



A-4

BALANCE Y PERSPECTIVAS DEL USO DE LA TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL SISTEMA TDPS

REVIEW AND PERSPECTIVES OF THE USE OF REMOTE SENSING FOR WATER RESOURCES RESEARCH IN THE TDPS SYSTEM

Jean Michel Martinez, IRD-GET, jean-michel.martinez@ird.fr

María del Carmen Mendoza España – WE_AMBIENTE & TECNOLOGÍA, Bolivia

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el estado actual de la hidrología satelital en el sistema TDPS (Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salares) mediante la información disponible de investigaciones realizadas en diferentes áreas o aplicaciones hidrológicas. La bibliografía reportada fue clasificada como científica y su disponibilidad desde el año 1998 proporciona una clara idea del desarrollo de la hidrología satelital en el sistema TDPS que corresponde a 14 años. Para alcanzar el objetivo planteado se consideraron aspectos como: 1) Las ventajas y limitaciones del uso de sensores remotos y potenciales aportes del uso de esta metodología; 2) Una revisión bibliográfica referida al uso de los sensores remotos en el sistema TDPS y la clasificación respectiva de esta información; 3) La evaluación de vacíos de información basada en la revisión bibliográfica; 4) Una propuesta de un plan de monitoreo espacial y temporal basado en el uso de sensores remotos.

PALABRAS CLAVE: APLICACIONES HIDROLÓGICAS, SENSORES REMOTOS, SISTEMA TDPS

SUMMARY

This document presents a detailed review of the studies dealing with remote sensing and the Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salares (TDPS) system since 1998. The works have been classified as a function of their

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

relevancy and of the different topics / parameters than can be accessed through the use of satellite data. The first section introduces the advantages and limits of the use of remote sensing data for hydrology. The second section presents the analysis of the different works making use of remote sensing data that have been published on the TDPS system. Lack of information and gaps in knowledge are discussed and an integrated monitoring plan of the TDPS waters is proposed to strengthen environmental observation and modeling capacities.

KEYWORDS: HYDROLOGICAL APPLICATIONS, REMOTE SENSORS, TDPS SYSTEM

A4.1. INTRODUCCIÓN

La teledetección se define como la medición de las propiedades de un objeto en la superficie terrestre a partir de datos adquiridos de aeronaves y satélites. Por lo tanto permite obtener información de un objeto a distancia sin mantener contacto físico con él (Schowengerdt 2007).

Su estudio se fundamenta en la respuesta espectral de los diferentes materiales u objetos que se denomina firma espectral y la detección e identificación de estos son determinadas por cuatro tipos de resolución (Meneses & Netto 2001): 1) La *Resolución Espacial* se expresa como el tamaño del área mínima en el terreno correspondiente a cada elemento en la imagen, puede variar de 1 m hasta 1,1 Km. dependiendo de la plataforma y del sistema sensor. 2) La *Resolución espectral* se refiere al número de bandas espectrales del sistema sensor a ser utilizado que comprende la posición de las bandas en el espectro y el ancho de bandas. Ésta será mayor cuanto más bandas del espectro sea capaz de manejar. 3) La *Resolución Radiométrica* determina el detalle de la reflectancia de los objetos que son medidos por el sensor, en números digitales. 4) La *Resolución Temporal* representa el tiempo que tarda el satélite en tomar dos imágenes del mismo sitio. En los sistemas orbitales, el retorno del satélite al mismo punto varía de 12 horas a 25 días, conforme el sistema. Cuanto menos tiempo demore el satélite en pasar por el mismo sitio y captar la misma imagen, mayor resolución temporal tendrá. Esta capacidad de recoger la misma porción de terreno cada cierto tiempo hace de la teledetección una herramienta especialmente interesante para estudios multitemporales y de monitoreo.

Las principales aplicaciones del uso de los sensores remotos o de la teledetección son: Monitoreo y evaluación ambiental, monitoreo y detección de cambios globales, agricultura, exploración de recursos renovables naturales y no renovables, cartografía, vigilancia militar (Schowengerdt 2007). Sin embargo, sus aplicaciones en el campo de la hidrología han progresado considerablemente desde

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

1985, debido al desarrollo de sensores específicos (Tabla A4-1) utilizados en las siguientes aplicaciones hidrológicas: Temperatura de la Superficie terrestre y acuática, Humedad de la Superficie del suelo, Cobertura de Nieve y Hielo, Calidad de Aguas, Rugosidad del Paisaje, Cobertura de Vegetación y Uso de Suelos, Precipitación, Humedad, Evapotranspiración, Aplicaciones Radar, Hidrología General, Humedales y Modelación Hidrológica (Owe *et al.* 2001, Shmugge *et al.* 2003).

El objetivo de este trabajo es analizar el estado actual de la hidrología satelital en sus diferentes aplicaciones en el sistema TDPS a través de la calidad de información disponible.

Tabla A4-1- Sensores relevantes utilizados en aplicaciones hidrológicas. Adaptado de Schultz & Engman 2000.

