

**Metodología para gestión de información hidrológica
en vías navegables: aplicación a Bolivia**

**Methodology for hydrological information
management in waterways: Application to Bolivia**

Bismarck Jigena¹

Renato Mamani²

Juan J. Muñoz-Perez³

Dolores Garvi⁴

Jorge Walliser⁵

Fátima Calderay⁶

Manuel Berrocoso⁷

¹Universidad de Cádiz, Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos (CASEM), Puerto Real, Cádiz, España, bismarck.jigena@gm.uca.es

²Servicio Nacional de Hidrografía Naval de Bolivia (SNHN), La Paz, Bolivia, renamave@gmail.com

³Universidad de Cádiz, Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos (CASEM), Puerto Real, Cádiz, España, juanjose.munoz@uca.es

⁴Universidad de Sevilla, Grupo TAR-Bioingeniería, Sevilla, España, sedceroya@us.es

⁵Universidad de Cádiz, Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos (CASEM), Puerto Real, Cádiz, España, jorge.walliser@uca.es

⁶Universidad de Cádiz, Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos (CASEM), Puerto Real, Cádiz, España, fatima.calderay@uca.es

⁷Universidad de Cádiz, Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos (CASEM), Puerto Real, Cádiz, España, manuel.berrocoso@uca.es

Autor para correspondencia: Bismarck Jigena,
bismarck.jigena@gm.uca.es

Resumen

La base de datos de la Red Hidrométrica de la Armada Boliviana (RHAB) carecía de la agilidad de consulta, por lo que precisa de un moderno gestor de información espacial y de base de datos para la optimización del manejo de los recursos hidrológicos. Por ello, se presenta una

nueva metodología, generalizable a cualquier país, para desarrollar un sistema multidisciplinario de información geográfico (SIG) en Internet. Es de fácil e intuitiva utilización, orientado a la gestión de información hidrométrica para alerta temprana, apoyo a la navegación, al transporte fluvial y lacustre, para proyectos y obras de investigación, ingeniería, cartografía, pesca y turismo, entre otros. El acceso a la base de datos geográfica que contiene la información hidrológica se realiza mediante Internet, con un visor web geográfico. Se han integrado diferentes aplicaciones de *software* de distribución libre, junto con diversos lenguajes de programación. La disposición inmediata de datos precisos coadyuva en la prevención de desastres por inundaciones.

Palabras clave: nivel de agua, manejo hidrológico, navegación fluvial, alerta temprana.

Abstract

The Hydrometric Network of the Bolivian Navy (RHAB) database lacks the ease of consultation required by a modern administrator for the optimization of the management of hydrological resources. Therefore, we presented a new methodology, generalizable to any country, to develop a multidisciplinary geographic information system (GIS) on the web. It is easy and intuitive to use and oriented to hydrometric information management for early warning, navigation support, and fluvial and lacustrine transport, and for projects and works involving research, engineering, cartography, fishing, tourism, etc. The geographic database containing the hydrological information is accessed through the internet with a geographical web viewer. Different free distribution software applications have been integrated together with different programming languages. The immediate provision of accurate data also helps in the prevention of flood disasters.

Keywords: Water level, hydrological management, river navigation, early warning.

Recibido: 31/05/2017

Aceptado: 26/01/2018

Introducción

Las necesidades de control del agua hoy en día no pueden satisfacerse con los medios de gestión actuales (Návar & Lizárraga, 2016). Tanto

los fenómenos de sequía como de inundación precisan de un sistema de alerta temprana diseñado en algunos países bajo la tutela de organismos nacionales e internacionales, con la finalidad de prevenir catástrofes de todo tipo (p. ej., OEA, 2010; Conagua, 2011; UNESCO, 2006; UNESCO, 2012), al igual que un Sistema Automatizado de Información Hidrológica (SAIH) como el español (p. ej., el informe preparado por la Escuela Nacional de Protección Civil, 2015), que proporcione al gestor la información necesaria para facilitarle el manejo de la cuenca hidrográfica y la toma de decisiones. Diferentes tipos de estrategias han sido presentadas por numerosos autores, como López (2005); Baró, Delgado, Esteller y Calderón (2007); Campos-Aranda (2015), y Álvarez y Escalante (2016).

En Bolivia, el Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN) registra, procesa y difunde información hidrométrica referida a la variabilidad de niveles de los principales cuerpos de agua navegables del país. Para ello, se estableció la Red Hidrométrica de la Armada Boliviana (RHAB), que actualmente cuenta con 45 estaciones. Las primeras fueron instaladas en 1975, en Laguna Cáceres (Cuenca del Plata) y en el puerto de Guaqui (Lago Titicaca), de las cuales se cuenta con más de 40 años de registro diario continuo (SNHN, 2014). A partir de 1995, se empezaron a instalar nuevas estaciones hidrométricas en las localidades donde se encuentran las unidades navales de la Armada Boliviana (AB), bases navales y capitanías de puerto, aprovechando la distribución geográfica de las mismas, ubicadas en las tres cuencas hidrográficas del país. Al ser instaladas dentro de los predios de las unidades navales se garantiza el mantenimiento de la red y la seguridad de los equipos e instalaciones de la estación hidrométrica. Se realiza un monitoreo diario de los niveles de agua por observadores de la Armada Boliviana, quienes realizan un curso de formación previo. Asimismo, efectúan el registro hidrométrico y transmisión diaria de estos datos al SNHN (vía radio, teléfono o Internet, dependiendo de las comunicaciones disponibles). A la fecha, la RHAB carece de la agilidad y disponibilidad necesarias para realizar una consulta ágil por los usuarios, precisándose de un gestor moderno para la optimización de su manejo.

El objetivo de este artículo es presentar una nueva metodología, generalizable a cualquier otro país, para habilitar un sistema de información geográfico (SIG) en la web. Este sistema debe permitir el acceso inmediato a la base de datos de niveles de agua y servir de apoyo en la toma de decisiones para un Sistema de Alerta Temprana (SAT) contra eventos hidrológicos extremos.

