cada sensor se registraron: resolución espacial (m), resolución temporal (días), resolución espectral (μm), resolución radiométrica (bits), cobertura de captura (km^2), tipo de cuerpo de agua evaluado (superficial o subterráneo), propósito de uso y limitaciones reportadas.

Se analizaron 47 fuentes, de las cuales 38 corresponden a artículos científicos arbitrados, 5 a documentos académicos y 4 a reportes de organismos internacionales. Los manuscritos analizados cubren estudios, con énfasis en aplicaciones a escala regional y global. La información se organizó en tablas comparativas presentadas en los resultados.

Resultados

De las 47 fuentes analizadas, el 68% corresponde a estudios que emplean sensores ópticos multiespectrales, el 21% utiliza sensores radar y el 11% restante aplica sensores gravitacionales para la evaluación de agua subterránea. En cuanto a la escala de aplicación, el 57% de los estudios se enfoca en cuerpos de agua superficiales, el 26% en agua subterránea y el 17% aborda ambos tipos de manera integrada. Estos datos reflejan que, si bien los sensores ópticos dominan el análisis, existe una tendencia creciente hacia el uso de sensores radar y gravitacionales para cubrir las limitaciones que la nubosidad y la profundidad del recurso imponen a los sensores ópticos.

Clasificación y comparación de sensores ópticos para cuerpos de agua superficiales

Se identificaron 17 sensores ópticos multiespectrales en el monitoreo de cuerpos de agua superficiales (Tabla 1). Su resolución espacial varía desde 0.31 m (WorldView-3) hasta 1,100 m (NOAA/AVHRR), lo que determina directamente la escala de análisis posible. Los sensores de alta resolución (< 5 m) como SPOT 7, Pleiades y SkySat son idóneos para el monitoreo de cuerpos de agua pequeños y locales, mientras que sensores de resolución moderada a baja como MODIS y AVHRR son apropiados para análisis regionales y globales.

En términos de resolución temporal, MODIS destaca con

una revisita diaria, siendo el más eficiente para el monitoreo continuo de fenómenos dinámicos como inundaciones y sequías. Sentinel-2, con una revisita de 10 días y resolución espacial de 10 m en bandas clave, representa el mejor equilibrio entre resolución espacial y temporal para el monitoreo de cuencas a escala regional. La limitación más recurrente reportada para los sensores ópticos es la interferencia por nubosidad, presente en 14 de los 17 sensores analizados.

Clasificación y comparación de sensores radar para cuerpos de agua superficiales

Los sensores radar analizados (SAR, AMSR-E, GIEMS-2, MODIS radar y CYGNSS) presentan una ventaja estructural frente a los sensores ópticos: su capacidad para operar en condiciones de nubosidad y en ausencia de luz solar (Tabla 2). El SAR ofrece la mayor resolución espacial del grupo (1–50 m), siendo el más adecuado para evaluaciones locales detalladas; sin embargo, su cobertura es limitada. GIEMS-2 combina microondas pasivas y activas con el índice NDVI para generar cobertura global continua. CYGNSS resulta particularmente relevante para el monitoreo de regiones tropicales al ser el único sensor capaz de penetrar tormentas activas para identificar inundaciones en tiempo real.

Tabla 2. Descripción de sensores radar, resoluciones, coberturas y propósitos en la evaluación de cuerpos de agua superficiales (Elaboración propia).

Sensores RADAR					
Sensor	Método	Res. Espacial	Res Temporal	Cobertura	Propósito
SAR (Radar de apertura sintética)	Canales polarimétricos	1 a 50	1 a 6	50m ²	1) Monitoreo de cambios sobre la superficie terrestre y en cuerpos de agua.
AMSR-E	Microondas Pasivos	6 x 4 50 X 75	1 a 2	1450 km	1) Capacidad para observar el agua superficial y la extensión de las inundaciones. 2) Monitoreo de Glaciares.
*GIEMS-2 (Global Inundation Extent from Multi-Satellites)	Combina microonda pasivas y activas con NDVI	.25° X .25°	30	Global	1) Monitoreo de inundaciones. 2) Gestión de riesgos hídricos. 3) Recarga de acuíferos.
MODIS	Multimbralización de índices (EVI) y (LSWI)	.0045° X.0045°	8	Cuencas	1) Detección de inundaciones. 2) Monitoreo de sequías.
*CYGNSS	Bandas	.1° X.1°	Estático	37.5° S a 37.5° N	1) Capacidad para penetrar nubes y tormentas. 2) Ideal para estudios atmosféricos, oceanográficos y climáticos.

Cada grado expresado corresponde a 111 km.

Clasificación de sensores gravitacionales para agua subterránea

Para la evaluación de agua subterránea se identificaron dos misiones satelitales gravitacionales: GRACE/FO y GOCE (Tabla 3). GRACE/FO es la misión con mayor aplicación a nivel mundial, con una cobertura de 500,000 km^2 y resolución temporal mensual, siendo la herramienta principal para el monitoreo de acuíferos a gran escala. Su principal limitación es la resolución espacial de ~ 111 km, que impide la evaluación de acuíferos locales. Los estudios revisados coinciden en que la integración de

Tabla 1. Descripción de sensores ópticos, resoluciones, coberturas, propósitos y limitaciones en la evaluación de cuerpos de agua superficiales (Elaboración propia).