Sensor	Aplicación
AMSR: Advanced Microwave Scanning Radiometer	Estimación de la humedad del suelo
ASAR: Advanced Synthetic Aperture Radar	Estimación del contenido de agua en la nieve
ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer	Estimación del albedo, temperatura superficial y emisividad
CMIS: Conical MW Imager Sounder	Medición de nieve, temperatura superficial terrestre, humedad del suelo
HYDROSTAR	Estimación de la humedad del suelo
MERIS: Medium Resolution Imaging Spectrometer	Para tratar con problemas de irrigación
MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer	Estimación de la cobertura de nieve diaria y máximo 8 días, programación de riego.
OrbView-4 (OrbView 2 y 3)	Monitoreo de calidad de aguas
PR: Precipitation Radar	Estimación de inundaciones, humedad del suelo
SMOS	Estimación de la humedad del suelo
VCL: Vegetation Canopy Lidar	Evapotranspiración, altura de la cubierta vegetal

A4.2. VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL USO DE LOS SENSORES REMOTOS Y POTENCIALES APORTES DEL USO DE LA METODOLOGÍA

El uso de los sensores remotos en los últimos años ha permitido el desarrollo de muchas ciencias debido a las ventajas (Chuvieco 2002, Schmugge *et al.* 2002, Platnick *et al.* 2003) que ofrece:

- Una visión panorámica y cobertura total de la superficie terrestre donde se obtienen imágenes de áreas inaccesibles.

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

- Homogeneidad en la toma de datos y proporciona un formato digital de las imágenes lo que facilita su procesamiento.
- Un amplio conocimiento del espectro proporcionando información de las radiaciones de las regiones no visibles (infrarrojo medio, térmico, microondas).
- Permite determinar los tipos de cobertura que existen sobre un terreno (vegetación, suelos, agua), proporcionando información continua acerca de su variación espacial y temporal.
- Presenta mayor accesibilidad a los conjuntos de datos espaciales y a la cantidad de productos. Por tanto, las diferentes resoluciones espaciales, espectrales, radiométricas y temporales permiten obtener series de datos que proporcionan estimaciones históricas facilitando el proceso de monitoreo.
- La información satelital además de reducir el tiempo invertido en las investigaciones reduce también los costos en comparación con el uso de las fotografías aéreas. En muchos casos, países que cuentan con satélites en órbita ofrecen información gratuita de algunas imágenes disponibles en los sitios web de sus respectivas agencias.

Sin embargo, el uso de sensores remotos también presenta ciertas limitaciones (Villa *et al.* 2009):

- Su uso en diferentes áreas de investigación es complementario a los métodos tradicionales, es decir que de ninguna forma los sustituye.
- Todo trabajo realizado con el uso de sensores remotos precisa de datos de campo para su calibración y validación.
- Gran parte de las imágenes no son accesibles o tienen costos elevados.
- La disponibilidad de datos de sensores multiespectrales puede ser afectada por Interferencias atmosféricas como nubes.
- Complejidad de las técnicas a utilizar y la capacitación de personal especializado.

El uso de sensores remotos puede ser implementado en el sistema TDPS en estudios de monitoreo espacial y temporal de:

- Fluctuaciones geomorfológicas de los ríos y tributarios de las cuencas.
- Uso de suelos en el sistema.
- Distribución y caracterización de la vegetación acuática (macrófitas) en las diferentes cuencas del sistema.
- Estudios de calidad de aguas.
- Estudios de variaciones de niveles de agua.

A4.3. REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA EXISTENTE REFERIDA AL USO DE LOS SENSORES REMOTOS EN EL SISTEMA TDPS

Como resultado de una exhaustiva revisión, la información bibliográfica reportada sobre la hidrología satelital en el sistema TDPS es reducida. La tabla A4-2 muestra la existencia de 14 trabajos, agrupados en siete áreas de interés en el campo de la hidrología y relacionados con el uso de sensores remotos. La mayoría de los trabajos fueron desarrollados en las áreas de *Aplicaciones radar*, *Humedales* y *Temperatura superficial*. La bibliografía existente corresponde a publicaciones científicas o documentos con base científica, desarrollados principalmente en la cuenca del lago Titicaca. Analizando el periodo de tiempo (1998-2012) en que fueron realizadas estas investigaciones podría inferirse el avance en el campo de la hidrología satelital en el sistema TDPS que correspondería a 14 años.

Tabla A4-2- Revisión de la bibliografía existente en diferentes áreas de la Hidrología Satelital para el sistema TDPS. CL: Capítulo de Libro, AC: Artículo Científico e In: Informe.