Área de estudio

Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde al territorio del estado plurinacional de Bolivia Y cuenta con una superficie de 1 098 591 km². Hidrológicamente, Bolivia forma parte de tres de las más importantes cuencas hidrográficas de Sudamérica: la Cuenca del Amazonas, la del Plata, y la endorreica o altiplánica (Figura 1a y Figura 1b).

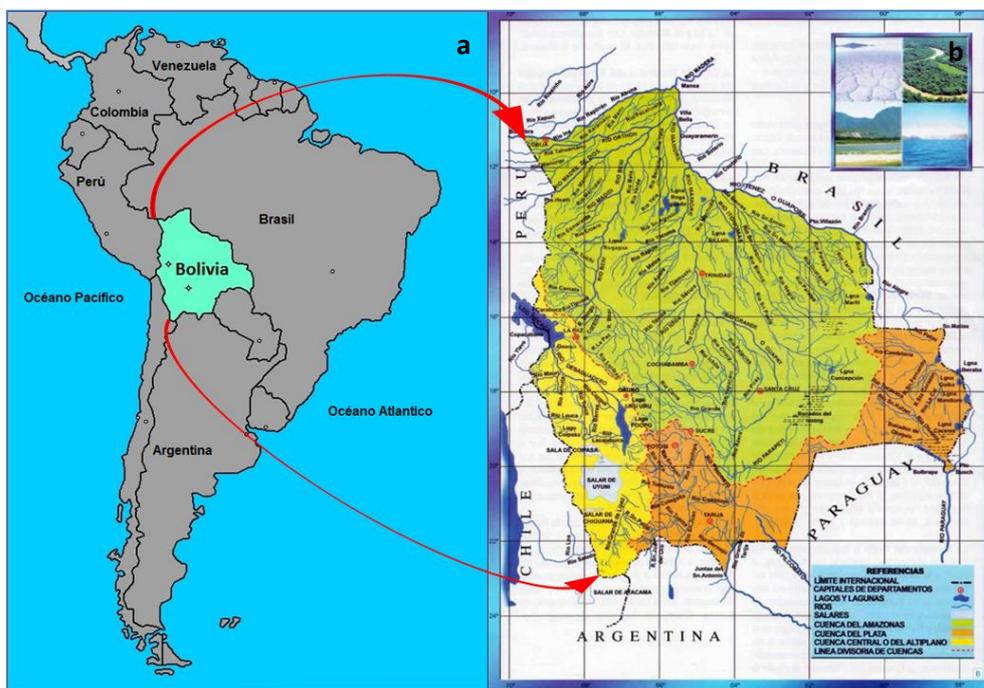


Figura 1. Área de estudio: a) ubicación de Bolivia; b) cuencas hidrográficas de Bolivia. Fuente: adaptado de SNHN (2007).

De acuerdo con SNHN (2014), la cuenca Amazónica, la más extensa e importante, ocupa un 65% del territorio. Sus ríos principales desembocan en el Madera, que es uno de los principales afluentes del Amazonas. La Cuenca del Plata ocupa el sureste del país y cubre un 20% del territorio nacional. La cuenca endorreica o altiplánica es una cuenca cerrada, que cubre un 14% del territorio y forma un eje entre los grandes lagos endorreicos del país: el Titicaca, el Poopó y el Uru Uru. Estas cuencas están constituidas por 10 subcuencas, 270 ríos principales, 184 lagos y lagunas, unos 260 humedales y dos salares. Finalmente, en la parte occidental, se cuenta con la vertiente hidrográfica hacia el océano Pacífico, con menos de 1% de la superficie.

Redes hidrométricas

Para el estudio se han considerado 45 estaciones hidrométricas de la RHAB (33 en la cuenca del Amazonas, siete en la cuenca del Plata y cinco en la cuenca lacustre) ubicadas en diferentes puntos de los cuerpos de agua navegables. Su mantenimiento corresponde al SNHN, organismo nacional técnico-científico dependiente del Ministerio de Defensa de Bolivia. De estas 45 estaciones, 22 forman parte del Sistema de Alerta Temprana de seguimiento hidrológico (SAT) (Figura 2).