satélite	Bandas	Res. Espectral (nm)	Res. Espacial (m)	Res. Temporal (días)	Res. Radiométrica	Cobertura	Propósito	Limitaciones	
Landsat-5	1	0,452-0,518 (visible-azul)	30	16	8	185 x 170	Productividad hídrica en cuencas, monitoreo del volumen de agua en embalses, humedad del suelo	1) Bandas negras a lo ancho de la imagen: fallo en la toma de datos por parte del sensor TM. 2) Discontinuidad en la toma de datos.	
	2	0,523-0,609 (visible-verde)	30						
	3	0,626-0,693 (visible-rojo)	30						
	4	0,776-0,904 (IR cercano)	30						
	5	1,567-1,784 (IR medio)	30						
	6	10,45-12,42 (IR térmico)	120						
	7	2,097-2,349 (IR medio)	30						
Landsat 7 (MS, TM y ETM+)	1	0.45 -0.52 (Azul)	30	16	8	185 km ²	Las bandas 1, 2 y 3 en tonos claros, aportan información acerca de las corrientes y turbidez del agua y los tonos de azul oscuro representan aguas profundas	1) El bandedo de sus imágenes genera ausencia de datos.	
	2	0.53 - 0.61 (Verde)							
	3	0.63 - 0.69 (Rojo)							
	4	0.78 - 0.90 (Inf. Cerc 1)							
	5	1.55 - 1.75 (Inf. Cerc 2)							
	6	2.09 - 2.35 (Inf. Medio)							
	7	2.13 - 2.13 (SWIR1)							
	8	0.52 - 0.90 (PAN)							15
Landsat 8	1	0.43 - 0.45 (Azul Prof.)	30	16	12	170 x 185 km	Productividad hídrica en cuencas, monitoreo del volumen de agua en embalses, humedad del suelo; calidad de agua de lagos y zonas costeras.	1) Las resoluciones más grandes no permiten visualizar detalles finos. 2) El tiempo de orbita puede ser un inconveniente para analizar fenómenos que cambian rápidamente, como las inundaciones. 3) La Banda de IT limita la precisión de sus datos.	
	2	0.45 - 0.51 (Azul)							
	3	0.53 - 0.59 (Verde)							
	4	0.63 - 0.67 (Rojo)							
	5	0.85 - 0.88 (NIR)							
	6	1.57 - 1.65 (SWIR1)							
	7	2.11 - 2.29 (SWIR2)							
	8	0.50 - 0.68 (PAN)							15
	9	1.36 - 1.38 (Cirrus)							30
	10	10.60 - 11.90 (TIRS1)							100
	11	11.50 - 12.51 (TIRS2)							100
MODIS TERRA	3	0,459 - 0,479	500	1	12	2330 km	Mide la distribución de las inundaciones, masas de agua superficiales y las sequías.	1) No detecta cuerpos de agua menores a 4 km ²	
	4	0,545 - 0,565	500						
	1	0,620 - 0,670	250						
	2	0,841 - 0,876	250						
	6	1,628 - 1,652	500						
	7	2,105 - 2,135	500						
	1	580 - 680 nm (rojo)	110						0
2	720 - 800 nm (FIC)	110							
3	3550 - 3950 (IRM)	0							
4	1030 - 1250 (TRM)	0							
5	11.0 - 13.0 nm (IRT)	0							
MERIS	1	412.5 +/- 10	300	3	12	1150	Monitorea el riesgo de inundaciones y la superficie oceánica. Analiza la concentración de nutrientes y contaminantes en los océanos, como parte de la evaluación de la salud de los ecosistemas marinos. Monitorea grandes áreas en tiempo real permitiendo el manejo inmediato de emergencias ambientales	1) La precisión de las mediciones es afectada por la turbidez del agua. 2) Estos sensores requieren calibraciones y mantenimientos frecuentes, lo que limita el monitoreo continuo de cuerpos de agua. 3) Las nubes pueden afectar la capacidad del satélite para analizar el agua.	
	2	442.5 +/- 10							
	3	490 +/- 10							
	4	510 +/- 10							
	5	560 +/- 10							
	6	620 +/- 10							
	7	665 +/- 10							
	8	681.25 +/- 7.5							
	9	708.75 +/- 10							
	10	753.75 +/- 7.5							
	11	760.635 +/- 3.75							
	12	778.75 +/- 10							
	13	865 +/- 20							
	14	885 +/- 10							
	15	900 +/- 10							
SPOT	1	0.625 - 0.695 (Rojo)	1.5 - 6	26	16	60 km	Detecta cuerpos de agua superficiales. Monitoreo del volumen de agua en y predicción de fenómenos climatológicos.	1) Son imágenes de costo; Solo detecta pequeñas masas de agua.	
	2	0.53 - 0.59 (Verde)							
	3	0.45 - 0.52 (Azul)							
	4	0.76 - 0.89 (IRC)							
	5	0.45 - 0.745 (PAN)							
SPOT 7	1	0.625 - 0.695 (Rojo)	1.5	2	16	60 km	La alta resolución espacial permite identificar detalles específicos de cuerpos de agua, inundaciones y cambios a corto plazo.	1) La resolución espectral y la presencia de nubes puede tener un impacto negativo en el análisis.	
	2	0.53 - 0.59 (Verde)							
	3	0.45 - 0.52 (Azul)							
	4	0.76 - 0.89 (IRC)							
	5	0.45 - 0.745 (PAN)							
IKONOS II	1	0.45 - 0.53 (Azul)	4	14	11	11.3 x 11.3	Mapea desastres naturales y aspectos ambientales.	1) Imágenes de costo 2) No funcionan para monitoreo de grandes masas de agua.	
	2	0.52 - 0.61 (Verde)							
	3	0.64 - 0.72 (Rojo)							
	4	0.76 - 0.86 (NIR)							
	5	0.45 - 0.90 (PAN)							
WorldView 3	450-800nm (1 B. PAN)	PA N: 0.31	Mult ie: 1.24 Swi n (IFC): 3.7	1	11	13.1 x 10	Detección y Delimitación de cuerpos de agua, Determinación del volumen de agua. Análisis de cuencas hidrológicas.	1) El clima y la nubosidad afectan la capacidad de obtener imágenes. 2) La interpretación y análisis requiere conocimientos específicos.	
	400-1040nm (3 B. Multi)								
	1195-2365nm (8 B. SWIR)								