Área de interés	Nº de trabajos	Tipo de publicación	Año	Sistema TDPS
1) Aplicaciones radar (niveles de agua)	4	CL, AC, AC, AC	2010, 2011, 2012, (som.)	L. Titicaca, L.Titicaca y L. Poopó, L. Titicaca, TDPS
2) Precipitación	1	AC	2001	L. Titicaca
3) Humedad	1	AC	2005	L. Titicaca
4) Nieve	1	AC	1998	L. Poopó y S. de Coipasa
5) Humedales (Bofedales)	3	AC	2003, 2012	L. Titicaca
6) Hidrología general (Albedo planetario)	1	AC	2003	L. Titicaca
7) Temperatura superficial	3	AC, In	2002, 2004	L. Titicaca

También fue consultada la información procedente del II Simposio Internacional del lago Titicaca-TDPS, realizado en marzo de 2013. La Tabla A4-3 hace referencia a 5 trabajos (3 propuestas y 2 trabajos realizados) en el campo de la Hidrología satelital, en las áreas de *Modelación hidrológica* y

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

Calidad de aguas. La mayoría de estos trabajos fueron realizados en la cuenca del lago Titicaca y corresponden a resúmenes compilados en un documento preliminar.

Tabla A4-3- Revisión de la Información (resúmenes) del II Simposio Internacional del lago Titicaca-TDPS en dos áreas de la Hidrología Satelital para el sistema TDPS. PR: Propuesta, TR: Trabajo Realizado.

Área de interés	Nº de trabajos	Tipo de publicación	Año	Sistema TDPS
1) Modelación Hidrológica	1	PR	2013	TDPS
2) Calidad de aguas	4	2 PR, 2 TR	2013	L. Titicaca

La bibliografía existente es descrita de forma cronológica y resumida indicando la cuenca de estudio, el periodo, los datos espaciales utilizados (satélites o sensores) y resultados principales, además de hacer referencia al área de interés o aplicación hidrológica

Entre los primeros trabajos en hidrología satelital reportados para el sistema TDPS, se encuentra el estudio de Vuille & Baumgartner (1998) quienes realizaron un monitoreo temporal de las *nevadas* en la región del lago Poopó y salares, en 6 temporadas de invierno usando datos satelitales de NOAA/AVHRR. Ellos encontraron que las nevadas son más abundantes en el extremo sur del área investigada y en el lado occidental de los Andes. Por otro lado, Garreaud & Aceituno (2001) relacionaron la variabilidad interanual de la *precipitación* con el índice de convección en el altiplano usando datos de reanálisis y medidas de satélite de radiación de onda larga (OLR). Ellos concluyeron que el verano en esta región puede ser seco o húmedo dependiendo del patrón de circulación (este u oeste) de los vientos que asociado a un evento ENSO tiende a ser más seco, con vientos que provienen del oeste. Posteriormente (Wan *et al.* 2002a, Wan *et al.* 2002b) realizaron trabajos sobre la calibración de bandas del Infrarrojo Termal (TIR) de MODIS y la validación del producto LST (Land – Surface Temperature) de MODIS, utilizando datos de mediciones *in situ* de la *temperatura superficial* del lago Titicaca, debido a sus características geográficas y climáticas particulares. Los datos de la temperatura superficial terrestre de EOS MODIS de diferentes sitios de prueba (lagos, pastizales, nieve y campos de arroz) fueron recopilados en un informe sometido a la NASA por Wan (2004).

En el área de la *Hidrología general*, Veissid (2003) analizó las variaciones del albedo planetario en los años 1999 a 2001, en el Norte y Sud del océano Atlántico, en las ciudades de Brasilia, São Paulo, Recife y en el lago Titicaca. Obtuvo los datos de un experimento de celdas solares implementadas en el satélite brasilero (SCD2/MECB) y de un nuevo método de simulación numérica usando datos extraídos de imágenes GOES. Sus resultados reportaron la variabilidad climática en cada región. El mismo año, estudios sobre *Humedales* fueron realizados por Moreau *et al.* (2003) quienes estimaron

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

la biomasa de los bofedales y totoras relacionada al crecimiento estacional, en los humedales del sector este del lago Titicaca y de la cordillera de los Andes. Utilizaron índices de vegetación derivados de NOAA/AVHRR. En otro estudio, Moreau & Le Toan (2003) analizaron la variación espacial y temporal de la biomasa de los bofedales y totoras en los humedales del mismo sector, utilizando datos de satélite radar ERS-SAR.

Entre otros trabajos, Falvey & Garreud (2005) estudiaron el transporte de la *humedad* al altiplano (regiones norte y sur) y su variabilidad mediante datos de observación del experimento SALLJEX (South American Low Level Jet Experiment) y estimaciones del agua precipitable basadas en datos de GPS, imágenes MODIS y radar durante el verano austral (2002 – 2003).