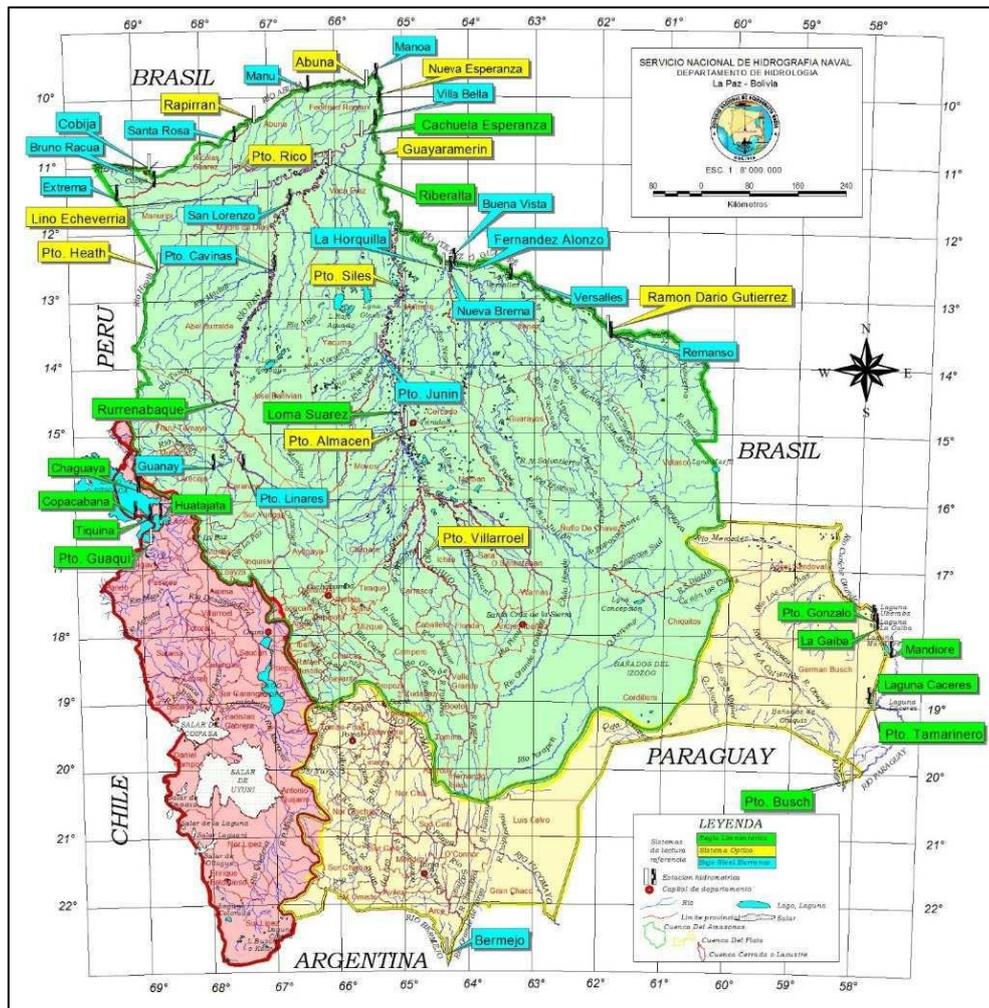


Figura 2. Estaciones hidrométricas de la redes RHAB y SAT. Fuente: SNHN (2007).

El SAT establece mecanismos de control para activar los protocolos de emergencia en caso de crecidas o estiajes extraordinarios. Cabe señalar que los ríos navegables constituyen una alternativa real para el siglo XXI dentro de la estructura del sector transportes en Bolivia.

Metodología

Ubicación de las estaciones hidrométricas del SAT

La posición geográfica de las estaciones se determinó mediante técnicas GPS, realizando las observaciones con receptores de doble frecuencia, utilizando el método geodésico estático para posproceso. Se obtuvieron coordenadas absolutas geocéntricas referidas al Sistema de Referencia MAGNA-SIRGAS y WGS-1984 para la época ITRF2000 y transformadas a coordenadas geodésicas. El cálculo de coordenadas se realizó aplicando la metodología propuesta por Berrocoso, Enríquez-de-Salamanca, Ramírez, Fernández-Ros y Jigena (2007); Berrocoso *et al.* (2008), y Jigena, Vidal y Berrocoso (2015b), utilizando el *software Leica Geomatics Office*. Altimétricamente están vinculados al elipsoide WGS-84 y al nivel medio del mar del mareógrafo de Arica (Chile). Las coordenadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de las estaciones de la red SAT.

Estación	Río	Lat. (S)	Long.	<i>h</i> (m)	<i>H</i>
Rurrenabaque	Beni	14°26'3	67°31'5	225.78	194.00
Riberalta	Beni	10°59'4	66°03'5	149.64	125.00
Cachuela	Beni	10°32'8.	65°34'5	138.95	116.00
Puerto Heath	Madre de	12°30'0	68°38'3	197.68	168.00
Lino Echeverría	Madre de	11°28'1	67°14'2	171.92	148.00
Puerto Rico	Orthon	11°	67°33'3	202.94	176.00
Abuná	Abuná	09°47'1	65°32'1.	117.14	98.00
Rapirrán	Abuná	10°41'0	68°	196.51	170.00
Cobija	Acre	11°00'3	68°45'2	222.24	191.00
Puerto Villarroel	Ichilo-	16°50'1	64°47'3	215.43	194.00
Puerto Siles	Ichilo-	12°48'0	65°00'1	183.02	138.00
Guayaramerín	Ichilo-	10°48'4	65°20'3	142.25	120.00
Puerto Almacén	Ibare	14°52'0	64°58'1	181.30	155.00
Loma Suárez	Ibare	14°45'4	64°57'5	180.53	154.00
Puerto Junín	Yacuma	13°43'3	65°25'3.	171.52	142.00

Ramón Darío	Iténez	13°31'2	61°52'1	176.46	158.00
La Horquilla	Itonamas	12°32'2	64°22'5.	156.17	133.00
Fernández Alonzo	Blanco	12°33'4	64°16'2	158.05	135.00
Puerto	Canal	18°59'0	57°42'2	94.86	80.00
Puerto Busch	Paraguay	20°03'5	58°02'0	58.49	42.00
Bermejo	Bermejo	22°43'5	64°20'5	433.76	407,00
Puerto Guaqui	Lago	16°35'1	68°51'2	3856.02	3811.00

Codificación del SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA (SAT)

En cada estación se definieron cuatro colores para los niveles de riesgo de alerta determinados por la altura alcanzada en el río o lago (SNHN, 2017): alerta verde (sin riesgo de inundación); amarilla (riesgo bajo de inundación); naranja (riesgo alto de inundación), y roja (inicio de inundación, que está definido por la cota superior del nivel del barranco del río o lago).

Adquisición de datos hidrométricos

La adquisición de los datos se realiza en una estación hidrométrica, mediante la observación y obtención directa de lecturas en una o varias reglas hidrométricas (limnímetros) de precisión centimétrica (0.01 m) (Chamorro, 2008). Se determina la diferencia vertical del nivel de agua con respecto a un Benchmark de Referencia de Nivel (BMRN, por su nombre en inglés), debidamente georreferenciado, de acuerdo con la metodología propuesta por Jigena, Vidal y Berrocoso (2015a). El BMRN de cada estación puede estar referenciado a la Red Altimétrica de Bolivia (cota ortométrica con respecto al nivel medio del mar de Arica (Chile) o a la altura elipsoidal (h), con respecto al elipsoide WGS-84). Los ejemplos de instalaciones según Chamorro (2008) pueden apreciarse en la Figura 2.