		405-2245mm (12 B. CAVIS)	Cavis: 30m					
Sentinel 2 (A y B)	1	0.43 - 0.45 (Aerosol)	60	10	12	200	La alta resolución permite rastrear los cambios en los cuerpos de agua, como el avance o retroceso de las costas. Detección y delimitación de masas de agua, recarga de acuíferos, monitoreo de la calidad del agua. Mapear los humedales para facilitar la identificación de su estado de salud.	1) Las imágenes requieren procesos alternos de correcciones atmosféricas. 2) La presencia de nubosidad impide la toma de imágenes continuas.
	2	0.45 - 0.52 (Azul)	10					
	3	0.54 - 0.57 (Verde)	10					
	4	0.65 - 0.68 (Rojo)	10					
	5	0.69 - 0.71 (Borde Rojo 1)	20					
	6	0.73 - 0.74 (Borde Rojo 2)	20					
	7	0.77 - 0.79 (Borde Rojo 3)	20					
	8	0.78 - 0.90 (NIR 1)	10					
	8-A	0.85 - 0.87 (NIR 2)	20					
	9	0.93 - 0.95 (Vapor de agua)	60					
	10	1.36 - 1.39 (Cirrus)	60					
	11	1.56 - 1.65 (SWIR1)	20					
12	2.10 - 2.28 (SWIR 2)	20						
CBERS 4A (WPM)	1	0.45 - 0.52 (Azul)		8	31	10	92 km	Detección y delimitación de cuerpos de agua, Cambios de temperatura del agua superficial. 1) Tienen una capacidad limitada para capturar datos en condiciones de baja iluminación (nubosidad).
	2	0.52 - 0.59 (Verde)						
	3	0.63 - 0.69 (Rojo)						
	4	0.77 - 0.89 (NIR)						
	5	0.45 - 0.90 (PAN)	2					
CBERS 4A (AUX)	1	0.45 - 0.52 (Azul)		16.5	31	8	93 km	Evaluación de la circulación hídrica en océanos y mareas. Monitoreo de cuencas hídricas, escurrimientos y ríos. 1) Debido a su resolución multispectral moderada, es insuficiente para monitorear cuerpos de agua pequeños.
	2	0.52 - 0.59 (Verde)						
	3	0.63 - 0.69 (Rojo)						
	4	0.77 - 0.89 (NIR)						
CBERS 4A (WFI)	1	0.45 - 0.52 (Azul)		55	5	10	684 km	Análisis de la dinámica de cuerpos de agua e identificación del límite agua-suelo. Monitoreo de Reservorios. 1) Solo funciona para escalas regionales.
	2	0.52 - 0.59 (Verde)						
	3	0.63 - 0.69 (Rojo)						
	4	0.77 - 0.89 (NIR)						
Piañades 1A and 2A	1	430-550 nm (Azul)	0.5	1	12	1km x 1km	Monitoreo de inundaciones, detección de crisis hídricas. 1) Presentan resolución radiométrica moderada, para evaluaciones sobre discriminación a detalle, no es conveniente.	
	2	490-610 nm (Verde)						
	3	600-720 nm (Rojo)						
	4	750-950 nm (IRC)						
KompSat 3 y 3A	1	450 - 520 nm (Azul)		0.5 - 0.7	28	14	48 x 100	Son imágenes de alta resolución que evalúan la calidad del agua, analizan daños causados por desastres naturales; esto permite planificar respuestas a emergencias. 1) Deben ser procesadas para corregir distorsiones radiométricas y geométricas. 2) La resolución temporal es limitada.
	2	520 - 600 nm (Verde)						
	3	630 - 690 nm (Rojo)						
	4	760 - 900 nm (IR, C)						
	5	450 - 900 nm (PAN)						
Gosifon 2	1	0.45 - 0.52		3.2 Mul PA N	5	ND	45 km	Se utilizan para el monitoreo de cuerpos de agua por su capacidad para identificar formas, tamaños y características; a su vez permiten una detección precisa de la profundidad de éstos. 1) La cobertura es limitada, para monitoreo continuo se necesitan visitas programadas. 2) La calidad de las imágenes pueden no estar disponibles para los tiempos deseados.
	2	0.52 - 0.59						
	3	0.62 - 0.69						
	4	0.77 - 0.89						
	5	0.45 - 0.89 (PAN)						
Triple Sat	1	440 - 510 nm (Azul)	3.2	4	10	23.3	Sus principales usos es la monitorización de los recursos hídricos, evaluación de la calidad del agua, vigilancia de inundaciones. 1) La actualización de las imágenes puede no ser puntual. 2) La resolución espacial, aunque es excelente, en ocasiones no es suficiente para detalles específicos.	
	2	450 - 650 nm (PAN)	0.8					
	3	510 - 590 nm (Verde)						
	4	600 - 670 nm (Rojo)	3.2					
	5	760 - 910 nm (NIR)	4					
SkySat **1 y 2 ***16 a 21	1	450 - 515 nm (Azul)	* P: 0.8, M:1	6	12	200 km	Las imágenes presentan una resolución espacial óptima para el monitoreo de cuerpos de agua de pequeños cuerpos de agua, además de mapear zonas de riesgo de inundaciones. 1) Es necesario procesar las imágenes, para visualizar un buen nivel de detalle, sin embargo, este proceso implica la pérdida parcial de información.	
	2	515 - 595 nm (Verde)	**P: 0.65					
	3	605 - 695 nm (Rojo)	M:1					
	4	740 - 900 nm (NIR)	***					
	5	450 - 900 nm (PAN)	P:0, S:7, M:7, 5					