Los trabajos más recientes se encuentran en el área de las *Aplicaciones radar*, como el de Crétaux *et al.* (2010) quienes estudiaron varios lagos continentales, entre ellos el lago Titicaca, donde realizaron mediciones de niveles de agua usando altimetría radar de los satélites Topex/Poseidon (T/P), Geosat Follow On (GFO) y Envisat, para un periodo de 10 años. Los resultados generaron una base de datos de alta precisión y demostraron los usos potenciales de la medición de los niveles de los lagos por teledetección en diferentes aplicaciones (p.e. balance hídrico) además de la importancia como herramienta para el monitoreo hidrológico. En la misma temática, Abarca del Río *et al.* (2012) analizaron la variabilidad de los niveles de agua en el sistema del Lago Poopó y el posible control de esta variabilidad por parte del Lago Titicaca. Ellos compararon los datos altimétricos mensuales de la base de datos generada para el Lago Titicaca (Cretaux *et al.* 2011) con datos mensuales de la superficie del agua del lago Poopó derivados de imágenes MODIS. Sus resultados indicaron que dicha variabilidad proviene de otras cuencas del sistema además del Lago Titicaca atribuida principalmente al incremento potencial del uso del agua (irrigación) a lo largo del río Desaguadero que conecta ambos lagos.

Actualmente Satge *et al.* (Sometido) realizaron una evaluación de la precisión de dos modelos SRTM v4 (Shuttle Radar Topographic Mission) y ASTER GDEM v2 (Modelo de Elevación Digital Global) sobre la cuenca del altiplano (TDPS) usando datos de ICESat / GLAS (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite/Geoscience Laser Altimeter System) para elaborar un nuevo modelo (DEM) corregido que proporcione mejor información de la elevación en la región.

Otro trabajo reciente en el área de *Humedales*, fue desarrollado por Otto *et al.* (2012) quienes analizaron la extensión espacial, distribución y composición de los *humedales* de altura de los Andes (HAWA en inglés) en el noroeste del lago Titicaca mediante imágenes MODIS, Landsat ETM+ y datos de terreno. Ellos reportaron una alta abundancia en la región diferenciando los subtipos de humedales perennes y temporales mediante índices espectrales (NDVI y NDII). También analizaron la

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

diferenciación hidrológica de los subtipos HAWA con respecto a la precipitación a través de MODIS y TRMM-3B43. Ellos reportaron una relación significativa entre los HAWA perennes y la nieve durante el invierno seco y entre los HAWA temporales y la precipitación durante el verano.

En esta revisión también se describe la Información sobre hidrología satelital compilada en el II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS realizado en marzo de 2013 en Puno, Perú. En el área de la *Modelación Hidrológica*, Satge (2013) propone desarrollar un modelo matemático usando datos espaciales para el sistema TDPS, comparando modelos numéricos de terreno, datos satelitales de lluvia, acompañados de datos de campo. Posteriormente se pretende realizar una modelación de tipo lluvia/caudal sobre un periodo de 30 años para caracterizar el comportamiento actual del agua y cuantificar impactos de explotación.

En el área de *Calidad de aguas*, Peña (2013) propone evaluar la experiencia australiana CSIRO Land & Water de los usos de información satelital en sistemas de monitoreo y gestión de recursos hídricos y su potencial aplicación en un contexto global. Por otro lado, Flores *et al.* (2013) plantea estudiar la eutrofización en la Bahía de Cohana, delimitando las áreas de contaminación mediante índices de vegetación y análisis de bandas para evaluar el estado trófico usando un espectro radiómetro e imágenes satelitales Landsat 5-TM y Liss III.

En cuanto a los trabajos presentados, Villegas (2013) realizó un monitoreo ambiental en el lago Titicaca, de los parámetros: temperatura superficial, clorofila, color del agua y abundancia de macrófitas, durante el periodo 2000 – 2011 usando imágenes satelitales MODIS y Landsat. Sus resultados mostraron una variación estacional marcada de la temperatura entre invierno y verano, los valores más altos de clorofila fueron reportados en verano y en las principales bahías todo el año. También Escudero (2013) estudió la variación estacional de la clorofila-a del lago Titicaca usando imágenes MODIS-aqua, para un periodo de 10 años. El reporta a nivel mensual las más altas concentraciones en junio y las más bajas en noviembre y en la serie temporal, las más altas concentraciones en 2007 y las más bajas en 2005.

Analizando la bibliografía disponible en las diferentes áreas o aplicaciones hidrológicas se obtuvo la información de las series de datos temporales generadas en cada investigación a través de diferentes tipos de sensores en el sistema TDPS (Tabla A4-4).

Las series largas de datos temporales (10 a 24 años) fueron observadas en las áreas de *Aplicaciones radar, Precipitación y Humedales*, mientras que las demás áreas presentaron series de datos cortas (1 a 3 años). Esta información permitirá dar continuidad a los mismos estudios o realizar nuevos estudios a partir de los datos existentes. En general son más utilizados los sensores multiespectrales

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

y radar o ambos en varios trabajos.