De las 45 estaciones hidrométricas que conforman la RHAB, la lectura directa sobre la regla limnimétrica se realiza en 14 estaciones, con sistema óptico en 11 estaciones y utilizando el nivel del barranco como referencia en las 20 estaciones restantes (SNHN, 2014).

Estaciones limnimétricas fijas

El limnómetro se instala en un lugar del río protegido de las corrientes, olas, golpes y otros peligros propios de la hidrología fluvial. Su ubicación depende de la pendiente existente en la orilla y por lo general se instala en forma vertical y fija a alguna estructura (Figura 2a). También existe la instalación escalonada o vertical, pero por secciones, donde todos los limnómetros están verticalmente referenciados. Este tipo de instalaciones se realiza por lo general en los ríos de la cuenca del Amazonas o del Plata debido a los acusados cambios de nivel entre la época de estiaje y la de crecida, que suele tener una amplitud de varios metros (Figura 2a y Figura 2b). La ventaja de las estaciones fijas es su bajo costo, mientras que su inconveniente estriba en la necesidad de un observador.

Estación limnimétrica con sistema óptico (móvil)

Este tipo de estaciones se ubica en lugares donde sea impracticable la instalación de una regla hidrométrica fija o con la finalidad de proteger al limnómetro contra accidentes por efectos de las corrientes, olas y golpes, entre otros, que suelen ocurrir durante las crecidas de los ríos, así como a colisiones de embarcaciones o a navegantes sin escrúpulos que las utilizan como puntos de amarre. Estas estaciones constan de un sistema conformado por una regla limnimétrica móvil y nivel óptico que se monta sobre un trípode, también móvil, que durante la lectura de los niveles se empotra a una base de concreto referenciada altimétricamente al BMRN. Este tipo de estaciones se encuentra establecida en la cuenca del Amazonas y la cuenca del Plata.

Referencia nivel barranco

En caso de pérdida de la estación hidrométrica se ha adoptado como referencia altimétrica el nivel barranco (NB). La lectura del nivel de agua puede realizarse bajo el nivel de barranco (BNB) en la época de estiaje o sobre el nivel del barranco (SNB) durante las crecidas (Figura 2b).



Figura 3. Tipos de estaciones hidrométricas: a) con limnímetros escalonados en puerto Busch, río Paraguay; b) referencia nivel barranco en Versailles, río Iténez. Fuente: SNHN.

Protocolo actual de adquisición y publicación de la información hidrológica

El protocolo a seguir para el acceso y obtención de la información hidrológica es el siguiente (SNHN, 2014; SNHN 2017):

- En las capitanías de puerto y bases navales hay un responsable que cumple las funciones de observador, quien se encarga de leer el nivel de agua (ya sea por el método clásico, por sistema óptico de medición o referencia nivel barranco) y está a cargo de la libreta de registros.
- La lectura anotada se transmite al Centro de Comunicaciones de Capitanía de Puerto o Base Naval, al SNHN en La Paz y al Departamento de Hidrología (DH), donde se registra y procesa.
- En el DH se obtienen las curvas de variación de niveles del agua y de acuerdo con el nivel de riesgo observado se dará la alerta respectiva a las unidades navales que puedan verse afectadas, que alertan a las poblaciones ribereñas de su jurisdicción.
- Al mismo tiempo se envían reportes a las Instituciones relacionadas con gestión de riesgos: Ministerio de Defensa, Viceministerio de Defensa Civil (Videci), Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN), Comando General de la Armada Boliviana (CGAB), unidades navales, gobernaciones y municipios involucrados, y Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Por último, se comunica a la prensa, radios y canales de TV.

Diseño del sistema de gestión hidrológica de alerta temprana en la web (SIGHW)

Los sistemas de información geográfica tienen múltiples campos de aplicación en el análisis y la gestión del riesgo de inundaciones fluviales (Llorente, Díez-Herrero & Laín, 2009), desde aspectos del estudio de la peligrosidad hasta la adopción de medidas de carácter predictivo, preventivo o correctivo (posdesastre). Para la gestión de la información hidrológica de la red SAT y del riesgo de inundaciones fluviales en las vías navegables de Bolivia, se ha diseñado el sistema SIGHW, que es un sistema de información geográfica de distribución y acceso al usuario final a través de la web.

La primera fase del diseño del sistema es definir la información geográfica, hidrométrica e hidrológica a utilizar, y darle un formato estándar, pues la información original está en diferentes formatos digitales o se encuentra en formato de papel (como tablas, planos, croquis, etc.), y tiene que ser digitalizada y después sometida a un control de calidad (GeoBolivia, 2014; Bernabé & López, 2012). Posteriormente, se definen las capas o *layers* a utilizar en el sistema. Para el SIGHW, se contó con las 22 estaciones que pertenecen a la red SAT. En algunas estaciones, como la de Guaqui, la serie temporal tiene más de 40 años de registro hidrométrico diario. Las siguientes fases consisten en el diseño de la arquitectura del sistema y de los modelos funcional, conceptual, lógico y físico, tomando en cuenta las recomendaciones dadas por GeoBolivia (2014), Franco (2016) e IDEAndalucía (2017).

Diseño de la arquitectura del sistema de información geográfica

Los niveles de arquitectura del sistema son interfaz de usuario, servidor de aplicaciones y base de datos.

- La interfaz de usuario está integrada por dos tipos de aplicaciones:
 - Cliente pesado: se pueden utilizar las aplicaciones *QGIS*, *ArcGIS* o *GvSIG*, que tienen acceso a la información geográfica georreferenciada.

- Cliente ligero: sólo tiene acceso a la información geográfica y tabular mediante un navegador web.

Mediante estas aplicaciones se puede solicitar el recurso requerido disponible en la web a través de las herramientas *OpenLayers* y *GeoExt* que proveen un conjunto de *widgets* personalizables para visualización, edición y estilo de los datos geoespaciales.