1.- Servicio Geológico de los Estados Unidos; 2.- Comisión Nacionales de Actividades Espaciales 3. Administración Nacional Oceánica y Atmosférica; 6, 17.-ESA;7,8.-BEO; 9, 16.-COPERNICUS.10, 11, 12.-Instituto Nacional de pesquisas Espaciales;13,14.-Instituto de Estadística Geografía e Informática - EOS 15: SPACE SKYROCKET.

datos GRACE con modelos hidrológicos como GLDAS y la técnica TWS potencia significativamente la precisión en la estimación del almacenamiento de agua subterránea (Muñoz, 2023; Miguel, 2024).

Tabla 3. Descripción de satélites gravitacionales para el análisis de agua subterránea (Elaboración propia).

Sensores de Gravedad					
Satélite	Res. Espectral (µm)	Res Espacial (m)	Res. Temporal (días)	Área de Cobertura (Km ²)	Propósito
GRACE /FO (Gravity Recovery and Climate Experiment)	120/160	1° X 1°	30	500,000 Km ²	1) Detectan cambios mensuales en el almacenamiento de agua subterránea 2) Identifican acuíferos sobreexplotados.
GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer)	250	1° X 1°	Estático	80 km	1) Mapeo de corrientes oceánicas. 2) Topografía dinámica del océano. 3) Detección de acuíferos subterráneos

Cada grado expresado corresponde a 111 km.

Técnicas e índices de teledetección para la evaluación de cuerpos de agua.

Se identificaron 9 técnicas e índices espectrales aplicados a la evaluación de cuerpos de agua (Tabla 4). Los índices NDWI y MNDWI son los más ampliamente utilizados, presentes en el 72% de los estudios que aplican técnicas espectrales. Para agua subterránea, el índice GWPI destaca como la técnica más completa al integrar múltiples variables del terreno bajo el enfoque del Proceso de Jerarquía Analítica (Cobos, 2022). La plataforma SNAP emerge como la herramienta de procesamiento más versátil al ser compatible con datos Sentinel, Landsat y MODIS simultáneamente (Alejandro y Rivas, 2023).

Tabla 4. Técnicas e índices de teledetección para la evaluación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Elaboración propia).

Índice	Fórmula	Tipo de Cuerpo	Sensor Compatible	Aplicaciones
*NDWI	$\frac{Verde - NIR}{Verde + NIR}$	Superficial	Landsat, Sentinel-2	Determina el Cambio en masa. Cuantifica el grado de extracción. Estima ocurrencia de sequías.
*MNDWI	$\frac{Verde - NIR_1}{Verde + NIR_1}$	Superficial	Landsat 8, Sentinel-2	Evalúa extracción de agua. Mapeo de Cuencas. Detecta cambios en el nivel del agua. Cuantifica la dinámica de los cuerpos de agua.
*LSWI	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	Superficial	Landsat, MODIS	Cartografía de masas de agua. Análisis de contenido de agua en suelo.
*AWEI	$4x(Verde - SWIR_1) - 0.25 x NIR + 2.75 x SWIR_2$	Superficial	Landsat 8	Mapeo de cuerpos de agua. Evaluación de extracciones. Determinación de masas de agua. Analiza los límites costeros.
**SWOT	Modelos informáticos y medición de caudales	Superficial	Misión SWOT	Determina la cantidad de agua que fluye en los ríos de la Tierra, las tasas a las que fluye hacia el océano y sus fluctuaciones en el tiempo.
**SNAP	Plataforma	Ambos	Sentinel, Landsat, MODIS	Plataforma para el monitoreo de inundaciones, sequías, deforestación.
***GWPE	$GWPI = \sum \sum (WiXi)$	Subterránea	Sentinel-2	Basado en datos y características del

				terreno identifica zonas potenciales de agua subterránea de la cuenca
***TWS	$\Delta TWS = \frac{\Delta G}{k} * A$	Subterránea	GRACE/FO + GLDAS	Calcula el volumen total de agua almacenada en una región o cuenca hidrográfica, incluyendo todas sus formas y reservorios
***GLDAS	Sistema de Datos	Subterránea	GRACE/FO	Proporciona estimaciones de anomalías de almacenamiento de agua subterránea.