Tabla A4-4- Información de series de datos temporales y tipos de sensores en las diferentes áreas de la Hidrología Satelital para el sistema TDPS. L.T. Lago Titicaca, L.P. Lago Poopó y S.C. Salar de Coipasa

Área de interés	Tipo de sensor	Series de datos	Sistema TDPS
1) Aplicaciones radar	Altimetría Radar	2000-2009	L.T.
	Altimetría Radar y MODIS	2000-2009	L. T. y L. P.
2) Precipitación	Satélite OLR	1975-1999	L. T.
3) Humedad	MODIS	2002-2003	L. T.
4) Nieve	NOAA/AVHRR	1984,1986,1990-1993	L. P. y S. C.
5) Humedales	NOAA/AVHRR y ERS-SAR Radar	1997-1998	L. T.
	LANDSAT	2000-2001	
	MODIS	2000-2010	
6) Hidrología general	GOES	1999-2001	L. T.
7) Temperatura superficial	MODIS	2000-2001	L. T.

A4.4. CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

Analizando la información disponible podemos clasificarla en cuatro categorías

(Tablas A4-5 y A4-6):

- **Categoría A:** Información científica (artículos publicados en revistas indexadas, documentos o informes con base científica).
Este tipo de información presenta una base de datos sólida y confiable, metodología estandarizada (datos de campo, mediciones *in situ*, calibraciones, datos espaciales) relación con otras disciplinas.
- **Categoría B:** Información válida a nivel nacional y/o regional con control de calidad proveniente de proyectos desarrollados por Instituciones Gubernamentales.
- **Categoría C:** Información proveniente de documentos de consultorías, informes.

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

- **Categoría D:** Información que no presenta respaldo científico.

Tabla A4-5- Clasificación de la información existente en diferentes áreas de la Hidrología Satelital según las categorías enunciadas.

Área de interés	Autores	Tipo de Información	Categoría
1) Aplicaciones radar	Abarca del Río <i>et al.</i> (2012)	Artículo Científico	A
	Crétau <i>et al.</i> (2011)	Artículo Científico	A
	Satge <i>et al.</i> (sometido)	Artículo Científico	A
	Crétau <i>et al.</i> (2010)	Capítulo de libro	A
2) Precipitación	Garreaud & Aceituno (2001)	Artículo Científico	A
3) Humedad	Falvey & Garreaud (2005)	Artículo Científico	A
4) Nieve	Vuille & Baumgartner (1998)	Artículo Científico	A
5) Humedales	Moreau <i>et al.</i> (2003)	Artículo Científico	A
	Moreau & Le Toan (2003)	Artículo Científico	A
	Otto <i>et al.</i> (2011)	Artículo Científico	A
6) Hidrología General	Veissid (2003)	Artículo Científico	A
7) Temperatura Superficial	Wan <i>et al.</i> (2002a)	Artículo Científico	A
	Wan <i>et al.</i> (2002b)	Artículo Científico	A
	Wan (2004)	Informe	A

La información procedente del Simposio Internacional del Lago Titicaca es analizada y clasificada de la siguiente manera:

Tabla A4-6- Clasificación de la información procedente del Simposio en dos áreas de la Hidrología Satelital según las categorías enunciadas.

Área de interés	Autores	Tipo de Información	Categoría
1) Modelación Hidrológica	Satge (2013)	Propuesta	A
2) Calidad de Aguas	Peña (2013)	Propuesta	A
	Flores <i>et al.</i> (2013)	Propuesta	D
	Escudero (2013)	Trabajo realizado	D
	Villegas (2013)	Trabajo realizado	D

El tipo de información clasificada como categoría D que carece de respaldo científico, corresponde a una propuesta y dos trabajos realizados presentados como ponencias. En el caso de la propuesta, esta no considera datos de campo, la metodología que se pretende implementar es imprecisa y no

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

existe un conocimiento del funcionamiento hidrológico y limnológico de la cuenca, ni de los procesos de contaminación en el área de estudio.

En cuanto a los dos estudios realizados ambos se basaron en el análisis directo de las imágenes satelitales, no consideraron datos de campo, ni mediciones de radiometría que permitan calibrar los datos de satélite. Los resultados fueron inferidos de algoritmos que precisan ser validados. Según los resultados obtenidos y su interpretación, se desconoce el funcionamiento hidrológico y limnológico de la cuenca, así como las características particulares que presenta el lago Titicaca como lago tropical de altura.

A4.5. EVALUACIÓN DE VACÍOS DE INFORMACIÓN

En base a la revisión y clasificación de toda la bibliografía disponible sobre Hidrología Satelital en el sistema TDPS, se confirma que la información es escasa, con tan solo 14 trabajos científicos.

Pese al periodo de tiempo (1998-2012) en el que tiene su desarrollo la hidrología satelital en el sistema TDPS, existen varios años donde no se realizaron trabajos al respecto, por ejemplo entre los años 1999 y 2000 y 2006 a 2010.

En general los trabajos científicos en diferentes áreas de la hidrología se reducen a uno en la mayoría de los casos (*Precipitación, Humedad, Nieve, Hidrología General*), las áreas con más trabajos reportados (tres a cuatro) son *Aplicaciones Radar, Humedales y Temperatura Superficial*. No se reportan trabajos en otras áreas importantes de la hidrología. Por el contrario, los trabajos presentados en el II Simposio Internacional del Lago Titicaca, abarcan otras áreas como la *Modelación Hidrológica* y la *Calidad de Aguas*.