- El servidor de aplicaciones o *software* intermedio: su tarea principal es la de proporcionar y gestionar los recursos solicitados y atender peticiones del usuario. En este nivel se encuentra un servidor de mapas SIG, al que se tiene acceso utilizando el *GeoServer*.
- La base de datos es el almacén permanente de los datos y gestión de la información. Para su gestión se utiliza el *software PostgreSQLPostgis*.

Modelo funcional

Este modelo permite identificar la relación entre el usuario y los actores involucrados.

- Usuario: interactúa en forma directa con el visor geográfico, pudiendo desplegar la información, consultar la leyenda, usar el *zoom* y otros botones de selección con los que se facilita la interpretación, y ubicación de la información geográfica disponible.
- Actor profesional SIG: prepara la información cartográfica requerida por el cliente usuario en capas temáticas, como estaciones hidrométricas, hidrografía, cuencas hidrográficas y datos hidrológicos, entre otros.
- Actor profesional hidrólogo: almacena y procesa los datos hidrométricos reportados por las unidades AB, para su posterior publicación en la página web del SNHN.
- Actor profesional ingeniero de sistemas: se encarga del área de sistemas informáticos, recibe la información hidrológica generada para publicar en el sitio web del SNHN y la organiza de modo que usuarios de otros organismos, como VIDECI, SENAMHI, AB, puedan contar con ella de manera oportuna y actualizada.

Modelo conceptual

El modelo conceptual interrelaciona las dos bases de datos disponibles: *Esta_Hidromet*, que corresponde a las 45 estaciones

hidrometeorológicas de la red RHAB, y *Esta_Mon_Hidrolog*, que corresponde a las 22 estaciones de la red SAT. En la Figura 4 se muestra el modelo funcional con sus diferentes actores y el modelo conceptual de las bases de datos.

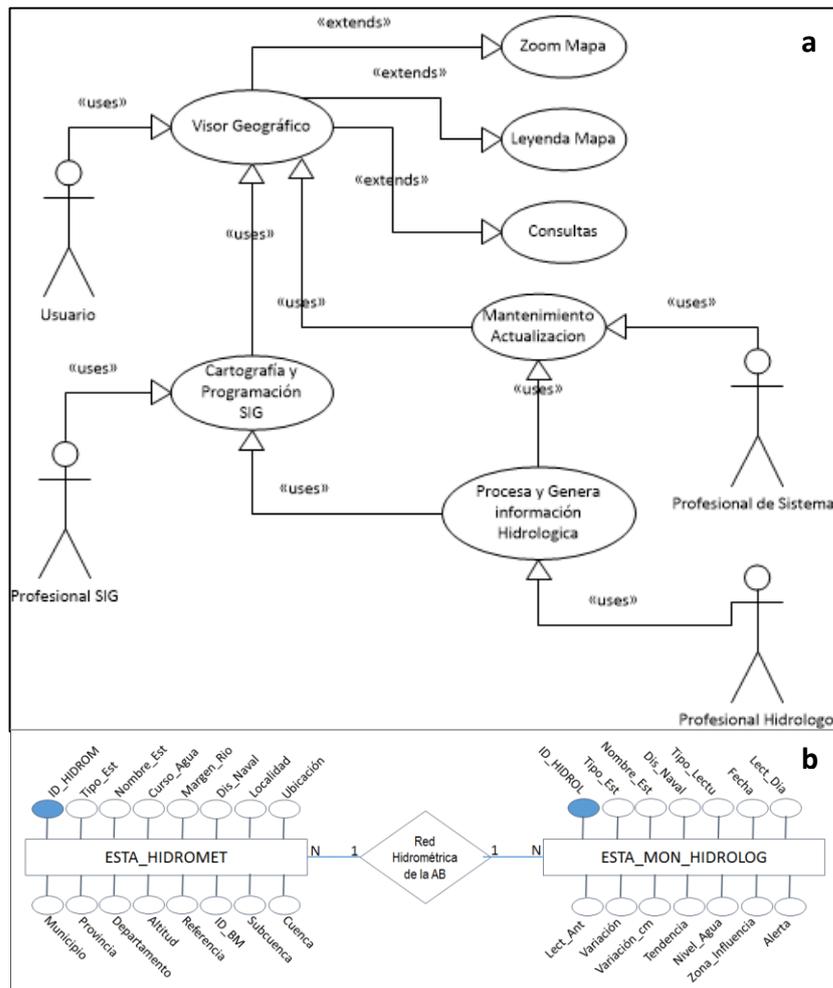


Figura 4. Modelos del SIGHW: a) funcional y diagrama casos de uso; b) conceptual de las base de datos.

Modelo lógico

El modelo lógico define la estructura que contiene la base de datos espacial, considerando el modelo conceptual para su desarrollo. De este modo, la base de datos espacial permitirá realizar consultas mediante el lenguaje de consulta estructurada *SQL* (Structured Query Language), a través del gestor de base de datos *PostgreSQL*, aunque también se pueden realizar consultas *CQL* (Contextual Query

Language) mediante el visor geográfico. Fue elaborado mediante esquemas de nomenclatura UML (Unified Modeling Language) utilizando *Visio 2007*.

Modelo físico

La última etapa fue la implementación del modelo físico que definió la forma de almacenar la información utilizando el sistema de gestión de base de datos relacional *PostgreSQL* y la extensión espacial *PostGIS*, consideradas las herramientas más idóneas para el desarrollo del presente proyecto.

Para la implementación del modelo físico del SIGHW se desarrolló la base de datos *Hidrom*, que contiene las capas base de información del monitoreo hidrológico. El *software* utilizado para gestionar y visualizar la información geográfica de las diferentes capas o *layers* es el *QGIS*, un sistema cliente-servidor bajo licencia GNU. Se pueden realizar consultas *SQL* e identificar los campos que describen aspectos hidrológicos del cuerpo de agua navegable.