IR: infrarrojo cercano; SWIR: Infrarrojo de onda corta; NDWI: Índice de agua de diferencia normalizada; MNDWI: Índice de agua modificado de diferencia normalizada; LSWI: índice de agua superficiales terrestres; AWEI: Índice de extracción de agua automatizado. SWOT: Surface Water and Ocean Topography. SNAP: Sentinel Application Platform. GWPE: Índice de Potencialidad de Agua Subterránea. GLDAS: Global Land Data Assimilation System. TWS: Total Water Storage *Superficial, **Radar, ***Subterránea

Discusión

Los resultados confirman que no existe un sensor óptico universal para el monitoreo de cuerpos de agua; la selección depende de la escala de análisis, el tipo de cuerpo de agua y la dinámica temporal del fenómeno de interés. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Huang *et al.* (2018), quienes señalan que la combinación de sensores con diferentes resoluciones espaciales y temporales es la estrategia más efectiva para superar las limitaciones individuales de cada satélite.

En este debate, Sentinel-2 (A y B) emerge como el sensor óptico con mejor equilibrio entre resolución espacial 1 a 20 m en 13 bandas espectrales y temporal revisita de 10 días, lo que coincide con los hallazgos de Quini *et al.* (2021) y Torres *et al.* (2024), quienes demuestran su eficacia para el rastreo de cambios costeros y la delimitación de masas de agua, así como para el análisis de humedad del suelo. No obstante, su dependencia de condiciones atmosféricas despejadas constituye una limitación estructural en zonas tropicales con alta nubosidad, donde sensores radar como SAR resultan técnicamente más confiables (Shen *et al.*, 2019). Esta tensión entre riqueza espectral y continuidad operativa bajo condiciones adversas es precisamente el eje central del debate sobre la complementariedad de sensores.

Landsat (5, 7 MS, TM, ETM+ y 8 OLI), con resolución espacial de 30-100 m y revisita de 16 días, sigue siendo relevante por la continuidad histórica de su archivo, lo que lo hace insustituible para análisis de cambio a largo plazo (Masood *et al.*, 2022). En combinaciones espectrales específicas, permite además identificar patrones de sequía, realizar análisis subterráneos y monitorear cambios en niveles de agua superficial. Sin embargo, su resolución temporal restringida una captura cada 16 días limita la evaluación periódica de cambios rápidos en los cuerpos de agua (Torres *et al.*, 2024), lo que pone en evidencia que la

ventaja histórica del sensor no resuelve las demandas de monitoreo dinámico en contextos de variabilidad hídrica acelerada.

MODIS, con datos en 36 bandas del espectro electromagnético, resolución temporal diaria y resolución espacial de 250 a 1000 m según la configuración de bandas, ofrece datos continuos para la evaluación dinámica de áreas regionales (Sarmiento *et al.*, 2023). Es efectivo para la evaluación de cuerpos de agua, evaporación y transpiración; sin embargo, no es recomendable para análisis locales detallados debido a su baja resolución espacial (García *et al.*, 2022). Este contraste entre cobertura temporal y resolución espacial ilustra la disyuntiva fundamental que enfrenta el monitoreo hídrico satelital: a mayor escala temporal de captura, menor detalle espacial, y viceversa. Las características de sensores como SAR, AMSR-E, GIEMS-2, MODIS y CYGNSS permiten analizar con detalle los cuerpos de agua terrestres, aunque cada uno bajo condiciones y escalas específicas (Quiñones *et al.*, 2016).

Una conclusión relevante de esta revisión es que los sensores radar no deben entenderse como sustitutos de los sensores ópticos, sino como herramientas complementarias. Mientras los sensores ópticos ofrecen mayor riqueza espectral para caracterizar la calidad del agua, los sensores radar como SAR y AMSR-E garantizan la continuidad del monitoreo bajo condiciones de nubosidad intensa, que son precisamente las condiciones que acompañan a los eventos hidrológicos extremos (Olmos *et al.*, 2025; Zeiger *et al.*, 2023).

El radiómetro AMSR-E presenta gran capacidad para observar el agua superficial y el comportamiento de las inundaciones sin estar limitado por la nubosidad, con una resolución temporal diaria; no obstante, su baja resolución espectral entre 10 y 50 km resulta insuficiente para observar pequeños cuerpos de agua (Shen *et al.*, 2019).

Por su parte, el SAR, como técnica de microondas activos con resolución espacial de hasta 1 m, ofrece una caracterización de alta precisión, pero se encuentra limitado en observaciones regionales (Shen *et al.*, 2019). Esta dualidad entre resolución espacial y cobertura regional constituye una tensión no resuelta en la literatura especializada, que refuerza la necesidad de estrategias multisensor.

La evaluación de agua subterránea mediante teledetección representa el mayor desafío metodológico identificado en esta revisión, dado que ningún sensor puede detectar el agua subterránea de forma directa; su evaluación se realiza mediante métodos indirectos basados en gravimetría satelital e interferometría de radar, que detectan anomalías en el campo gravitatorio y variaciones en la elevación de la superficie terrestre (Sheffield, 2018). GRACE/FO ha demostrado ser la herramienta más robusta para el monitoreo de cambios en el almacenamiento de acuíferos a escala regional, con una cobertura de 500,000 km², resolución temporal mensual y precisión de 1.5 cm a una escala de 300 km (Landerer *et al.*, 2020), con aplicaciones documentadas en Chile (Muñoz, 2023), México (Miguel, 2024) y la cuenca del Indo (Iqbal *et al.*, 2017). No obstante, su resolución espacial de ~111 km limita su aplicabilidad a acuíferos de gran extensión, representando una brecha tecnológica significativa para el monitoreo local que la literatura aún no ha resuelto satisfactoriamente.