Son escasos los trabajos desarrollados en las demás cuencas que conforman el sistema TDPS, la mayoría están concentrados en la cuenca del lago Titicaca.

Analizando la calidad de la información, la mayoría de los trabajos en hidrología satelital corresponden a publicaciones científicas, exceptuando algunos trabajos presentados en el II Simposio Internacional del lago Titicaca-TDPS, los cuales carecen de respaldo científico, debido a que no utilizan una metodología adecuada que considera datos de campo y mediciones de calibración que son esenciales para un estudio con imágenes satelitales. Además no presentan un conocimiento adecuado sobre el funcionamiento hidrológico y limnológico de la cuenca, para plantear propuestas o realizar interpretaciones.

Las series de datos temporales de la mayor parte de los trabajos realizados en diferentes aplicaciones hidrológicas (*Humedad, Hidrología General, Humedales, Temperatura Superficial*) son

cortas de 1 a 3 años. A diferencia de las áreas de *Aplicaciones Radar, Precipitación y Humedales* que presentan series de datos que varían de 10 a 24 años.

No se encuentran disponibles otros estudios realizados por Instituciones Nacionales o Regionales sobre esta temática.

A4.6. PROPUESTA DE UN PLAN DE MONITOREO ESPACIAL Y TEMPORAL MEDIANTE SENSORES REMOTOS

Para optimizar las proyecciones de los modelos (hidrológicos, ecológicos, climáticos), y crear planes de gestión ambiental adaptados, se requieren datos observacionales de buena calidad y mejorar el acceso a los mismos. Para mejorar la comprensión del sistema TDPS y de los cambios ambientales que acontecen, es fundamental desarrollar redes de observación. Sin embargo, registros relativamente cortos pueden no permitir la separación entre la variabilidad natural de los ambientes y la influencia de factores externos, mientras que a más largo plazo una reconstrucción de la condiciones biohidroclimáticas puede colocar las tendencias recientes y los extremos en un contexto más amplio. Así, aparece fundamental la instalación y fortalecimiento de redes de mediciones de campo a nivel local junto con el desarrollo del monitoreo espacial de parámetros claves, a escalas de tiempo y de espacio más grandes.

Un trabajo sobre monitoreo espacial y temporal de la calidad de aguas (materia orgánica, clorofila-a, sedimentos) usando sensores remotos nos parece importante debido al vacío de información que existe (ver arriba). Sin embargo, debido a las características particulares de esta cuenca y en base a la información de estudios previos sobre la productividad primaria, clorofila-a, fitoplancton y macrófitas (Lazzaro com. pers.) es necesario desarrollar métodos adaptados a ambientes oligotróficos característicos de los lagos tropicales de altura. Tal sistema debería considerar:

a) La delimitación del área de estudio, con **estaciones de observación permanentes y planes de muestreo estandarizados**.

b) La extensión de las **zonas observadas *in situ* en el espacio** (escala del sistema) **y el tiempo** (serie temporal superior a 10 años).

En cuanto a la metodología es esencial considerar tres técnicas:

1) Datos de campo: **Toma de muestras *in situ* en superficie y en profundidad** (perfiles) **con métodos estandarizados**, con equipos calibrados previamente para evaluar parámetros hidroclimáticos y de calidad de aguas.

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

2) Datos de mediciones radiométricas: **Mediciones de radiancia e irradiancia tanto en superficie como en profundidad**, para el cálculo posterior de la reflectancia y de la luz disponible para el fitoplancton. Estas mediciones se realizan utilizando un espectro radiómetro calibrado que deben acompañar los datos de campo en forma simultánea o durante la campaña.

3) Imágenes de satélite: Con **correcciones geográficas y atmosféricas y resoluciones espacial, espectral y temporal** adecuadas para el área de estudio y considerar los productos apropiados para los parámetros a analizar.

Los datos de campo que proporcionan el análisis *in situ* de los componentes ópticamente activos (clorofila-a, sedimentos, materia orgánica) serán relacionados con las mediciones radiométricas para entender las propiedades ópticas de estos componentes. A su vez las mediciones radiométricas que proporcionan el conocimiento de las propiedades ópticas de los componentes ópticamente activos (OAC) se relacionarán con las imágenes de satélite para entender su sensibilidad a los parámetros estudiados, mediante el análisis de la reflectancia. Ambos resultados permitirán una calibración y validación de los datos satelitales utilizando técnicas directas e indirectas y la posterior elaboración de mapas temáticos multitemporales. Estos resultados permitirán una adecuada interpretación acompañada de datos e información auxiliar de otras disciplinas (Figura A4-1).