La aplicación *GeoServer* se encarga de visualizar la información espacial en la web, creando mapas para diferentes servicios, como la *Web Map Service* (WMS) y el estándar *Web Feature Service* (WFS), que permiten el intercambio y la descarga de datos integrados con *OpenLayers*.

Para mejorar la visualización de los elementos cartográficos en el *GeoServer*, se utilizan el lenguaje de programación integrado *Styled Layer Descriptor* (SLD) y la herramienta de entorno de desarrollo integrado (IDE por su nombre en inglés) *NetBeans*. En la Figura 5 se aprecia el modelo físico con los diferentes campos de la base de datos.

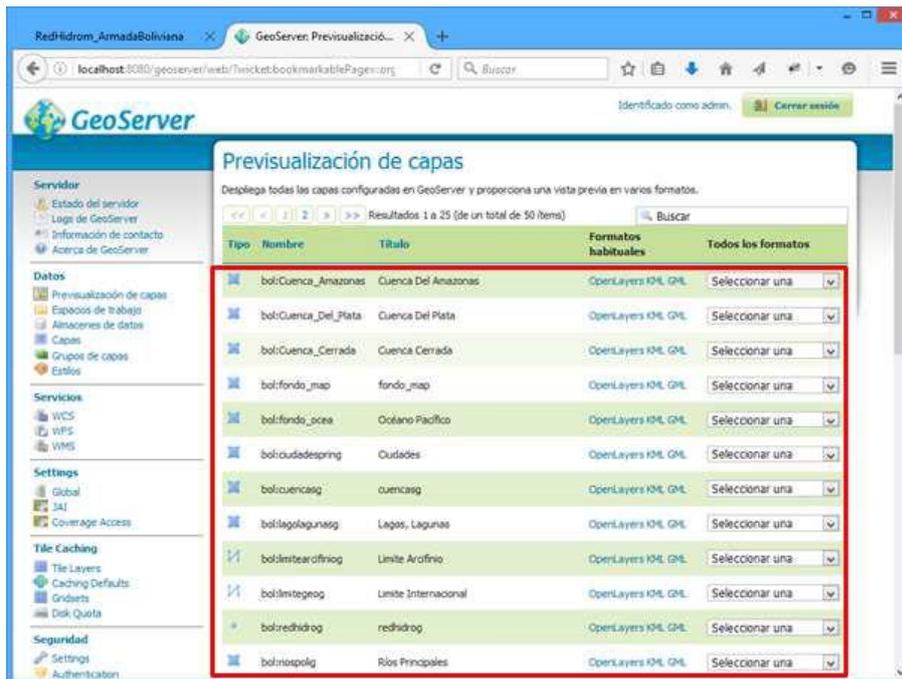


Figura 5. Modelo físico de la base de datos espacial en *PostgreSQL*, con los diferentes campos de la base de datos hidrológicos y su visualización en el servidor de mapas *GeoServer*.

Despliegue de la información geográfica en la web

El propósito de esta fase es asegurar que la información almacenada en el servidor de mapas *GeoServer* esté disponible para los usuarios finales en el formato adecuado, ajustando los errores y defectos encontrados en las pruebas de aceptación, y verificando que el producto cumple con los requerimientos del cliente usuario. Mediante las librerías de *OpenLayers* y *GeoExt* desarrolladas en JavaScript se pueden añadir mapas a páginas web bajo un entorno de desarrollo integrado (IDE) *Netbeans*. Para poder visualizar la información del *Geoserver* a nivel usuario se instaló el servidor web Apache Tomcat, para pruebas en modo *local host*. La Figura 5 muestra una visualización del visor web geográfico que despliega información de monitoreo hidrológico y de estaciones secundarias.

El visor web geográfico

Este visor es una herramienta que permite visualizar de manera dinámica no sólo la información de estaciones de monitoreo hidrológico de cuerpos de agua navegable, sino la de estaciones hidrométricas “secundarias”, que conforman la RHAB. El visor se encuentra dividido en seis secciones de trabajo: Nombre del visor, Panel principal, Capas, Leyenda, Herramientas de navegación y Opciones de acceso a la información hidrométrica.

Seleccionando la opción Estaciones de monitoreo, se despliega la tabla de monitoreo hidrológico con los datos de nivel agua actual y anteriores. En función del análisis de estos datos se emite información de comportamiento hidrológico del cuerpo de agua navegable.

Gestión de la información hidrológica

En el visor también es posible seleccionar una determinada estación de monitoreo; mediante un *zoom* de acercamiento se visualizan y despliegan los datos (ver Figura 5).

Base de datos espacial

En la arquitectura del sistema se identifica a la base de datos como el corazón del sistema de información. Para ello se ha utilizado el módulo de Base de Datos Espacial *PostGIS*, que es la herramienta a partir de la cual se realiza la gestión de la información hidrológica, permitiendo que la información sea accesible desde el nivel cliente, mediante un navegador web. *PostGIS* añade el soporte para la creación de objetos geográficos a la base de datos objeto-relacional *PostgreSQL*, convirtiéndola en una base de datos espacial para su empleo en un sistema de información geográfica. Se publica bajo la licencia pública general de GNU.

Sin embargo, la actualización de la base de datos espacial con nueva información hidrológica sólo puede realizarla un usuario avanzado con privilegios de administrador: el usuario Profesional SIG. Este administrador tiene acceso a la base de datos espacial *HIDROM*, y los datos modificados o actualizados se contemplan de manera inmediata en la presentación de la información que despliega el visor web geográfico.

Resultados y discusión

Entre los productos finales se obtuvo un mapa con la esquematización de las estaciones hidrométricas, que incluye las gráficas del comportamiento hidrológico del río en los últimos 12 meses y en cinco años. Estos productos actualmente no se encuentran disponibles para el usuario final debido a que se elaboran de forma manual y en formato de papel; pero se está desarrollando una aplicación adicional en el SIGHW para generar y distribuir esta información vía web, actualizada a la fecha (Figura 6).