Frente a esta limitación, el índice GWPI integrado con imágenes Sentinel-2 y técnicas SIG ha mostrado resultados prometedores para la identificación de zonas potenciales de agua subterránea a escala local (Cobos, 2022; Giraldo & Ventura, 2023). Giraldo & Ventura (2023) utilizaron imágenes Sentinel-2 para localizar zonas de exploración de agua subterránea en Perú, obteniendo mapas de densidad de drenaje, mientras que Fernández (2021) aplicó las mismas imágenes para determinar el índice NDWI y crear un sistema de identificación de masas de agua, demostrando la capacidad predictiva de la teledetección óptica a escala local. Por su parte, Montesinos *et al.* (2015) cuantificaron en el acuífero de Aguascalientes, México, las extracciones de agua subterránea mediante imágenes Landsat, logrando identificar las superficies probables de subsidencia. La integración de gravimetría satelital para la escala regional con análisis multicriterio e índices espectrales para la escala local representa, por tanto, la línea metodológica más sólida identificada en la literatura para investigaciones futuras.

Los resultados permiten identificar tres tendencias que marcarán el desarrollo de la teledetección aplicada a recursos hídricos. En primer lugar, la integración de inteligencia artificial con datos satelitales multitemporales está optimizando la detección automática de cambios en cuerpos de agua (Adams *et al.*, 2022). En segundo lugar,

la disponibilidad creciente de datos satelitales de acceso abierto USGS, Copernicus y NASA Earthdata está democratizando el uso de estas tecnologías en regiones con escasos recursos para el monitoreo hídrico convencional (Chawla *et al.*, 2020). En tercer lugar, la misión SWOT representa un avance cualitativo al permitir la medición simultánea de extensión, altura y caudal de cuerpos de agua superficiales a escala global, incluyendo la cuantificación de los niveles de agua en ríos, lagos, embalses y océanos en cuencas hidrográficas de todo el mundo, así como el análisis de la dispersión de contaminantes arrastrados por el agua (NASA, 2024). Estos avances tecnológicos, en conjunto, sugieren que el futuro del monitoreo hídrico no reside en la búsqueda de un sensor único y universal, sino en la construcción de arquitecturas de observación multisensor, multiescala y con soporte de modelos hidrológicos como GLDAS y la técnica TWS (Muñoz, 2023; Miguel, 2024), capaces de responder a la creciente complejidad e incertidumbre de los sistemas hídricos globales.

Estudio de caso

En México, gran parte de las zonas costeras están expuestas a inundaciones. Cuando la precipitación es excesiva se convierte en un problema que ocasiona desastres severos; Tabasco, por su ubicación, presenta fenómenos recurrentes donde las precipitaciones exceden la media causando el desbordamiento de los ríos.

Alejandro y Rivas (2023) realizaron el estudio 'Análisis de cambios en superficie de cuerpos de agua e identificación de zonas propensas a inundación mediante procesamiento de imágenes radar', aplicando técnicas de teledetección con imágenes Sentinel-1A y Radarsat-2, complementadas con interpolación IDW y la plataforma SNAP. Los resultados permitieron cuantificar la variación de cuatro cuerpos de agua en un periodo de cinco años e identificar zonas susceptibles a inundación.

Este caso de estudio valida los hallazgos de la revisión sistemática al demostrar que la integración de sensores radar (Sentinel-1A) con plataformas de procesamiento multisensor (SNAP) permite superar la limitación de nubosidad que afecta a los sensores ópticos en regiones tropicales de alta precipitación, confirmando la complementariedad entre ambos tipos de sensores descrita en la sección de discusión.

Conclusiones

La revisión sistemática de 47 fuentes especializadas permitió identificar que Sentinel-2 representa el sensor óptico con mejor equilibrio entre resolución espacial y temporal para el monitoreo de cuencas a escala regional,

mientras que los sensores SAR son los más eficientes para la detección de inundaciones bajo condiciones de nubosidad intensa. Para el monitoreo de agua subterránea a gran escala, GRACE/FO es la herramienta con mayor respaldo en la literatura, aunque su resolución espacial de ~111 km limita su aplicación local.

Los sensores remotos y las técnicas de teledetección no compiten entre sí, sino que se complementan: la integración de sensores ópticos, radar y gravitacionales, combinada con índices espectrales como NDWI, MNDWI y GWPI, constituye la estrategia más robusta para el monitoreo integral de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

El acceso abierto a datos satelitales (USGS, Copernicus, NASA Earthdata) y la incorporación de inteligencia artificial en el procesamiento de imágenes representan las tendencias con mayor potencial para democratizar el monitoreo hídrico en regiones con recursos limitados para el monitoreo convencional.

Se recomienda para investigaciones futuras: (1) desarrollar protocolos estandarizados de integración multisensor adaptados a las condiciones climáticas regionales; (2) evaluar la precisión del índice GWPI en diferentes contextos geológicos de América Latina; y (3) explorar el potencial de la misión SWOT para el balance hídrico integrado de cuencas transfronterizas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los colaboradores por sus valiosos comentarios críticos que enriquecieron el escrito, así como al revisor anónimo cuyos señalamientos contribuyeron a mejorar la solidez científica del trabajo.