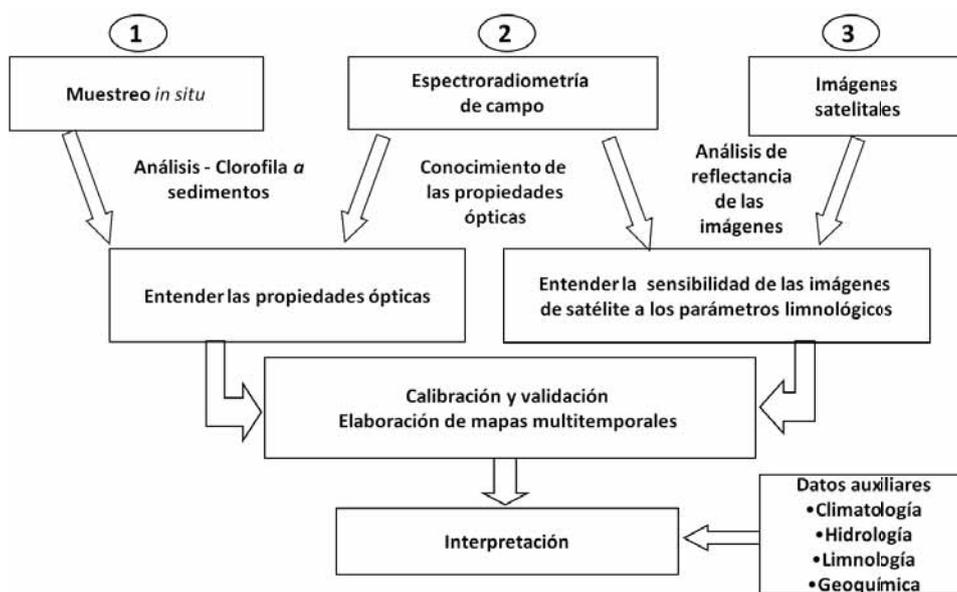


Figura A4-1: Relación de las tres técnicas metodológicas para estudios de monitoreo usando sensores remotos. Adaptado de Mendoza 2013.

A4.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abarca del Rio R., Crétaux J.F., Berge-Nguyen M. & Maisongrande P. 2012. Does Lake Titicaca still control the Lake Poopó system water levels? An investigation using satellite altimetry and MODIS data (2000-2009). *Remote Sensing Letters* 3(8): 707-714.
- Chuvieco E. 2002. *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ed. Ariel. Barcelona, España. 586 pp.
- Crétaux J. F., Calmant S., Abarca del Río A., Kouraev A. & Berge-Nguyen M. 2010. Lakes Studies from Satellite Altimetry. In Vignudelli S., Kostianoy A. G., Cipollini P. & Benviste J. (Eds.) *Handbook on Coastal Altimetry*. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 2-22.
- Crétaux J.F., Jelinski W., Calmant S., Kouraev A., Vuglinski V., Berge-Nguyen M., and M.-C. Gennero, Nino, F., Abarca Del Rio, R., Cazenave, A & Maisongrande, P. (2011). "SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data." *Advances in Space Research* 47: 1497-1507.
- Falvey M. & Garreaud R. D. 2005. Moisture variability over the South American Altiplano during the South American Low Level Jet Experiment (SALLJEX) observing season. *Journal of Geophysical Research* 110: 12 pp.
- Garreaud R. D. & Aceituno P. 2001. Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. *Journal of Climate* 14: 2779-2789.
- Meneses P.R. & Netto J.S.M. 2001. *Sensoriamento Remoto – reflectância dos alvos naturais*. Ed. UNB. Brasília, Brasil.
- Mendoza M. C. 2013. *Detección por satélite de parámetros limnológicos para evaluar la dinámica espacio-temporal de los lagos de planicies de inundación en la Amazonía Central Brasileira*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Moreau S., Bosseno R., Fa Gu Z. & Baret F. 2003. Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and totora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. *Remote Sensing of Environment* 85: 516-529.
- Moreau S. & Le Toan T. 2003. Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing livestock management. *Remote Sensing of Environment* 84: 477-492.
- Otto M., Scherer D. & Richters J. 2011. Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. *Hydrol. Earth Syst. Sci* 15:1713-1727.
- Owe M., Brubaker, K., Ritchie J. & Rango A. (Eds.) 2001. *Remote Sensing and Hidrology 2000*. International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication 267. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK. 610 p.
- Platnick S., King M. D., Ackerman S. A., Menzel W.P., Baum B. A., Riédi J. C. & Frey R. A. 2003. The MODIS Cloud Products: Algorithms and Examples from Terra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41:2. 459-473.
- Satge F., Arsen A., Bonnet M. P., Timouk F., Calmant S., Pilco R., Molina J., Lavado-Casimiro W. & Crétaux J. F. (submitted) Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano's watershed using ICESat/GLAS data.
- Schmugge T. J., Kustas W. P., Ritchie J. C., Jackson T. J. & Rango A. 2002. Remote Sensing in Hidrology. *Advances in Water Resources* 25: 1367-1385.
- Schowengerdt R. A. (Eds.) 2007. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. A. Press. United States. 515 p.
- Schultz G. A. & Engman E. T. 2000. Present use and future perspectives of remote sensing in hydrology and water management. In Owe M., Brubaker K., Ritchie J. & Rango A. (Eds.) *Remote Sensing and Hydrology 2000 (Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New México, USA. April 2000)* IAHS Publ. nº 267, 2001. 545-551.
- Veissid N. 2003. New satellite sensor and method for the direct measurement of the planetary albedo, results for 1999, 2000 and 2001 in South America. *Atmospheric Research* 66: 65-82.