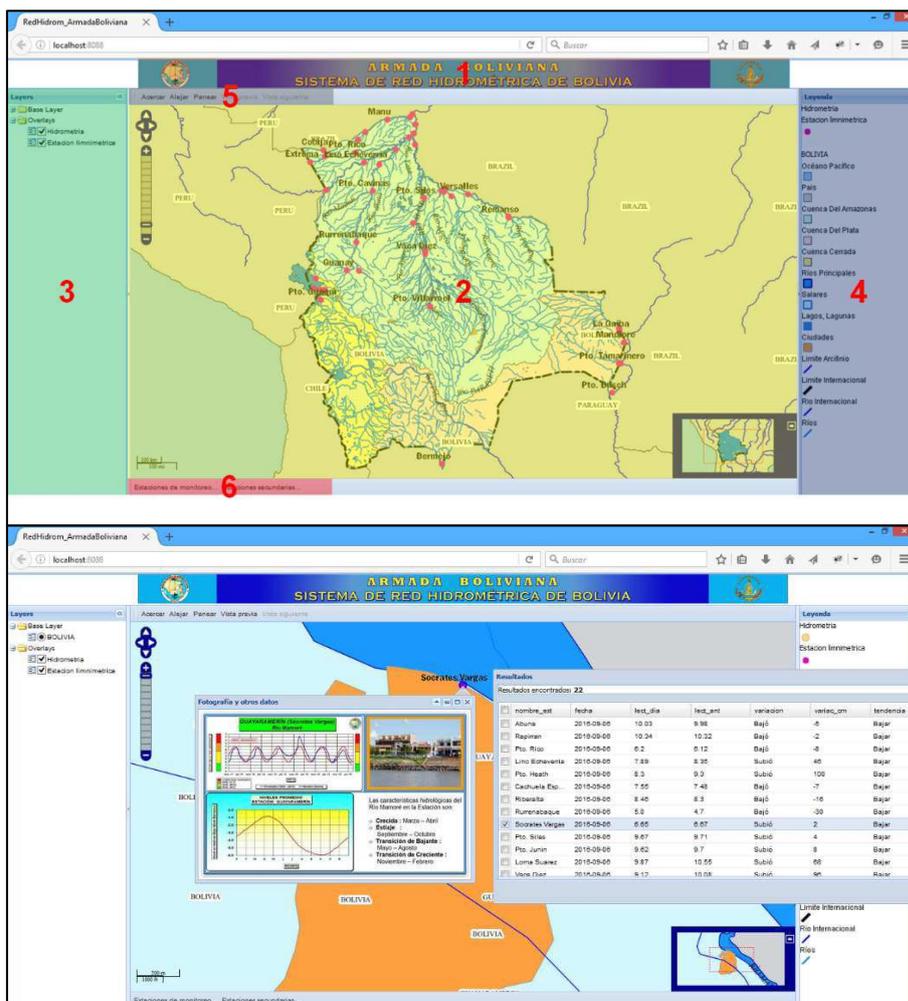


Figura 6. Visor web geográfico. Arriba: visualización y secciones de trabajo. Abajo: despliegue de información de la Estación Hidrológica "Sócrates Vargas".

La implementación y puesta en marcha de sistema SIGHW aportará muchos beneficios a la gestión de la información hidrológica y del recurso agua en el país, entre los que podemos mencionar:

- Minimización del uso de medios informáticos para la impresión del documento con información hidrológica.
- Reducción de costo para la implementación del sistema.
- Mejorar la gestión de la información hidrológica.
- Mejor aprovechamiento de los recursos tecnológicos instalados.
- Hacer uso de las últimas tecnologías mediante la implementación de una aplicación SIG basada en la web.
- Mejora de la calidad de la información hidrológica publicada y optimización de tiempos.
- Publicación y distribución oportuna de la información hidrológica en la web.
- Mejora en el apoyo al sistema de alerta temprana y otras aplicaciones técnico científicas.
- Acceso amigable e intuitivo a la información hidrológica.
- Gestión de la información hidrológica mediante una base de datos espacial.

Conclusiones

Dentro de la corriente general internacional de desarrollo de nuevos sistemas de gestión del agua se plantea el caso particular de la red de datos recogidos dentro de la RHAB. Esta red carecía, hasta ahora, de la agilidad y disponibilidad para realizar consultas, precisando de un gestor moderno para la optimización de la gestión en el manejo de los recursos hidrológicos. Por este motivo, se presenta una nueva metodología, un sistema de información geográfico (SIG) en la web, que permite el acceso inmediato a la base de datos de niveles de agua, mediante un visor geográfico de fácil empleo y que puede ser generalizable a la cuenca hidrográfica de cualquier otro país.

En primer lugar, ha sido preciso establecer de manera muy clara tanto la clasificación de la información como los niveles receptores de la misma. Posteriormente, se ha organizado la información hidrológica mediante un visor web geográfico, en el que el formato de publicación y gestión de la información hidrológica se realiza de manera dinámica, con disponibilidad y acceso en cualquier lugar mediante Internet.

Para el desarrollo del sistema se han integrado diferentes herramientas y aplicaciones *software* de distribución libre, como el gestor de bases de datos espaciales *PostGIS*; el servidor de mapas web *GeoServer*; el

entorno de desarrollo integrado *NetBeans*, y lenguajes de programación, como *Java*, *HTML5*, *CSS*, *JavaScript*, con sus librerías *OpenLayers* y *GeoExt*, así como el servidor web Apache Tomcat.

Este sistema, con la información hidrológica, se constituye en uno de los elementos imprescindibles del sistema de alerta temprana, que coadyuva a la prevención de desastres como consecuencia de fenómenos hidrológicos extremos, ya sea por crecidas o por estiaje del nivel de agua. Actualmente el sistema está en producción en modo *stand-alone*, y se prevé su publicación en la web en el futuro inmediato.