Literatura citada

- Adams, K. H., Reager, J. T., Rosen, P., Wiese, D. N., Farr, T. G., Rao, S., & Rodell, M. (2022). Remote sensing of groundwater: current capabilities and future directions. *Water Resources Research*, 58(10), <https://doi.org/10.1029/2022WR032219>
- Aguirre, M., Lassaga, G., & Tapia, G. (2023). El agua: factor estratégico para la preservación del planeta y los seres vivos. *Revista Científica de la Universidad de Belgrano*, 6(2), 82–94.
- Alejandro, S., & Rivas, M. (2023). *Análisis de cambios en superficie de cuerpos de agua e identificación de zonas propensas a inundación mediante procesamiento de imágenes de radar*. Informe de Investigación. Universidad Doctor Andrés Bello, Dirección de Investigación.
- Andrés, L., Bressers, H., & De Boer, C. (2018). *A review of in-situ and remote sensing technologies to monitor water and sanitation interventions*. Mortenson Center in Engineering for Developing Communities. University of Colorado at Boulder. <https://doi.org/10.3390/w10060756>
- Bhaga, T. D., Dube, T., Shekede, M. D., & Shoko, C. (2020). Impacts of climate variability and drought on surface water resources in sub-Saharan Africa using remote sensing. *A review. Remote Sensing*, 12(24), 4184. <https://doi.org/10.3390/rs12244184>
- Chawla, I., Karthikeyan, L., & Mishra, A. K. (2020). A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes. *Journal of Hydrology*, 585, 124826. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124826>
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach* (2nd ed.). CRC Press.
- Cobos, Y. (2022). *Identificación de zonas con potencial de agua subterránea mediante técnicas de teledetección, SIG y PJA en el cantón Guamote, provincia de Chimborazo* [Tesis de ingeniería]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Díaz, S., & Martínez, P. (2019). Advances in groundwater potential mapping. *Hydrogeology Journal*, 27(7), 2307–2324. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01977-2>
- FAO. (2022). *Food security policy brief. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Adoptada y proclamada por la Resolución de la Asamblea General, 217*. www.upr-info.org
- Ferguson, G., McIntosh, J. C., Warr, O., Sherwood Lollar, B., Ballentine, C. J., & Famiglietti, J. S. (2021). Crustal groundwater volumes greater than previously thought. *Geophysical Research Letters*, 48(16), e2021GL093549. <https://doi.org/10.1029/2021GL093549>
- Fernández, J., & Gallegos, C. (2021). Automatic detection of water bodies of El Bajío using morphometric parameters obtained from satellite images. *Pistas Educativas*, 43(140). Tecnológico Nacional de México en Celaya.
- García, J. M. (2022). Uso de imágenes satelitales MODIS-MAIAC (AOD) como indicadores cualitativos de la concentración de material particulado (PM2.5) en Bogotá. Cuadernos de Geografía. *Revista Colombiana de Geografía*, 31(1), 211–221. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n1.87247>
- Giraldo, G. C. A., & Ventura, M. C. (2023). Fuentes de agua subterránea en zonas áridas de la cordillera negra mediante teledetección. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3), 653–682.
- Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., et al. (2019). Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 569, 215–221. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>
- Huang, C., Zhang, S., & Wu, J. (2018). Detección, extracción y monitoreo de agua superficial del espacio mediante sensores ópticos: Una revisión. *Reviews of Geophysics*, 56, 333–360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
- Ibrahim, A., Wayayok, A., Shafri, H. Z. M., & Toridi, N. M. (2024). Remote sensing technologies for unlocking new groundwater insights: A comprehensive review. *Journal of Hydrology: X*, 23, 100175.
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Iqbal, N., Hossain, F., Lee, H., & Akhter, G. (2017). Integrated groundwater resource management in Indus Basin using satellite gravimetry and physical modeling tools. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5846-1>
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., et al. (2024). Rapid groundwater declines in many aquifers globally but sustainable solutions exist. *Nature*, 625, 715–721. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>
- Landerer, F. W., Flechtner, F., Save, H., Wen, H. Y., & Bettadpur, S. (2020). GRACE-FO: The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On mission. AGU Fall Meeting Abstracts. G004-03.
- Lioubimtseva, E. (2023). The Aral Sea disaster: Revisiting the past to plan a better future. En R. Sivanpillai & J. F. Shroder (Eds.), *Biological and environmental hazards, risks, and disasters* (2nd ed. pp 546). Elsevier.
- Masood, A., Tariq, M. A., Hashmi, R., Waseem, M., Sarwar, M., & Ali, W. (2022). An overview of groundwater monitoring through point-to satellite-based techniques. *Water*, 14(4), 565. <https://doi.org/10.3390/w14040565>