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

- Villa G., Arozarena J., Peces J. & Domenech E. 2009. Plan Nacional de Teledetección: Estado Actual y Perspectivas Futuras. In Salomón Montecinos Aranda y Lara Fernández Fornos (Eds.) Teledetección: Agua y Desarrollo sostenible XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud, 23-26 de septiembre de 2009 pp. 521-524.
- Vuille M. & Baumgartner M. F. 1998. Monitoring the regional and temporal variability of winter snowfall in the arid Andes using NOAA/AVHRR data. *Geocarto International* 13 (1): 59-67.
- Wan Z., Zhang Y., Li Z.-L., Wang R., Salomonson V. V., Yves A., Bosseno R. & Hanocq J. F. 2002a. Preliminary estimate of calibration of the moderate resolution imaging spectroradiometer thermal infrared data using Lake Titicaca. *Remote Sensing of Environment* 80: 497-515.
- Wan Z., Zhanga Y. Zhanga Q. & Li Z-L. 2002b. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment* 83: 163-180.
- Wan, Z. 2004. Land Surface Temperature Measurements from EOS MODIS Data. National Aeronautics and Space Administration. 39 p.

LISTA DE REFERENCIAS (II SIMPOSIO INTERNACIONAL DEL LAGO TITICACA)

- Escudero L. 2013. Variación estacional de la clorofila-a del lago Titicaca usando imágenes de satélite MODIS – aqua. Instituto del Mar del Perú – IMARPE. II Simposio Internacional del lago Titicaca – TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.
- Flores M., Castillo E. & Nuñez J. 2013. Delimitación de áreas con diferentes grados de contaminación hídrica (eutrofización en la Bahía de Cohana, con imágenes de satélite Landsat 5-TM y Liss III. Instituto de Investigaciones Geográficas – UMSA. II Simposio Internacional del lago Titicaca - TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.
- Peña J. L. 2013. El rol de las observaciones satelitales en los sistemas de monitoreo de recursos hídricos: Oportunidades y retos. CSIRO Land&Water. II Simposio internacional del lago Titicaca - TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.
- Satge F. 2013. Desarrollo de un modelo de hidrología espacial para la cuenca del TDPS. Institut de Recherche pour le Développement – IRD. II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.
- Villegas Apaza P. R. 2013. Uso de imágenes satelitales para el monitoreo ambiental del Lago Titicaca. Instituto del Mar del Perú - IMARPE, Lima. II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.

M. Pouilly, X. Lazzaro,
D. Point & M. Aguirre

Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos
en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca

Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca

Convenio UICN-IRD N°303117/00

Coordinación
Marc **POUILLY**
Xavier **LAZZARO**
David **POINT**
Mario **AGUIRRE**



**Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos
e hidrobiológicos en el sistema TDPS
con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca**

La designación de entidades geográficas y la presentación del material en esta publicación no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la UICN respecto a la condición jurídica de ningún país, territorio o área, o de sus autoridades, o referente a la delimitación de sus fronteras y límites.

Los puntos de vista que se expresan en esta publicación no reflejan necesariamente los de la UICN.

Publicado por: UICN, Quito, Ecuador e IRD Institut de Recherche pour le Développement.



Con el auspicio de:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE

Con la colaboración de:



UMSA – Universidad
Mayor de San Andrés,
La Paz, Bolivia



UMSS – Universidad
Mayor de San Simón,
Cochabamba, Bolivia

Derechos reservados: © 2014 Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales.

Se autoriza la reproducción de esta publicación con fines educativos y otros fines no comerciales sin permiso escrito previo de parte de quien detenta los derechos de autor con tal de que se mencione la fuente.

Se prohíbe reproducir esta publicación para venderla o para otros fines comerciales sin permiso escrito previo de quien detenta los derechos de autor.

Cita de obra completa: M. Pouilly; X. Lazzaro; D. Point; M. Aguirre (2014). Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca. IRD - UICN, Quito, Ecuador. 320 pp.

Revisión: Philippe Vauchel¹, Bernard Francou¹, Jorge Molina², François Marie Gibon¹; ¹ IRD, ² UMSA

Disponible en: <http://www.uicn.org/sur>

EDITORES: UICN – Mario Aguirre ; IRD – Marc Pouilly, Xavier Lazzaro & David Point

IMPRESIÓN: Talleres Gráficos PÉREZ Tel. +(591-2) 225 5911 graficaleoperez@gmail.com

DEPÓSITO LEGAL nº 4-1-196-14PO, La Paz, Bolivia

ISBN nº 978-99974-41-84-3

IMPRESO EN BOLIVIA