En el sistema *SIGHW* se ha buscado que el formato de publicación y gestión de la información hidrológica en la web sea muy intuitivo y ágil para el usuario, de fácil aprendizaje y manejo. También se ha conseguido que el gestor pueda disponer de manera inmediata de los datos que precise para la toma de decisiones en los ámbitos del sistema de alerta temprana, el transporte y navegación segura en las hidrovías navegables de Bolivia, así como en proyectos portuarios, de turismo, pesca, comercio e infraestructura civil, entre otros.

El siguiente paso será la migración del actual sistema de adquisición de datos de nivel agua, que es un sistema manual y analógico, a un sistema de registro digital, automático y de transmisión de datos en tiempo real, previa realización y aprobación de un Proyecto de Implementación del Sistema Automático de la Red Hidrométrica de la Armada Boliviana.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Servicio Nacional de Hidrografía Naval del Estado Plurinacional de Bolivia por su apoyo en cuanto al empleo de la información hidrométrica de la RHAB, así como en el uso de equipos y bibliografía técnica.

Referencias

- Álvarez, G., & Escalante, C. A. (2016). Análisis de frecuencias no estacionario de series de lluvia anual. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(1), 71.
- Baró, J. E., Delgado, C., Esteller, M. V., & Calderón, G. (2007). Curvas de daños provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México. Propuesta metodológica. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22, 91-102.

- Bernabé, M. A., & López, C. M. (2012). *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)*. Ed. UPM Press. Madrid, España.
- Berrocoso, M., Enríquez-de-Salamanca, J. M., Ramírez, M. E., Fernández-Ros, A., & Jigena, B. (2007). Determination of a local geoid for Deception Island (pp. 123). In: *Antarctica: A keystone in a changing world*. Washington, DC, USA: The National Academies Press.
- Berrocoso, M., Fernández, A., Ramírez, M. E., Enriquez, J. M., Torrecillas, C., Pérez-Peña, A., Páez, R., García, A., Jiménez-Teja, Y., García, F., Soto, R., Gárate, J., Martín, J., Sánchez, A., De Gil, A., Fernández, J. A., & Jigena, B. (2008). Geodetic research on Deception Island and its environment during Spanish Antarctic Campaigns (1987–2007) (pp. 97-124). In: Reinhard Dietrich (ed.). *Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica*. Berling, Heidelberg, Germany: Springer.
- Campos-Aranda, D. F. (2015). Estimación del escurrimiento mensual en climas húmedos con base en modelos de regresión. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(2), 113-130.
- Chamorro, G. I. (2008). *Guía de hidrometría de aguas superficiales. Medición del nivel de agua*. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2011). *Manual para el control de inundaciones*. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Escuela Nacional de Protección Civil. (2015). Estado actual de los sistemas automáticos de información hidrológica (SAIH). En: *Taller de actualización sobre gestión de riesgos hidrometeorológicos (72 pp.)*. Madrid, España: Escuela Nacional de Protección Civil.
- Franco, R. (2016). *Geoportales y visores geográficos en Colombia* (pp. 144). Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- GeoBolivia. (2014). *Implementación de la infraestructura de datos espaciales del estado plurinacional de Bolivia (IDE-EPB)*. La Paz, Bolivia: Vicepresidencia del Estado Plurinacional de Bolivia. Proyecto GeoBolivia. Recuperado de <http://www.youblisher.com/p/731834-Publicacion-1/>
- IDEAndalucía. (2017). *Geoportal de datos espaciales de Andalucía*. Andalucía, España. Recuperado de <http://www.ideandalucia.es/portal/web/ideandalucia/>
- Jigena, B., Vidal, J., & Berrocoso, M. (2015a). Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland

- Islands, Antarctica), using annual time series. *DYNA, Revista de la Facultad de Minas*, 82(191), 209-218.
- Jigena, B., Vidal, J., & Berrocoso, M. (2015b). Determination of the mean sea level at Deception and Livingston islands, Antarctica. *Antarctic Science*, 27(1), 101-102.
- López, J. L. (2005). Estrategias de mitigación y control de inundaciones y aludes torrenciales en el Estado Vargas y Valle de Caracas: situación actual y perspectivas futuras. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 20(4), 61-73.
- Llorente, M., Díez-Herrero, A., & Laín, L. (2009). Aplicaciones de los SIG al análisis y gestión del riesgo de inundaciones: avances recientes. Actas I Jornadas Técnicas SIGTEFOR. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 29, 29-37.
- Návar, J., & Lizárraga, L. (2016). Patrones temporales de flujo del río en las cuencas del norte de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(1), 35.
- OEA, Organización de Estados Americanos. (2010). Programa Centroamericano para la alerta temprana ante inundaciones en pequeñas cuencas (SPV) y reducción de la vulnerabilidad: Desarrollo de una Plataforma Nacional (edición especial). En: *Manual para el Diseño, Instalación, Operación y Mantenimiento de Sistemas Comunitarios de Alerta Temprana ante Inundaciones* (81 pp). Washington, DC, USA: Organización de Estados Americanos.
- SNHN, Servicio Nacional de Hidrografía Naval. (2007). *Hidrografía de Bolivia*. La Paz, Bolivia: Ministerio de Defensa, Servicio Nacional de Hidrografía Naval.
- SNHN, Servicio Nacional de Hidrografía Naval. (2014). *Memoria Hidrométrica 2001-2014. Informe Técnico*. La Paz, Bolivia: Servicio Nacional de Hidrografía Naval.
- SNHN, Servicio Nacional de Hidrografía Naval. (2017). *Portal del Servicio Nacional de Hidrografía Naval*. Recuperado de <http://hidronav.org/?q=node/33>
- UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2006). *Water, a shared responsibility. The United Nations World Water Development Report 2*. New York, USA: UNESCO.
- UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2012). *Sistemas de alerta temprana 10 preguntas y 10 respuestas para la comunidad educativa de Panamá*. Proyecto Regional DIPECHO VII UNESCO-CEPREDENAC. San José, Costa Rica: UNESCO.