- Miguel, F. (2024). *Evaluación de sequías meteorológicas en el acuífero Allende-Coahuila integrando datos climatológicos, niveles del agua subterránea y anomalías GRACE* [Tesis]. Universidad Nacional Autónoma de México. URL: <https://ru.dgb.unam.mx/items/37f53f0d-1a0b-49ac-8919-3f8cd7e56b06>
- Mohammad, H. (2016). *A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing*. Department of Civil Engineering, Florida International University.
- Montesinos, S., Fernández, L., Mateo, B., & González, M. (2015). Cuantificación mediante teledetección de las extracciones de agua subterráneas en el acuífero de Aguascalientes (México). *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 4-7. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Muñoz, M. (2023). *Cierre del balance hídrico por medio de teledetección y estimación de la evolución del almacenamiento de agua subterránea en el norte de Chile* [Tesis de maestría]. Universidad de Chile.
- NASA. (2024). *NASA's Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission data release*. *Earthdata*. <https://www.earthdata.nasa.gov/news/feature-articles/nasas-surface-water-ocean-topography-swot-mission-data-release>
- Nick, C., Max, F., & Etienne, C. (2023). The extent and distribution of the world's wetlands. En P. A. Gell, N. C. Davidson & C. M. Finlayson (Eds.), *Ramsar wetlands*. Elsevier. Pp 91-114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817803-4.00006-1>
- Normandin, C., Frappart, F., Bourrel, L., Diepkilé, A. T., Mougin, E., Zwarts, L., et al. (2024). Cuantificación de la extensión y el volumen de las aguas superficiales en el delta del Níger Interior durante el período 2000-2022. *Geocarto International*, 39, 2311203. <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2311203>
- Ochoa, J. (2022). Participación en la gestión de recursos hídricos en Latinoamérica 2017-2022: Una revisión sistemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), 486-512. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i3.2239
- Olmos, C., Valdés, J., Díaz, J. P., Mateus, S. P., García, A. F., Cossio, O. E., Botero, B. A., & Parra, J. C. (2025). Una metodología para detectar cambios en cuerpos de agua mediante radar y fusión óptica de imágenes: Un estudio de caso del Cercano Oriente de Antioquia en Colombia. *Ciencias Aplicadas*, 15(23), 12559. <https://doi.org/10.3390/app152312559>
- Papa, F., Francois, J., Grippa, M., Robert, E., & Trigg, M. (2022). Water resources in Africa under global change: Monitoring surface waters from space. *Remote Sensing*, 13, 4162. <https://doi.org/10.3390/rs13204162>
- Pham, B., Prigent, C., Aires, F., & Papa, F. (2017). Comparaciones de conjuntos de datos globales de aguas superficiales terrestres a lo largo de 15 años. *Journal of Hydrometeorology*, 18(4), 993-1007. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0206.1>
- Prigent, C., Jimenez, C., & Bousquet, P. (2020). Satellite-derived global surface water extent and dynamics over the last 25 years (GIEMS-2). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(3), e2019JD030711.
- Quini, V., Nicolas, E., & Geraldini, M. (2021). Synergy of Sentinel 1 and Sentinel 2A images for the delimitation of wetlands from an hydrogeomorphic approach. *Cuadernos Geográficos*, 60(3), 23-25.
- Quiñones, M., Vissers, M., Pacheco-Pascaza, A. M., Flórez, C., Estupiñán-Suárez, L. M., Aponte, C., Jaramillo, Ú., Huertas, C., & Hoekman, D. (2016). Un enfoque ecosistémico para el análisis de imágenes ALOS PALSAR para el mapeo de zonas inundadas en Colombia. *Biota Colombiana*, 7(2), 304. <https://doi.org/10.21068/C2016s01a04>
- Sarmiento, E., & Fonseca, O. (2023). *Observaciones de la tierra aplicadas al análisis del balance hídrico mediante imágenes MODIS, IMERG, GRACE y GLDAS en la región de La Guajira, Colombia* [Tesis de maestría]. Universidad Francisco José de Caldas.
- Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., & Verbist, K. (2018). Satellite remote sensing for water resources management: Potential for supporting sustainable development in data-poor regions. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2017WR022437>
- Shen, X., Wang, D., Mao, K., Anagnostou, E., & Hong, Y. (2019). Mapeo de la extensión de las inundaciones mediante radar de apertura sintética: Una revisión. *Remote Sensing*, 11, 879. <https://doi.org/10.3390/rs11070879>
- Shugar, H., & Burr, A. (2020). Rápido crecimiento mundial de lagos glaciares desde 1990. *Nature Climate Change*, 10, 939-945. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4>
- Tapley, D., Watkins, M., & Flechtner, F. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9, 358-369. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>
- Torres Aguilera, J. A. (2024). *Evaluación de la utilidad de los sensores remotos Landsat-8 y Sentinel-2 para el monitoreo de calidad de agua en la Laguna de Apoyo, 2021* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional Agraria.

- UNESCO. (2022). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos: Aguas subterráneas, hacer visible el recurso invisible*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>
- UNESCO. (2023). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua*. UNESCO. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/66290>
- Wang, S., García, M., Bauer-Gottwein, P., Jakobsen, J., Zarco-Tejada, P. J., Bandini, F., Paz, V. S., & Ibrom, A. (2019). High spatial resolution monitoring land surface energy, water and CO₂ fluxes from an unmanned aerial system. *Remote Sensing of Environment*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111343>
- World Water Assessment Programme & UN-Water. (2020). *The United Nations world water development report 2020: Water and climate change*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985>
- Zeiger, P., Frappart, F., Darrozes, J., Prigent, C., Jiménez, C., & Bourrel, L. (2023). Mapeo semanal de la extensión de las aguas superficiales en los humedales intertropicales utilizando reflectometría GNSS. *Journal of Hydrology*, 626, 130305. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130305>
- Zhang, K., Li, X., Zheng, D., Zhang, L., & Zhu, G. (2022). Estimación del consumo global de agua para riego mediante la integración de múltiples observaciones satelitales. *Water Resources Research*, 58(3), e2021WR030031. <https://doi.org/10.1029/2021WR030031>